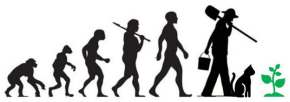
Stéphane Champely

Homo sapiens var. hortus

Notes de lecture d'articles académiques
au sujet du potager.



Homo sapiens var. *hortus*

Homo sapiens var. hortus © 2025 by Stéphane Champely is licensed under CC BY-NC-SA 4.0

Avant-propos

Je suis un *jardinier du dimanche*, mais aussi du samedi. Pourquoi, dès lors, ai-je pu consacrer trois années à écrire *Homo sapiens var. hortus* ?

La première raison est que je n'y raconte ni mon expérience, ni mes connaissances : il s'agit de notes de lecture d'articles académiques, de l'ordre d'un petit millier, traitant *lato sensu* du jardinage d'un potager et rédigés par des auteurs autrement qualifiés que je ne le suis. Étant moi-même enseignant-chercheur, j'ai accès à cette littérature scientifique ; mais surtout, ma spécialité est la statistique appliquée, ce qui m'a conduit à travailler avec des spécialistes de nombreuses disciplines, et à apprendre à leur contact. À force de 35 difficiles années d'entraînement, j'ai pu acquérir la capacité à juger de la solidité des données, des analyses et des conclusions d'une étude, y compris dans un domaine que je connais peu. J'espère, par conséquent, avoir saisi l'essentiel de ce que ces articles académiques exposent.

La deuxième raison est, et je l'expliquerai plus en détail dans une trop longue introduction, que les ouvrages pour le grand public consacrés au potager sont plus des méthodes, proposées soit par des professionnels, soit par des amateurs éclairés, prônant d'ailleurs souvent, ces dernières années, une variation autour de la permaculture ; rarissimes sont ceux écrits par des agronomes, sans même parler de chercheurs en agronomie. Assurément, ce ne sont pas les livres expliquant comment s'y prendre qui font défaut, mais ceux expliquant pourquoi s'y prendre ainsi : et si, avec un autre sol, avec un

autre climat, ou avec d'autres motivations, il ne vaudrait pas mieux s'y prendre tout autrement ? Voilà donc pourquoi, je me suis finalement décidé à écrire le livre que j'aurais aimé lire, celui qui dirait le pourquoi plutôt que le comment. Ces explications sont déclinées, en dix chapitres, dans la partie « Potagérer ».

La troisième raison est que j'apprécie les concepts, les théories, les méthodologies pour recueillir des données de qualité, les formulations mathématiques permettant des quantifications précises (avec leurs marges d'erreur) et la prise de décisions plus étayées. C'est là le style du projet : un ouvrage pour le petit public, pour les obsessionnels dans mon genre, il en faut pour tout le monde ! Le lecteur allergique à cette approche, mais néanmoins désireux de comprendre ce qui se trame au potager, en trouvera quelques autres plus pédagogiques, comme Helmstetter[1] (2020). Personne, en tout cas, ne pourra regretter d'avoir acheté *Homo sapiens var. hortus*, puisqu'il est gratuit.

La quatrième raison est que j'aime cultiver des espèces ou variétés peu courantes. Or, si je prends l'exemple, volontairement banal, des aromatiques, mes premières lectures m'ont peu renseigné. Ainsi, un ouvrage de référence, bien utile par ailleurs, de Thorez et Lapouge-Déjean[2] (2009), ne contient que trois-quatre pages à leur sujet. J'ai conséquemment ratissé la littérature académique traitant des principales aromatiques, et commis, dans la partie « Cabinet de curiosités », une trentaine de pages sur le thème. Même un jardinier aguerri pourra, à mon avis, y dénicher quelque information intéressante. Bien d'autres types de légumes (d'été, d'hiver, asiatiques ou *zoubliés*) y figurent également.

La dernière raison est que les bénéfices que procure le potager sont, ou très peu couverts, ou le sont sur un mode idéalisé. La partie « Potivations » décrit dans quelle mesure, il est possible de tirer de l'activité potagère des bénéfices économiques ; mais aussi des bénéfices moins tangibles, en termes d'expression de soi, de santé, de socialisation ; et enfin, des bénéfices pour l'environnement.

---

[1] Helmstetter, D. (2020). *Réussir son potager du paresseux - Un anti-guide pour jardiniers libres*. Tana éditions.

[2] Thorez, J.-P., & Lapouge-Déjean, B. (2009). *Le guide du jardin bio*. Terre vivante.

Pour finir, il y a une partie « Une couille dans le potager » qui aborde des thèmes plus anecdotiques, en mettant les points sur le i et le j de jardin par rapport à des discours, entendus dans un certain monde du jardinage, portant sur « Mère Nature » : ah, son sens de l'équilibre ! ah, sa prodigalité ! ah, sa perfection ! ah, sa bonté même ! Des discours, quasi-religieux, souvent tenus par des jardiniers et par des jardinières *des villes*. Je dois être trop athée de campagne : pour moi, la nature n'est ni bonne, ni mauvaise, ni bonne. Mieux connaître ses processus, à l'œuvre dans le potager, n'empêche en rien d'être sensible à la beauté, à la poésie, à la nostalgie qui s'en dégagent ; et de le partager avec Lolo, la femme que j'aime.

Ce travail a reçu le label IB (Intelligence Biologique) : il a été écrit sans recours à l'intelligence artificielle, à l'exception des corrections orthographiques et grammaterriennes. Les erreurs qu'il contient sont entièrement de mon fait[3].

[3] Merci à Thomas Goepfert pour sa lecture attentive et les corrections qu'il m'a suggérées.

Introduction

Un jour, sans y connaître grand-chose, j'ai décidé de cultiver un potager. Quatre années plus tard, *Homo sapiens var. hortus* contient quelque huit cent cinquante pages que j'ai pu écrire à ce sujet. Cette introduction tente d'expliquer ce qui s'est passé.

Comment décrire un potager ? Kirkpatrick et Davison (2018) qui en ont observé 101 à Hobart (Australie[4]) remarquent, en premier lieu, la grande variété des espèces cultivées d'un potager à l'autre. Il y a, certes, des espèces que l'on retrouve quasiment partout, comme la laitue, mais d'autres bien plus rarement, comme le panais. Certains jardiniers[5] semblent d'ailleurs les collectionner, alors que d'autres se concentrent sur un petit nombre de légumes. Ceci dit, à y regarder de près, toutes les laitues ne se ressemblent pas, et des variétés particulières distinguent certains potagers.

En second lieu, on peut cultiver la même 'Rougette de Montpellier' de bien des manières, et les deux auteurs relèvent également une belle diversité de pratiques : plus ou moins de travail du sol, plus ou moins de compostage, utilisation d'intrants biologiques ou pas, autoproduction de graines ou achat de plants en jardinerie... Kirkpatrick et Davison (*op. cit.*) rapportent enfin les discours, tout aussi variés, des jardiniers concernant leurs motivations ; cependant, dans un premier temps, nous allons laisser ces discours de côté, pour rester sur ce qui nous intéresse au premier chef dans ces notes de lectures scientifiques : les pratiques potagères.

> Du côté de chez Stéphane : Il s'agit là d'une description essentiellement sociologique ; un article agronomique aurait commencé par un portrait bien différent, tel que celui que je vais maintenant peindre de mon propre potager. Situé à 25 kilomètres de Lyon (latitude : 45.81, longitude : 4.65, altitude : 350 m), il connaît un climat semi-continental ; sur la période 2001-2020, la température annuelle moyenne a été de 10.4 °C (± 0.8), et les précipitations de 699 mm (± 137). Le jardin, en légère pente, est plutôt abrité des vents dominants venant de l'ouest. Il présente une surface totale, maison comprise, d'environ 1200 m^2. Il contient une dizaine d'arbres, dont plusieurs sont fruitiers, quelques

[4] En Tasmanie, la région où la permaculture, qui va jouer un rôle important dans cette introduction, est née.

[5] Tout au long du texte, j'emploie le genre masculin pour décrire la personne qui jardine, mais il s'agit souvent d'une femme, bien entendu.

> arbustes, deux haies, une « pelouse », des parties avec des fleurs ornementales, deux petits bassins et... un potager. Ce dernier ne fait que 65 m^2 ; il est étrangement organisé en parcelles assez éclatées spatialement, elles-mêmes faites de planches standardisées (2 m × 1 m). Le sol est sablo-limoneux avec 22 % d'argile, 34 % de limon, 44 % de sable ; et contient plus de 5 % de matière organique.

Est-ce que les pratiques observées dans les potagers sont aléatoires ? Ou bien est-il possible de les regrouper, dans le sens où certaines seraient plus souvent pratiquées ensemble ? Di Pietro et al. (2023) étudient 30 potagers et donnent un inventaire des pratiques associées que j'ai choisi de représenter graphiquement (Figure 1). Il s'en dégage, horizontalement, une tension entre deux pôles : à gauche, un sous-ensemble de pratiques que l'on qualifierait de conventionnelles[6] en agriculture, et à droite, d'agroécologiques[7].

Boulianne et Proteau (2020) distinguent, eux aussi, deux types de potagers et de jardiniers, qui recoupent largement cette tension, mais y ajoutent des considérations sur la productivité et le mode d'apprentissage de l'activité. D'une part, le « jardin archétypal », *propre et ordonné*, produit de façon importante des légumes traditionnels, avec des méthodes éprouvées, parfois depuis plusieurs générations, et dont on pourrait dire qu'elles sont *héritées* ; il est le résultat d'une activité vécue comme une sorte de travail, et poursuivant un objectif nourricier. D'autre part, le « jardin pluriversel » montre des résultats plus inégaux ; les cultures, les expérimentations et les modes d'apprentissage s'y multiplient ; et le jardinier se veut critique de la société de consommation et de son système agroalimentaire[8].

---

[6] Notons que, depuis 2019, les pesticides de synthèse sont interdits pour les jardiniers amateurs en France.

[7] Le cas de la bouillie bordelaise est particulier : il s'agit d'un traitement qui est aussi utilisé en agriculture biologique, tout en étant absolument rejeté par certains jardiniers *encore plus bio que bio*. .

[8] Dans une étude de jardins collectifs urbains à Montpellier, Scheromm (2015) détecte, au sein de ces jardiniers pluriversels, deux sous-groupes qui, s'ils partagent

Il y a donc potager et potager[9] *; il existe plusieurs façons de faire* et plusieurs manières d'en parler[10].

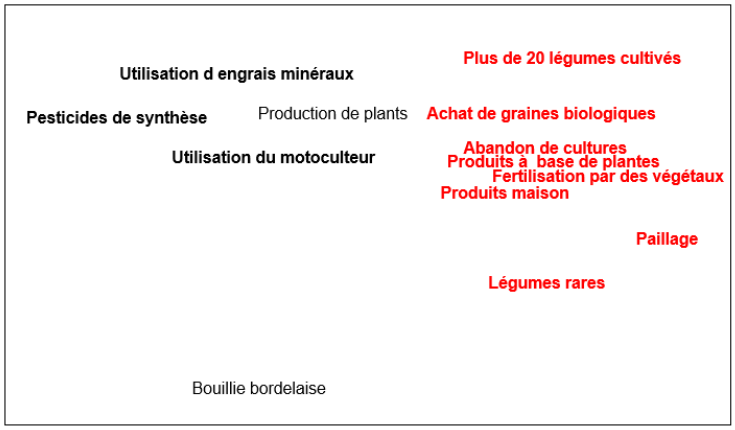


Figure 1 : Représentation graphique des proximités entre les pratiques potagères telles qu'elles ont été relevées dans di Pietro et al. (2023). Données tirées de leur tableau 1, puis analysées statistiquement afin d'en réaliser la cartographie.

Comment alors expliquer le choix d'un certain type de jardinage ? Une première façon de s'y prendre est, comme di Pietro et al. (*op. cit.*), de s'intéresser à la sociodémographie des jardiniers. Le genre joue sur l'activité potagère : s'il est un modèle traditionnel où les hommes dominent au potager, réalisant les travaux physiques, et laissant les femmes s'occuper des fleurs, il est à moduler selon la classe sociale (Guyon, 2008) ; en outre, la pratique des femmes s'avère plus

---

grosso modo les mêmes pratiques agronomiques, ont cependant des motivations différentes : les uns plus hédonistes, de classe sociale intermédiaire, ont une visée récréative et de bien-être psychologique, alors que les autres, d'une classe sociale plus élevée, sont plus militants, énoncent des motivations sociétales et environnementales et, au-delà du potager, essaient de mettre en application leurs idéaux en ce qui concerne l'alimentation, les achats... La section 12.1 est dédiée aux motivations des jardiniers amateurs.

[9] Notons que je ne discute ici que des potagers actuels ; pour un exposé solidement documenté et passionnant de l'histoire des potagers, lire : Quellier, F. (2023). *Histoire du jardin potager*. Armand Colin.

[10] Mais aussi des impacts économiques, sociaux et environnementaux, largement différenciés selon les pratiques.

écologique (Reyes-García et al., 2010 ; Coisnon et al., 2019). L'âge a aussi sa part, avec une inclination plus marquée pour l'agriculture biologique chez les plus jeunes et les moins expérimentés d'après Kaplan (1973) ; cependant, une étude, plus récente et à grande échelle, ne corrobore pas ces résultats, et un lien positif est trouvé entre l'âge et des pratiques durables de jardinage[11] (Coisnon et al., *op. cit.*). Il y a, comme pour beaucoup de pratiques culturelles, une corrélation avec la classe sociale (Guyon, *op. cit.*) : la fonction utilitaire du jardin (le potager et la production de légumes), prépondérante chez les classes sociales inférieures, cède la place à la fonction d'agrément chez les classes supérieures ; cependant, très récemment, ces dernières semblent s'intéresser de nouveau à l'activité potagère (Scheromm, *op. cit.*). Il y a enfin une différence entre les potagers des villes et les potagers des champs : non seulement par leur taille, mais aussi parce que le souci alimentaire est plus courant à la campagne, alors qu'en ville d'autres motivations, de bien-être, de reconnexion à la nature, sont plus présentes (Langemeyer et al., 2016).

Une seconde façon d'expliquer le choix d'un certain type de jardinage reprend les concepts développés par Pierre Bourdieu[12] et elle est, à mon sens, plus éclairante pour mon propos[13]. Bourdieu explique qu'une première chose *dépasse* le jardinier individuel : c'est que l'activité à laquelle il se livre est un enjeu de *luttes entre différents acteurs*, individuels comme des youtubeurs, mais aussi collectifs comme des revues de jardinage, des entreprises de jardinerie... En fait, ces

---

[11] L'étude, menée sur plus de 26 000 Européens, porte sur plusieurs pratiques effectives, considérées comme durables, de jardinage. Elle identifie des déterminants individuels (genre, âge, niveau d'éducation, orientation politique, localisation rurale) et nationaux (PIB, performance écologique du pays) ; la France étant plutôt avancée dans ce domaine. Un autre déterminant non abordé dans cette introduction est la propriété, privée ou collective, du potager. Enfin, l'accès à de l'information relative à la biodiversité paraît être un déterminant très important, que les auteurs considèrent comme un levier fondamental pour les pouvoirs publics, couplé à un appui aux organisations œuvrant en ce sens ; sans oublier bien sûr les réglementations, labellisations, étiquetages, taxes...

[12] Voir, par exemple, *assez* facile d'accès : Bourdieu et Wacquant (2014).

[13] Mais, *soyons clairs*, il ne s'agit ici que d'*intuitions, restant à valider* par une collecte de données plus sérieuses et dépassant ma petite histoire personnelle.

acteurs luttent pour se voir reconnaître une autorité lorsqu'il s'agit de parler de production de légumes : je vais appeler capital cultural, cette légitimité en la question du potager. Ce capital cultural peut prendre deux formes : une forme qui tient à l'expérience de l'activité potagère et une forme qui tient aux savoirs liés à cette activité. (Cette dernière forme étant particulièrement reconnue lorsqu'elle est attestée par un diplôme.) Alors, les acteurs concernés peuvent, en quelque sorte, être positionnés dans un espace social, que Bourdieu appelle champ, en fonction du capital cultural qu'ils possèdent (Figure 2).

Quatre positions peuvent être identifiées. Premièrement, il y a ceux qui ont un fort volume de capital cultural, ce sont les maraîchers professionnels, possédant à la fois expérience et diplôme agricole : l'ouvrage de Jean-Martin Fortier (2016) est représentatif de cette position. Deuxièmement, il y a les jardiniers amateurs expérimentés qui ont pu, en particulier, hériter ce capital cultural lors de leur prime enfance (Delay et al., 2014) en aidant leurs parents dans l'activité ; cette transmission étant orale et corporelle, pour ces raisons, il est rare d'avoir des ouvrages de ce type[14]. La troisième position présente une composition de capital inverse, avec surtout une légitimité scolaire ou scientifique : c'est typiquement le cas d'un livre didactique d'agronomie tel que Néron et Aletto (2022) ; mais ces ouvrages s'avèrent rarissimes dès qu'il s'agit de traiter du potager : ils sont plutôt consacrés aux grandes cultures[15] ; il existe aussi bien peu de vulgarisation scientifique (Farrinmond, 2024) ; et pour ce qui est des articles académiques, ils restent difficilement accessibles au grand public. La quatrième position est celle dépourvue de capital cultural,

[14] Mais on peut, par exemple, regarder la chaîne YouTube très intéressante : « Les bons conseils d'un jardinier », pour en avoir une idée. Sachant que le jardinier Jacquot travaille dans l'horticulture, et n'est donc pas un amateur tout à fait comme les autres...

[15] De façon sous-jacente, les préoccupations économiques sont omniprésentes dans ce champ de la culture potagère, que ce soit évidemment chez le maraîcher professionnel, dans le potager traditionnel visant le plus souvent un complément de revenu, et dans la recherche agronomique en lien avec des programmes publics ou privés de financement.

qu'on peut illustrer, par exemple, avec la permaculture[16]. Même si la permaculture affiche des prétentions à une productivité importante et essaie de mettre en place un système de certification, elle a été sans doute peu prise au sérieux par les acteurs les plus dotés en capital cultural : elle occupe une position dominée.

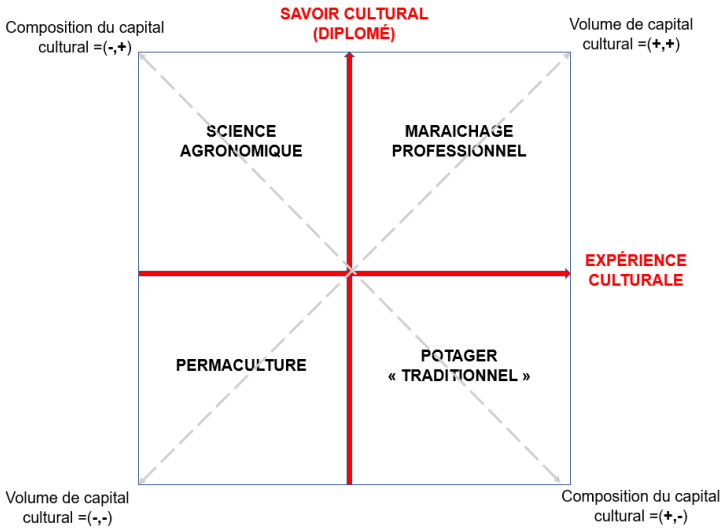


Figure 2 : Espace social de la culture potagère. Les deux formes possibles du capital cultural (expérience en abscisses et savoir institutionnalisé en ordonnées) permettent de repérer quatre positions. Le volume de capital est la somme des deux formes, et la composition leur différence.

Or, il est une *stratégie* classique des acteurs situés dans ce type de position, c'est ce qu'on appelle la subversion : ils tentent de redéfinir le capital en jeu dans des formes qui les avantagent. La permaculture mise sur le capital écologique : elle se présente comme une méthode qui « prend soin de la Terre ». Bien sûr, cette préoccupation n'est pas absente chez les acteurs d'autres positions ; chez les scientifiques, il y a de nouvelles approches très agroécologiques, qui côtoient l'ancienne agronomie productiviste ; et cela est tout aussi vrai chez les jardiniers

[16] Mais d'autres courants agronomiques auraient pu prendre place à ses côtés, tels que l'agriculture naturelle de Masanobu Fukuoka, l'agriculture biodynamique de Rudolf Steiner, l'agriculture des systèmes naturels de Wes Jackson... ou la dernière tendance en date : l'agriculture syntropique d'Ernst Götsch.

expérimentés et chez les professionnels en maraîchage biologique ; mais du point de vue d'un débutant, la permaculture apparaît, sur cet aspect, comme largement dominante[17].

Nous en venons à la deuxième chose qui *dépasse* le jardinier individuel selon Bourdieu : une personne qui se met à une activité nouvelle n'y arrive pas vierge, elle a été socialisée, et d'une part, possède une *façon propre d'appréhender le monde, d'y agir et d'en discourir*, bref une personnalité forgée par sa trajectoire sociale (un habitus), et d'autre part, elle a acquis, au fil de son parcours, des ressources économiques, culturelles et sociales (des capitaux primaires). Lorsque cette personne *débarque* dans l'activité qui est un champ, structuré par des luttes comme nous venons de le voir au-dessus, sa personnalité va inconsciemment l'orienter vers une certaine position : celle où elle pourra convertir le plus facilement possible ses ressources primaires dans le capital en jeu, le capital cultural en l'occurrence ; ce qui va engendrer un certain type de pratique potagère[18].

J'en arrive enfin à ce qui va influencer mes débuts dans le jardinage : je suis, depuis vingt-cinq ans, très attentif à l'état de la planète (et de nos sociétés humaines) ; et voici trois conseils de lectures scientifiques pour le bien mesurer. Steffen et al. (2015) évaluent l'évolution, depuis l'invention de la machine à vapeur, de douze paramètres socio-économiques décrivant les sociétés humaines d'une part, et de douze paramètres biophysiques décrivant le système Terre d'autre part. Le résultat graphique (Figure 3) permet de tirer plusieurs conclusions. Premièrement, la croissance des sociétés humaines, continue sur cette période, a connu une explosion à partir des années 1950 environ, phénomène qui va porter le nom de grande accélération. Deuxièmement, toutes les sociétés humaines n'y ont pas pris la même part : les inégalités de croissance sont manifestes. Troisièmement, les paramètres biophysiques suivent la même tendance, même si c'est d'une façon moins abrupte. Corrélation temporelle ne fait pas causalité,

---

[17] Au final, le lecteur peut noter que nous n'avons pas une tension entre deux formes de jardinage, mais potentiellement sept positions (la permaculture sans capital écologique n'existant pas, mais les trois autres positions peuvent en avoir ou pas).

[18] Bourdieu a une « formule » pour résumer tout cela : Pratique = [(Habitus)×(Capitaux)]+Champ.

mais des études de très grande ampleur (climat, biodiversité) sont venues confirmer que les activités humaines en sont bien largement responsables et que, dorénavant, sociétés humaines et système Terre ne peuvent plus être considérés indépendamment. Quatrièmement, il s'agit d'un changement global, et pas seulement climatique, pour le système Terre qui semblait, depuis 12 000 ans, relativement stable, formant une ère géologique dite de l'Holocène ; une période favorable ayant permis le développement de l'humanité. Pour certains, ces nouvelles conditions ont suggéré le passage à une nouvelle ère géologique, marquée par l'empreinte de l'être humain, celle de l'Anthropocène. Cinquièmement, deux questions se posent en regardant ces graphiques : existe-t-il des limites, aussi bien pour le système Terre que pour les sociétés humaines, dans leur destin conjoint ? Est-ce que cela peut, indéfiniment, continuer ainsi ?

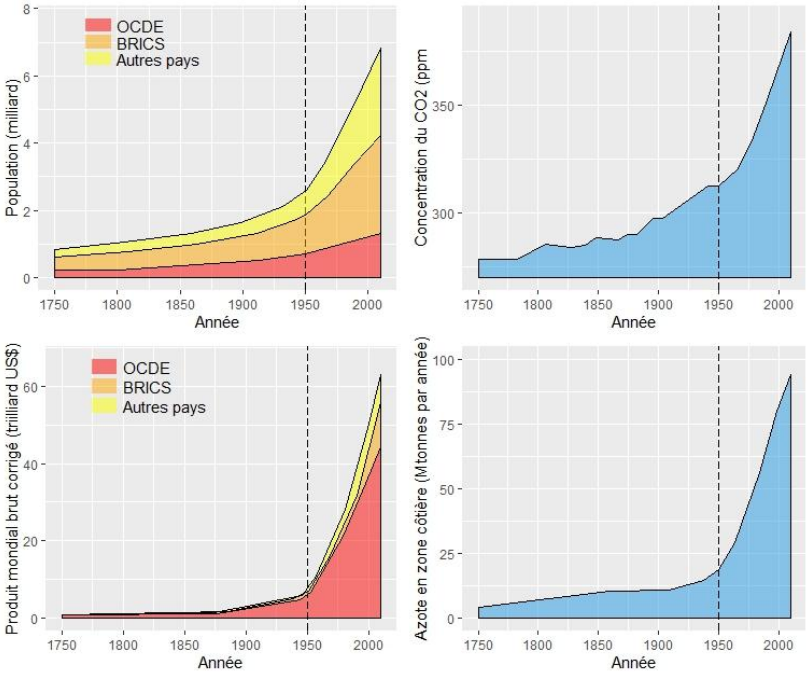


Figure 3 : La grande accélération depuis 1950. En haut à gauche, évolutions démographiques de 1750 à 2010 observées dans l'OCDE, les BRICS et le reste du monde. En bas à gauche, évolutions du produit brut pour les mêmes regroupements de pays. En haut à droite, évolution de la concentration en CO_2. En bas à droite, évolution de la pollution azotée en zone côtière. Données : Steffen et al. (2015).

Rockström et al. (2009) montrent en effet comment certaines limites écologiques de la planète[19] sont en train d'être dépassées (Figure 4), et en particulier, trois d'entre elles que nous retrouverons au fil des chapitres : changement climatique, perte de biodiversité et intensification du cycle de l'azote[20].

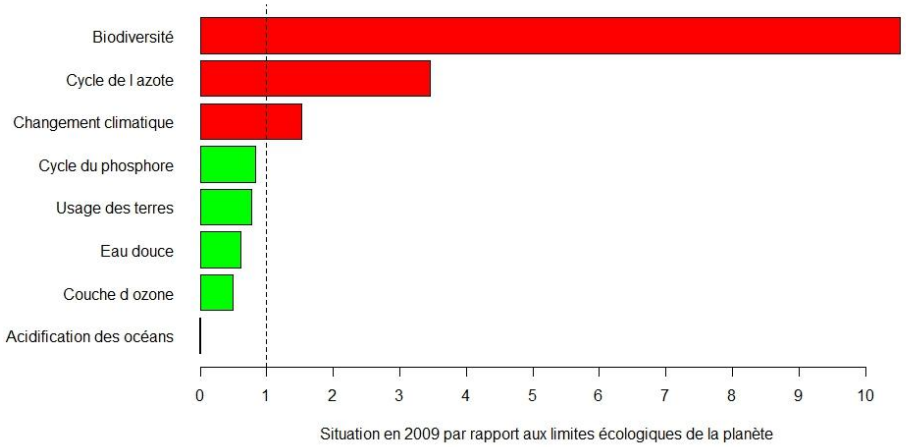


Figure 4 : Situation en 2009 des principaux processus écologiques par rapport aux limites de la planète (indiquées par un trait en pointillés en x=1). Données tirées de Rockström et al. (2009).

Le rapport de Rome en 1972 proposait une modélisation de nombreux paramètres socio-économiques et biophysiques, et de leurs interactions, afin d'envisager plusieurs scénarios pour l'avenir. L'ensemble montrait que la croissance ne pouvait être infinie, mais pour des raisons diverses, provenant toutes du couplage entre le système Terre et les sociétés humaines ; et que, pour nombre de ces scénarios, le résultat se soldait par un effondrement des conditions

[19] Même si les auteurs sont les premiers à reconnaître qu'il est difficile de fixer précisément de telles limites globales, et que les processus en jeu sont fortement interdépendants, multipliant les risques d'*emballement* du système.

[20] Sur ce dernier aspect, le secteur agricole est le principal responsable du fait de la fertilisation, car la fixation artificielle de l'azote atmosphérique en azote assimilable par les plantes, qui est industrielle, *mais aussi biologique* grâce à l'emploi de légumineuses (rien n'est simple à y regarder de près...), s'avère bien plus importante que l'ensemble des processus naturels dédiés.

économiques, sociales et environnementales. Herrington (2020) confronte quatre des scénarios originaux avec les données actuelles, afin de repérer le plus vraisemblable. Le scénario SW (*stabilised world*), où les sociétés humaines décident, d'elles-mêmes, de contenir leur croissance, en modifiant leur démographie, leurs valeurs consuméristes et en appliquant des politiques spécifiques (en faveur de l'éducation et de la santé), seul scénario dans lequel les productions agricoles et industrielles, ainsi que la population mondiale se stabilisent, est le plus éloigné de la réalité ! Le scénario inverse, où rien ne change, dit *Business as usual*, le plus souvent évoqué, qui conduit à un effondrement généralisé du fait d'un manque de certaines ressources non-renouvelables (en particulier, le pétrole) stoppant la production, est lui aussi moins probable : il s'avère que, depuis la version originelle de 1972, les ressources existantes ont été réestimées à la hausse[21]. Il reste deux scénarios qui correspondent assez bien aux données présentes. L'un tient compte de ces ressources supplémentaires et... conduit également à un effondrement, mais pour une raison différente : la pollution, et on pense bien entendu aux gaz à effet de serre et à leurs conséquences sur le climat et les activités humaines. L'autre scénario formule des hypothèses de progrès technologique particulièrement optimistes[22] qui permettent un « découplage » entre la croissance, et à la fois, l'utilisation des ressources et la pollution qui s'ensuit. Dans ce dernier cas, il ne s'agit pas d'effondrement, mais de déclins des productions et des populations[23].

Ces sombres constats et prédictions ont pris une grande part dans un changement radical de *ma façon d'appréhender le monde, d'y agir, d'en discourir*, et donc mon mode de vie ; entre autres, j'ai participé dans les années 2000 à la création d'un parti politique mineur : « La décroissance », formulant des propositions proches du scénario SW[24]. On pourrait ainsi parler d'éco-habitus (Cartfagna et al., 2014) en ce

---

[21] Mais n'en sont pas moins, comme Capri, finies...

[22] En fait, au-delà de ce tout qui a été observé historiquement jusqu'alors... et de plus, un progrès partagé entre tous...

[23] Sans doute très inégalitaire, mais ce n'est pas le sujet de cet article.

[24] Un détail que je n'ai pas évoqué dans ce scénario stabilisateur est que les changements sont impulsés dès 2002...

qui me concerne. Cette notion a été proposée afin d'expliquer les nouveaux modes de consommation éthique (transport, énergie, troc, alimentation, produits domestiques, etc.). Les auteurs ont repéré un changement chez les personnes dotées d'un fort capital culturel (et non pas cultural) depuis les études de Bourdieu (1979) et de Holt (1998). La crise écologique aurait, depuis lors, modifié les consciences (et les inconscients), les préférences et les pratiques dans cette population, avec une inversion de certaines polarisations, par rapport aux travaux des deux prédécesseurs[25]. Ils observent à présent, aux États-Unis, une valorisation du local (par rapport au cosmopolitisme), du matériel (par rapport à l'idéalisme), et du manuel (par rapport au travail intellectuel) ; trois valeurs qui étaient, autrefois, l'apanage des personnes à faible capital culturel. Cependant, ces valeurs sont ici totalement reconfigurées : le nouveau localisme est celui de la nourriture locale, de l'économie locale, limitant les transports, et par conséquent l'impact écologique global ; le nouveau matérialisme est celui, à la fois, d'un retour à la physicalité des produits, souvent appréhendée en connexion avec la Terre, mais surtout d'une meilleure compréhension des circuits de production des objets consommés, et de leur durabilité ; le nouveau travail manuel est celui de l'appropriation de compétences plus tangibles, du *do-it-yourself*, voire de l'autosuffisance[26]. Le jardinage potager amateur, répondant simultanément à ces trois critères, peut donc devenir une pratique en résonance avec cette mouvance, et être lui-même reconfiguré.

Il était, dès lors, assez probable qu'un jour, *je décide* de cultiver un potager... et que mes pratiques soient d'obédience permaculturelle. En effet, dans mon enfance, nous habitions un appartement, et mes parents n'ont pu me transmettre leur savoir et leur savoir-faire en ce

---

[25] Ce qui n'invalide en rien les théories de Bourdieu, qui sont en fait dynamiques et historiques, contrairement à ce que certains imaginent.

[26] On parle ici des personnes avec un haut capital culturel, mais un faible capital économique ; pour ceux qui possèdent, en plus, un fort capital économique, les pratiques de consommation changent aussi : avec plus d'achats de produits organiques, de véhicules électriques.... mais en aucun cas, avec une vision décroissante : il s'agit plutôt d'une vision de la possibilité d'un découplage, d'une croissance durable.

domaine ; en revanche, au moment où je me suis penché sur le sujet, les étagères des librairies étaient pleines d'ouvrages sur la permaculture[27], et la vision qu'elle proposait me paraissait tout à fait conforme... à la mienne. La permaculture tient un discours global sur l'écologie et les enjeux de société, alimentaires en particulier, qui m'a beaucoup intéressé, et sur le plan des pratiques potagères, recommande les cultures pérennes, la polyculture étagée, la gestion attentive de l'eau, le tout intégré dans une réflexion approfondie sur la configuration spatiale du jardin. Mes premières tentatives se sont déroulées en parfaite orthodoxie avec lesdits commandements : j'ai donc commencé avec un bosquet comestible, quelques légumes pérennes, et quand même, des laitues et tomates (mulchées) comme tout le monde !

Au bout d'une année, un premier consta s'est imposé : je produisais peu de nourriture. Les très nombreux livres, sites et vidéos sur Internet que j'avais pu consulter donnaient pourtant des anecdotes d'abondance et de résultats miraculeux, contrairement aux miens ; mais sans jamais en donner les sources : on se serait cru dans « Jean de Florette » ! Ferguson et Lovell (2014) formulent les mêmes critiques : les déclarations de ce mouvement sont souvent exagérées et simplificatrices[28], et sans véritables évaluations des pratiques proposées. Ces deux auteurs soulignent, point très important pour la suite, que la permaculture s'est développée dans un certain isolement, voire une opposition à la science, tout en étant parfois proche des pseudo-sciences.

Mais de qui parle-t-on exactement quand on souligne cette opposition à la science et cette proximité avec les pseudo-sciences ? Pierre Bourdieu, dans une partie peu connue de son ouvrage « La distinction », a repéré, dès cette époque (1979), un groupe social émergent qu'il caractérise par les termes suivants[29] : « Agriculture

---

[27] Plus généralement, la littérature sur le potager est pléthorique, et le jardinier peut, avec plaisir, s'y perdre ; sans compter la lecture fournie par les revues, les almanachs, les catalogues de graines ou d'outils... et toutes leurs déclinaisons numériques.

[28] « overreaching and oversimplifying »

[29] J'en omets certains, car la liste est longue, page 429.

biologique, anthroposophie, anti-nucléaire, antipsychiatrie, anti-scientisme, anti-vaccination, astrologie, biodynamie, bioénergie, créativité, macrobiotique, hatha-yoga, homéopathie, magnétisme, médecine orientale, méditation, parapsychologie, poterie, vannerie, vulgarisation parascientifique ». Je peux confirmer que ce sont des termes caractérisant un bon nombre de partisans de la permaculture que j'ai pu croiser. Il ne s'agit pas, ici, de faire le procès de la permaculture (vu mon engouement initial...), ni de mettre tous ses adeptes dans le même panier, qu'ils ont eux-mêmes tressé ; mais d'expliquer pourquoi cela a été l'occasion d'une prise de conscience personnelle douloureuse, mais constructive !

Pour mieux comprendre, il faut savoir que j'ai obtenu, il y a de cela bien longtemps, un doctorat en biométrie, et que je suis enseignant-chercheur en statistique. Au début de ma carrière, mes domaines d'application étaient la biologie des populations et l'écologie ; cependant, la suite s'est déroulée au sein... des activités physiques et sportives. Si j'ai pu tâter de l'agronomie, c'est de loin, en enseignant pour mes premiers cours de statistique dans un lycée horticole, puis lors d'une semaine de séminaire concernant la planification des expériences, session organisée par le CIRAD[30] à Dakar avec des chercheurs d'Afrique subsaharienne, essentiellement des agronomes.

Et c'est en tant que scientifique qu'un deuxième constat s'est imposé. Ce qui se disait, ou dans les ouvrages, ou dans les sites ou dans les vidéos sur Internet, au sujet de la conduite d'un potager m'a, dès le début, un peu surpris : par le manque de « concepts », le manque de précision, le manque d'appareils de mesure, le manque de données, le manque de validation par ces mêmes données des hypothèses défendues, et au final, le manque de « lois naturelles » ; et aussi, le manque de bibliographie. Mais par-dessus tout, ce sont quelques-uns des conseils dispensés, tels que l'emploi du calendrier lunaire, du purin d'orties, et des considérations sur ce qui cause la chaleur dans les serres, qui sont profondément incompatibles avec *la façon dont les scientifiques appréhendent le monde, y agissent, et en discourent*, bref

[30] Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement

avec un habitus scientifique[31] (Jeon, 2019). Même si je sais pertinemment que le jardinage amateur n'est qu'un loisir, et que l'objectif est d'y produire des légumes et non des articles académiques, il existe en quelque sorte une ligne verte à ne pas dépasser en ce qui me concerne... Cela m'a convaincu d'aller rechercher ce que la véritable[32] littérature scientifique agronomique ou biologique avait à dire sur ces sujets.

D'aucuns avancent que « la science n'explique pas *tout*[33] ». Certes, mais il y a quand même près de neuf millions de chercheurs dans le monde, et il est sidérant de voir la diversité des problèmes qu'ils ont pu aborder. Par exemple, sur les trois sujets en question, ce qu'ils disaient s'avérait être fort éloigné des conseils prodigués. Il faut bien comprendre toute la différence avec des observations et résultats anecdotiques[34] rapportés par des personnalités charismatiques comme, par exemple, Masanobu Fukuoka[35]. Ces articles scientifiques sont, eux, supportés par des essais souvent réalisés sur plusieurs variétés, sur plusieurs sites, et sur plusieurs années, en étudiant simultanément plusieurs facteurs (*e.g.* irrigation et fertilisation) ; essais effectués selon les règles de l'art, telles qu'a pu les mettre en place, *comme par hasard*

---

[31] Il n'existe pas qu'une forme d'habitus scientifique, les dispositions changent, en particulier, selon la discipline du chercheur. Je fais plutôt ici référence aux sciences naturelles, peu investiguées par Pierre Bourdieu d'ailleurs.

[32] C'est-à-dire publiée dans des revues scientifiques, en étant préalablement relue anonymement par des experts.

[33] *Tout* étant, plus précisément, formé de certaines énergies et vibrations particulièrement subtiles...

[34] « Le statisticien doit parfois agir comme une sorte de policier, en suggérant aux clients que, peut-être, leurs données ne sont pas suffisantes pour supporter ce qui semble être des découvertes importantes » (Gower, 1988).

[35] L'agriculture scientifique a aussi ses héros (voir la Figure 5), ainsi que la *Révolution Verte* avec Norman Borlaug. L'histoire de tous ces fondateurs contient des moments épiques sur leur illumination initiale, leur quête (*e.g.* l'imitation de la nature), les oppositions rencontrées, la portée universelle de leurs découvertes. Et, que ce soit au profit de l'agriculture dominante ou alternative, ces récits sont mobilisés, parfois plus que les faits, par leurs prosélytes et organisations dédiées, non seulement pour influencer le débat (accumulation de capital cultural), mais aussi pour leur survie et la recherche de financements (formation, certification, consultation, vente de magazines ou de graines, Cabral & Sumberg, 2022).

dans le cadre de l'agronomie, Ronald Aymard Fisher[36] (Figure 5) : avec une culture témoin, une randomisation, des répétitions, des répétitions, des répétitions, un protocole standardisé ; essais dont les résultats sont quantifiés et s'avèrent ou pas, statistiquement et pratiquement significatifs. En outre, les auteurs de ces articles se corrigent les uns les autres régulièrement, ce qui amène à une accumulation de connaissances collectivement consolidée.

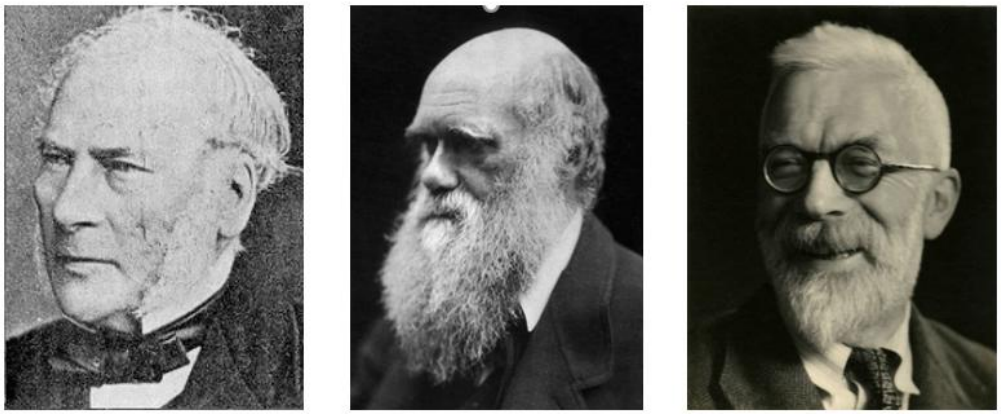


Figure 5 : Science et agriculture - Jean-Baptiste Boussaingault, fondateur de la chimie agricole en France ; Charles Darwin, spécialiste ès vers de terre ; Ronald Fisher, fondateur de la planification des expériences en agriculture et... d'une bonne partie de la statistique (et de la génétique).

Concernant les trois sujets du calendrier lunaire, du purin d'orties et de ce qui cause l'effet de serre dans une serre, suite à mes lectures académiques, j'ai dans un premier temps rédigé des sortes de billets d'humeur, qu'on retrouvera dans la partie « Une couille dans le potager ». C'était plus pour m'amuser qu'autre chose, et cela aurait pu s'arrêter là.

---

[36] Sans aucun doute, un des plus grands statisticiens, employé de 1919 à 1933 à la station agricole expérimentale de Rothamsted (Gower, 1988 ; Street, 1990), station dont nous reparlerons dans le chapitre concernant la santé chimique du sol. Cette station agricole a vu se succéder la crème des statisticiens anglais pour développer non seulement les expérimentations agricoles, mais aussi les essais biologiques (*e.g.* efficacité d'un pesticide) ou les estimations de récoltes, de dommages causés par des ravageurs, à la base des statistiques agricoles.

J'avais toutefois une prédilection pour la culture d'espèces de légumes ou de variétés assez rares[37]. Le maraîcher, proche de chez moi, produisait beaucoup mieux que je ne savais le faire, mes *légumes de tous les jours* : je m'essayais donc, à part quelques variétés de tomates, bettes, laitues ou radis qu'il ne proposait pas, à des cultures comme celles des chicorées italiennes, des amaranthes, du chrysanthème comestible, des variétés asiatiques de navets... ce qui soulève aussi pas mal de questions côté cuisine, questions que nous n'approfondirons pas ici. Toutes ces espèces sont quasiment passées sous silence, ou au mieux, très rapidement évoquées dans les guides de jardinage. Conséquemment, je me suis attelé, dans un deuxième temps, à collecter de façon compulsive la littérature scientifique à leur sujet, afin d'y trouver quelques pistes pour les mieux cultiver. Cette littérature s'avéra assez limitée, et j'arrivais rapidement, au bout d'une dizaine de papiers, à saturation[38]. C'est de ces lectures, afin d'en retenir l'essentiel, qu'est née l'idée de rédiger pour mon propre compte une quarantaine de notes traitant de ces légumes peu classiques ; voire de faire partager mon enthousiasme et mes découvertes à d'éventuels curieux. C'est pourquoi j'ai intitulé ces notes : « Cabinet de curiosités ».

Parmi les quelque 300 articles académiques consultés, les mêmes concepts agronomiques revenaient régulièrement : période critique de désherbage, doses raisonnables de fertilisation, effet d'une juste irrigation... Pris par le jeu[39], en quelque sorte, c'est le moment où le projet « *Homo sapiens* var. *hortus* » (Figure 6) a véritablement vu le jour : je me suis appliqué à l'étude de ce que je pourrais appeler les dix conditions principales influençant la culture des légumes. Je n'ai pas la prétention de concurrencer un véritable livre d'enseignement

---

[37] Ce qui, à nouveau, est peu étonnant pour un chercheur, qui va avoir tendance à s'intéresser, soit à des questions nouvelles, soit à des questions largement financées (d'où la focalisation de l'agronomie sur quelques grandes cultures).

[38] C'est-à-dire que j'avais épuisé les articles majeurs sur le sujet.

[39] Mais en le jouant très mal : perdre ainsi trois ans de sa vie scientifique pour un travail qui ne sera jamais reconnu académiquement (car d'une part, j'exerce en dehors de mon champ disciplinaire, et d'autre part, le sujet est des moins prestigieux) constitue une erreur de débutant, ou un luxe de fin de carrière...

agronomique. Je me permets encore une fois de souligner que je n'ai rien inventé, de rappeler que je ne suis pas chercheur dans ces domaines, *j'ai simplement rédigé des notes de lecture* ! Les deux originalités de mon travail, je crois, sont le fait d'essayer de traduire des techniques, plutôt adaptées au départ aux grandes cultures, à l'échelle du potager ; et de mettre au centre de l'exposé des modèles mathématiques pour décrire, entre autres choses, la germination, l'irrigation ou l'association entre espèces. Ces modèles mathématiques ont, *à mon sens*, le mérite de la concision, de la précision (et de la mesure de l'imprécision) et d'encourager des variations et des développements pour mieux s'adapter, disons par exemple, à une nouvelle donne climatique. Pour écrire cette partie « Potagérer », j'ai utilisé environ 500 articles académiques. Je dois toutefois avouer que je n'ai pas employé une méthode extrêmement rigoureuse, comme celle exposée dans Petticrew (2001), pour les sélectionner et parvenir à saturation ; car cela aurait alors été l'œuvre d'une vie, à la vue de l'étendue des sujets abordés ! J'ai fait confiance à mes envies et à mon *métier*.

On a vite fait de remarquer que les articles académiques en agronomie débutent très souvent par des généralités sur la croissance de la population mondiale, et la capacité de l'agriculture à la nourrir ; tout en préservant, en même temps, ce qui reste de l'environnement. D'un côté, on peut donc se demander, mais au niveau d'un potager cette fois, ce qu'on sait de sa contribution à notre alimentation ; et de ses effets, positifs ou négatifs, sur l'environnement. D'un autre côté, les potagers ont été bien étudiés par les sciences sociales et humaines, surtout quand ils sont collectifs : on a observé des effets allant de l'épanouissement du jardinier, à sa santé et à sa sociabilité. J'ai réuni ces diverses informations dans la partie « Potivations » : elle montre comment le potager peut contribuer au bien-être humain, soit directement de façon matérielle (par sa production) ou de façon non-matérielle (par exemple, par ses effets sur la santé psychique), soit indirectement par sa régulation de l'environnement. Je n'en avais absolument pas conscience quand, un jour, sans y connaître grand-chose, j'ai décidé de cultiver un potager.

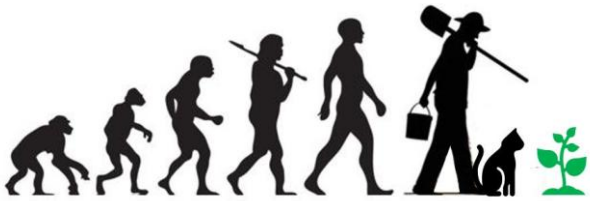


Figure 6 : Logo du projet « *Homo sapiens* var. *hortus* ».

Reste un dernier point : est-ce que ce parti-pris scientifique désenchante ma pratique potagère ? Peu de personnes ont eu plus de plaisir que Galileo Galilei à contempler les étoiles. Peu de personnes ont montré plus d'intérêt que Charles Darwin à observer les mouvements des plantes, les becs des oiseaux ou les turricules de vers de terre (Figure 5). Peu de personnes ont regardé les petits pois et leurs parents comme Johann Gregor Mendel a pu le faire. À mon modeste niveau, le potager ne cesse pas non plus de produire ses effets d'étonnement, de plaisir, de beauté ; mais à ces effets, s'ajoute la conscience simultanée d'un monde d'une beauté plus abstraite, et non moins stupéfiante : des réactions chimiques de photosynthèse, des symbioses mycorhiziennes, des modèles de compétition végétale, des équations d'évapotranspiration ou des classifications phylogénétiques. Et pendant ce temps, le chat est étendu, nu, sur la pelouse.

Boulianne, M., & Proteau, J. (2020). Formes et significations du jardinage québécois. Rapport de recherche, Université Laval, Canada. https://www.researchgate.net

Bourdieu, P. (1979). *La distinction – critique sociale du jugement*. Les éditions de minuit, Paris.

Bourdieu, P., & Wacquant, L. J. (2014). *Invitation à la sociologie réflexive*. Seuil, Paris.

Cabral, L., & Sumberg, J. (2022). The use of epic narratives in promoting 'natural agriculture'. *Outlook on Agriculture*, *51*(1), 129-136.

Carfagna, L. B., Dubois, E. A., Fitzmaurice, C., Ouimette, M. Y., Schor, J. B., Willis, M., & Laidley, T. (2014). An emerging eco-

habitus: The reconfiguration of high cultural capital practices among ethical consumers. *Journal of Consumer Culture*, *14*(2), 158-178.

Coisnon, T., Rousselière, D., & Rousselière, S. (2019). Information on biodiversity and environmental behaviors: A European study of individual and institutional drivers to adopt sustainable gardening practices. *Social science research, 84*, 102323.

Delay, C., Frauenfelder, A., & Scalambrin, L. (2014). «On sait ce qu'on mange»: jardin familial et mode d'alimentation populaire. *Sociologie et sociétés, 46*(2), 37-57.

Di Pietro, F., Gardair, E., & Poiré, M. (2023). Profils de jardiniers. Pratiques, motivations et représentations du jardinage dans les jardins familiaux. *Espaces et sociétés, 188*(1), 55-74.

Farrinmond, S. (2024). *Science du jardinage*. Éditions Eyrolles.

Ferguson, R. S., & Lovell, S. T. (2014). Permaculture for agroecology: design, movement, practice, and worldview. A review. *Agronomy for sustainable development, 34*, 251-274.

Fortier, J.-M. (2016) *Le jardinier-maraîcher - Manuel d'agriculture biologique sur petite surface*. ECOSOCIETE.

Gower, J. C. (1988). Statistics and agriculture. *Journal of the Royal Statistical Society Series A: Statistics in Society, 151*(1), 179-200.

Guyon, F. (2008). Les jardins familiaux aujourd'hui: des espaces socialement modulés. *Espaces et sociétés, 134*(3), 131-147.

Herrington, G. (2021). Update to limits to growth: Comparing the World3 model with empirical data. *Journal of Industrial Ecology, 25*(3), 614-626.

Holt D (1998) Does culture capital structure American consumption? *Journal of Consumer Research, 25*, 1–25.

Jeon, J. (2019). Rethinking scientific habitus: Toward a theory of embodiment, institutions, and stratification of science. *Engaging Science, Technology, and Society, 5*, 160-172.

Kaplan, R. (1973). Some psycholog ical benefits of gardening. *Environment and behavior, 5*(2), 145-162.

Kirkpatrick, J. B., & Davison, A. (2018). Home-grown: Gardens, practices and motivations in urban domestic vegetable production. *Landscape and Urban Planning, 170*, 24-33.

Langemeyer, J., Latkowska, M. J., Gómez-Baggethun, E. N., Voigt, A., Calvet-Mir, L., Pourias, J., ... & Baležentienė, L. (2016). Ecosystem services from urban gardens. In Urban allotment gardens in Europe (pp. 115-141). Routledge.

Néron, F., & Alletto, L. (2022) *Petit précis d'agronomie*. Editions France Agricole.

Petticrew, M. (2001). Systematic reviews from astronomy to zoology: myths and misconceptions. *BMJ, 322*(7278), 98-101.

Reyes-García, V., Vila, S., Aceituno-Mata, L., Calvet-Mir, L., Garnatje, T., Jesch, A., ... & Pardo-de-Santayana, M. (2010). Gendered homegardens: a study in three mountain areas of the Iberian Peninsula. *Economic Botany, 64*, 235-247.

Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F. S., Lambin, E. F., ... & Foley, J. A. (2009). A safe operating space for humanity. *Nature, 461*(7263), 472-475.

Scheromm, P. (2015). L'expérience agricole des citadins dans les jardins collectifs urbains: le cas de Montpellier. Développement durable et territoires. *Économie, géographie, politique, droit, sociologie, 6*(1).

Street, D. J. (1990). Fisher's contributions to agricultural statistics. *Biometrics*, 937-945.

Steffen, W., Broadgate, W., Deutsch, L., Gaffney, O., & Ludwig, C. (2015). The trajectory of the Anthropocene: the great acceleration. *The anthropocene review*, *2*(1), 81-98.

Potagérer

Cette partie « Potagérer » constitue le cœur du projet *Homo sapiens var. hortus*. Elle comporte dix chapitres, décrivant des conditions de culture d'une plante (un légume, en fait), que l'on peut regrouper en conditions climatiques, conditions pédologiques et conditions liées aux interactions de la plante avec d'autres organismes vivants.

Pour chacune de ces conditions, je commencerai par définir ce dont nous parlons (la lumière, par exemple), ses diverses composantes, et ce que nous pouvons effectivement en mesurer.

S'ensuivront deux sections théorico-théoriques qui exposeront, d'une part, les réponses de la plante à cette condition (elle pousse, elle déclenche sa reproduction, elle *bouge*, elle meurt...), voire, dans le meilleur des cas, à plusieurs conditions simultanément ; et d'autre part, les facteurs influençant la condition en question (pour la lumière : la saison, l'heure de la journée, ce qu'il y a entre le soleil et la plante comme un nuage, une plante concurrente plus grande, ou un voile de croissance). Ce sera principalement dans ces deux sections que nous ferons appel à des modèles conceptuels ou mathématiques : ni forcément les plus récents,[40] ni les plus sophistiqués, mais les plus *utiles*, au sens où ces modèles ont été bien validés, et restent suffisamment simples à manipuler pour donner une *idée de l'essentiel*. De nombreux graphiques en faciliteront, j'y compte bien, l'interprétation. Les données réelles

[40] C'est dans les vieux potagers qu'on fait la meilleure soupe.

seront à l'honneur, et concerneront les légumes du potager plutôt que les grandes cultures.

Puis, une section pratico-pratique tirera les conclusions de ce qui précède, afin de gérer cette condition de culture au potager. Un développement sur l'impact du changement climatique clôturera usuellement le chapitre.

Après la liste des références bibliographiques, figurera souvent une section, intitulée « Ctrl-R », contenant des programmes informatiques libres de droit ; ils permettent d'adapter à son propre contexte (latitude, température, texture du sol...) les éléments présentés.

J'ai essayé de retranscrire, le plus fidèlement possible, le travail et l'opinion des auteurs dans ces notes de lecture ; mais, à l'occasion, je donnerai aussi mon humble avis dans des encadrés au titre proustien : « Du côté de chez Stéphane ».

1 Lumière

Au commencement, Dieu créa les cieux et la terre. La terre était informe et vide : il y avait des ténèbres à la surface de l'abîme, et l'esprit de Dieu se mouvait au-dessus des eaux. Dieu dit : que la lumière soit ! Et la lumière fut. Dieu vit que la lumière était bonne. (Genèse).

Évidemment, cela ne s'est pas passé tout à fait ainsi : l'étoile Soleil était là bien avant la planète Terre... Nous allons, nous aussi, discuter de l'intérêt de ces radiations solaires, mais dans le cadre plus limité du potager.

1.1 Qu'est-ce que la lumière ?

La nature de la lumière est duale, pouvant être définie par un modèle d'ondes et un modèle corpusculaire. Nous nous référerons essentiellement au premier : la lumière comme constituée d'ondes électromagnétiques. Au potager, nous nous focaliserons sur le rayonnement ultraviolet[41] (UV, $100 < \lambda < 400$ nm) qui est dommageable aux plantes ; sur le rayonnement photosynthétiquement actif (PAR, $380 < \lambda < 760$ nm), partie visible[42] du spectre lumineux, qui est détaillé dans la Figure 7 ; et sur le rayonnement infrarouge (IR, $760 < \lambda < 1\ 000\ 000$ nm), à relier à la température de l'air, des feuilles, du sol, mais aussi à différentes réactions chez les plantes.

La puissance des radiations, dite irradiance (ou éclairement énergétique), est évaluée[43] par unité de surface, soit en W/m^2 ; elle se

---

[41] La norme ISO 21348 est ici utilisée pour décomposer le rayonnement solaire.

[42] Par les êtres humains, certains insectes sont capables de « voir » également des ultraviolets sur les fleurs des plantes... Un problème vital pour eux.

[43] Il est possible, en utilisant le modèle corpusculaire, de mesurer la puissance en $\mu mol/m^2/s$, unité qui est souvent employée dans les articles scientifiques. Nous utiliserons un coefficient de conversion qui est pour la lumière du soleil de $1\ \mu mol/m^2/s \sim 0.22\ W/m^2$ pour rester cohérent dans notre présentation. Ces valeurs sont tirées de Thimijan, R.W., & Heins, R.D. (1983). Photometric, radiometric, and quantum light units of measure: a review of procedures for interconversion.

mesure à l'aide d'un albédomètre. Il est possible de décomposer cette irradiance en différentes longueurs d'onde avec un spectromètre : l'irradiance PAR nous intéressant plus particulièrement. L'intégrale de la puissance sur une durée donnée est l'irradiation (une énergie en J/m^2). Elle est parfois approximée par le nombre d'heures d'ensoleillement de la journée. Enfin, la durée entre le lever et le coucher du soleil est appelée photopériode.

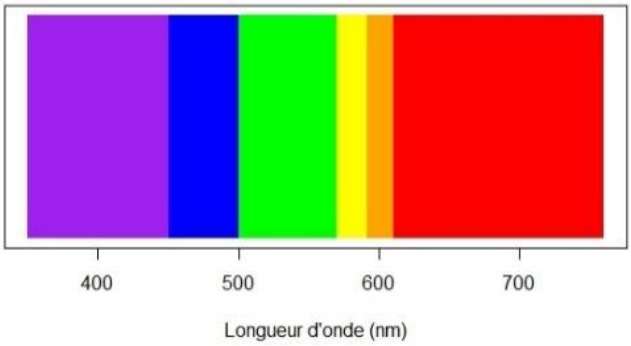


Figure 7 ; Spectre visible de la lumière, longueurs d'onde et couleurs correspondantes.

Dans la section « Ctrl-R », nous verrons qu'il est possible, pour une localisation quelconque, de téléverser des données historiques ou des valeurs théoriques générées par des modèles.

1.2 Bilan radiatif

Comment est utilisée l'énergie solaire par la terre ? Trenberth et al. (2009) nous éclairent à ce sujet avec une estimation du budget énergétique moyen annuel de la planète (basé sur l'irradiance).

Le soleil émet un rayonnement qui parvient, en 500 secondes, à l'atmosphère terrestre avec une puissance de 1361 W/m^2 : c'est ce qu'on appelle la constante solaire. Toutefois, cette lumière incidente sera répartie sur l'ensemble de la (presque) sphère terrestre dont la

---

HortScience, *18*(6), 818-822. On trouvera dans leur tableau 3 la conversion en Lux également pour différents types d'éclairage.

surface est quatre fois plus grande que l'aire d'incidence du rayonnement : c'est pourquoi nous partirons d'une valeur de $1361/4 = 341$ W/m^2.

Ce rayonnement est en partie réfléchi par l'atmosphère (79 W/m^2), en partie absorbé par l'atmosphère (78 W/m^2), le reste étant transmis à la surface terrestre. Là encore, une partie est réfléchie (23 W/m^2), le reliquat (161 W/m^2) constitue ce qui atteint véritablement les océans, les continents et donc les plantes, contribuant à élever leurs températures.

Notons que, même si nous ne considérons ici qu'une moyenne, en réalité la réflexion par l'atmosphère dépend de la couverture nuageuse et la réflexion de la surface terrestre dépend de la couleur de la partie atteinte. Plus cette partie est claire comme la banquise et plus la lumière est réfléchie ; en revanche, plus elle est sombre comme une bâche plastique noire, et plus elle est absorbée. On caractérise ce phénomène par son pourcentage de réflexion, que l'on nomme albédo.

Si on considère la surface terrestre, il ressort une partie du rayonnement sous forme de radiations infrarouges (396 W/m^2) et une partie sous forme thermique : d'un côté la chaleur sensible qui est liée aux mouvements de l'air (et donc du vent) et de l'autre la chaleur latente liée à l'évaporation de l'eau (des océans, en particulier, mais aussi du sol) et à la transpiration des plantes, phénomènes que l'on regroupe sous le terme d'évapotranspiration[44]. Les radiations infrarouges vont en partie aller directement hors de l'atmosphère (40 W/m^2), par ce que l'on appelle la fenêtre atmosphérique ; le reste va être absorbé par l'atmosphère, c'est-à-dire par les nuages et par des gaz à effet de serre.

L'ensemble de l'énergie absorbée par l'atmosphère va, sous forme d'infrarouge, soit retourner vers la Terre (333 W/m^2) et contribuer à élever sa température bien plus que ne le ferait le Soleil à lui seul, soit s'échapper hors de l'atmosphère (169 W/m^2).

---

[44] Ce chapitre est consacré à l'effet direct des radiations solaires, les effets agronomiques indirects sur la température ou l'humidité (cycle de l'eau) seront détaillés dans les deux chapitres suivants.

Nous avons évoqué les aspects quantitatifs de ce bilan, mais il faut savoir qu'il existe également un aspect qualitatif à la lumière, aspect que nous avons simplement souligné en parlant du rayonnement infrarouge. La lumière provenant du Soleil est essentiellement constituée d'ultraviolet (10 %), de lumière visible (50 %) et d'infrarouge (40 %). Le passage dans l'atmosphère a pour effet, très bénéfique pour les êtres vivants, de bloquer la plus grande part des ultraviolets, principalement grâce à sa couche d'ozone. Une partie des infrarouges est également bloquée.

En ce qui concerne la lumière visible, elle passe plus ou moins bien dans l'atmosphère ; ainsi les particules de petite taille diffusent en tous sens les ondes les plus courtes (théorie de Rayleigh), donc le bleu et le violet mais, l'œil humain percevant peu le violet, le ciel nous apparaît bleu. À travers ce filtre bleu-violet, le soleil, bien que blanc, nous paraît jaune. Les nuages étant constitués de corps plus gros, ils ont tendance à diffuser l'ensemble du spectre (théorie de Mie) : ils semblent donc blancs.

> Du côté de chez Stéphane : Ces considérations sur la couleur permettent d'introduire une idée qui me tient à cœur : l'observation humaine (naïve), tellement louée dans certaines approches alternatives du jardinage, peut nous conduire assez loin de la réalité.
>
> Non seulement, comme ici, en ce qui concerne l'infiniment grand, mais aussi l'infiniment petit, et tout autant le comportement des autres espèces.

Pour conclure, il y a quelques enseignements à tirer de tout cela : l'intrication de la lumière et de la température, mais aussi de l'eau et du vent, qui sera une caractéristique du jardinage ; des éléments comme l'albédo ou une couverture, en l'espèce nuageuse, peuvent modifier les conditions de culture : nous pourrons nous en inspirer pour créer des dispositifs afin de bénéficier de microclimats ; le rôle très important des gaz à effet de serre et les problématiques de jardinage à l'heure du changement climatique qui seront largement abordées.

Maintenant, ce bilan radiatif n'est qu'une moyenne. Il convient de mettre en lumière comment jouent sur l'irradiance des facteurs tels la latitude, la saison, l'alternance jour/nuit, l'altitude, la nébulosité, la pollution et l'exposition.

1.3 Facteurs de variation de la lumière

1.3.1 Latitude

L'axe de rotation de la Terre, incliné de 23° par rapport à l'écliptique, fait que l'énergie solaire est plus concentrée à l'équateur - ou aux tropiques selon la saison - et qu'ayant à ces latitudes moins d'atmosphère à traverser, elle y subit moins de réflexion et d'absorption (Figure 8). L'irradiance dépend donc de la latitude.

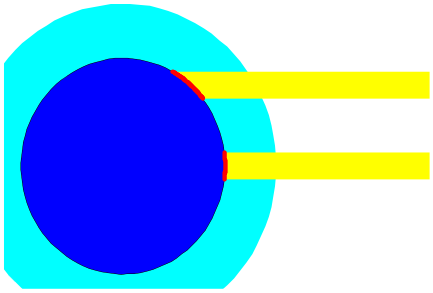


Figure 8 : Radiations solaires (en jaune) à l'équateur et à des latitudes plus élevées (terre en bleu foncé). La surface atteinte par le même rayonnement (trait rouge) est plus petite à l'équateur, ainsi que la distance traversée dans l'atmosphère (en bleu clair).

Le fait qu'il y ait plus de soleil dans le sud, à Marseille (1685 kWh/m^2 en 2020), que dans le nord, à Lille (1220 kWh/m^2 en 2020), a pour conséquence d'y autoriser la culture de légumes plus frileux, ceux qui servent à préparer une ratatouille par exemple, de modifier le calendrier de semis, et de raccourcir le nombre de jours avant la récolte.

1.3.2 Saisonnalité

Selon la période de l'année, et donc la position de la Terre dans sa révolution autour du Soleil[45], son obliquité entraîne qu'une localisation donnée sera plus ou moins exposée ; cet effet est d'autant plus marqué que l'on s'approche des pôles. Par conséquent, l'irradiance, la photopériode et la « hauteur » du soleil vont changer selon les saisons.

La Figure 9 montre l'irradiance, place Bellecour[46] à Lyon, sur une journée moyenne pour chacun des mois de l'année. On repère les variations de photopériode (la largeur de la base) et de l'irradiance (la hauteur), qui se combinent afin de représenter l'irradiation comme étant la surface en bleu. L'énergie solaire augmente considérablement à partir de mars jusqu'en octobre, on parle de saison poussante.

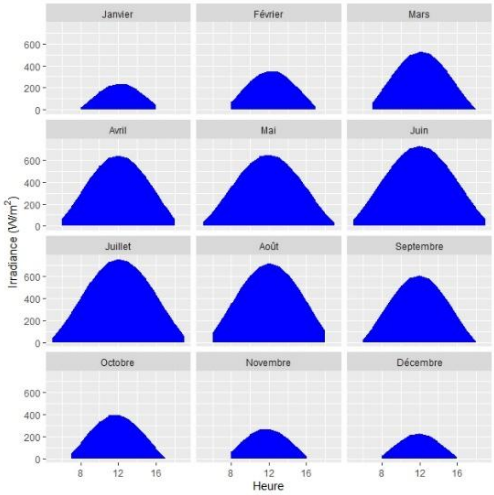


Figure 9 : Irradiance (sur la période 2010-2020) d'une journée moyenne pour chacun des mois de l'année dans la ville de Lyon

[45] Un petit détail est que le soleil n'est pas exactement au centre de l'ellipse orbitale, cela a pour conséquence que les hivers sont un peu plus chauds dans l'hémisphère nord que dans l'hémisphère sud.

[46] Bellecour vient du latin *bella curtis*, le beau jardin, ce que la place était effectivement au moyen-âge. C'est donc un lieu idéal pour installer un potager !

1.3.3 Nuit/Jour

Comme le pendule de Foucault le prouve, la terre est en rotation, ce qui a pour conséquence l'alternance jour/nuit, alternance qui varie en fonction de la saison et de la latitude. La Figure 10 compare la photopériode au cours de l'année à Lille et Marseille. Il est clair que les latitudes élevées subissent une variation plus importante, de l'ordre d'une heure de soleil de plus par jour en été et d'une de moins en hiver à l'échelle de la France métropolitaine. Ceci fait qu'en été l'irradiation journalière n'est pas si différente entre le nord et le sud, car la photopériode plus longue y compense l'irradiance plus faible ; alors qu'elle l'est nettement en hiver, où les deux jouent dans le même sens.

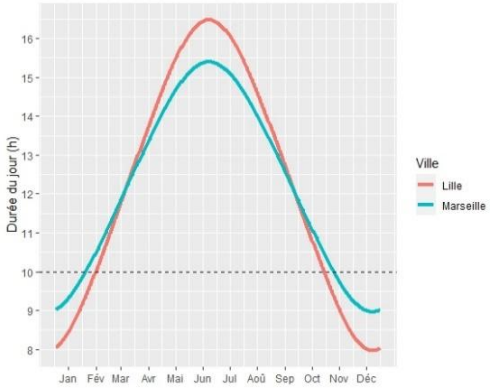


Figure 10 : Durées du jour (photopériode) tout au long de l'année pour deux villes françaises situées à des latitudes bien différentes (50.6° contre 43.3°). La "limite des dix heures" est indiquée par un trait horizontal.

Il est souvent rapporté que la pousse des légumes est terminée en deçà d'une dizaine d'heures d'éclairement par jour. C'est un peu exagéré, comme le montrent plusieurs ouvrages consacrés au potager hivernal : elle est plutôt ralentie[47]. Selon les légumes et leur zéro de végétation (voir plus loin le chapitre sur la température), de petites

[47] Dans l'article de Nieuwhof (1976), des radis semés le 09/10 voient le poids de leurs feuilles multiplié par cinq environ entre le 04/11 (9.5 heures d'éclairement naturel) et le 30/12 (7.8 heures d'éclairement naturel) à Wegeninguen (Hollande, latitude = 52°) ; il est vrai dans une serre à 10 °C (autre paramètre crucial).

élévations de température, obtenues par exemple sous un voile de croissance, peuvent en partie pallier le manque de lumière.

1.3.4 Altitude

Dans une série d'études, Blumthaler et al. (1997) se penchent sur l'effet d'altitude (AE) qui est calculé comme le pourcentage d'augmentation des radiations observées pour mille mètres de différence d'élévation.

En se basant sur l'irradiation journalière, ils obtiennent AE = 8 % pour l'irradiation totale ; car plus on est bas, plus la couche d'atmosphère à traverser est épaisse et, par conséquent, plus la lumière y est réfléchie, absorbée ou diffusée. Mais ils trouvent AE = 18 % pour les UVB qui sont dommageables aux êtres vivants ; une différence due à la présence d'ozone troposphérique et d'aérosols dans cette couche supplémentaire à traverser, filtrant plus les ondes électromagnétiques courtes. L'effet d'altitude est renforcé de 2-5 % en hiver par rapport à l'été.

Ces observations ne sont valables qu'en situation de ciel dégagé, la nébulosité l'emportant sur l'effet d'altitude, et rendant les résultats plus variables. De même, les albédos sont considérés comme comparables entre la vallée et la montagne ; la présence de neige, plus fréquente en altitude, modifiant fortement la situation.

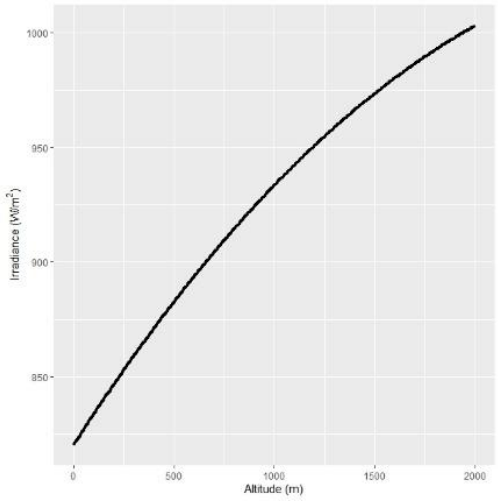


Figure 11 : Effet de l'altitude de 0 à 2000 m pour la position de Lyon (ce ne sont pas des données observées, mais une modélisation théorique : *cf.* Seyednasrollah et al., 2013).

La Figure 11 est une modélisation (Seyednasrollah et al., 2013) montrant, toute chose égale par ailleurs, l'effet sur l'irradiance d'une élévation supplémentaire (théorique à la même localisation), par rapport à la situation de la place Bellecour située à 167 mètres au-dessus du niveau de la mer. On retrouve là aussi AE ~ 10 %.

Les plantes d'altitude ont développé des dispositifs spécifiques (poils, couleurs plus réfléchissantes...) pour résister à ces radiations plus importantes.

1.3.5 Exposition

Tous les terrains ne sont pas plats, et des travaux de terrassement sont parfois entrepris pour y remédier. Toutefois, une légère pente, bien orientée, peut présenter quelques avantages à nos latitudes (Evan & Winterhalder, 2000).

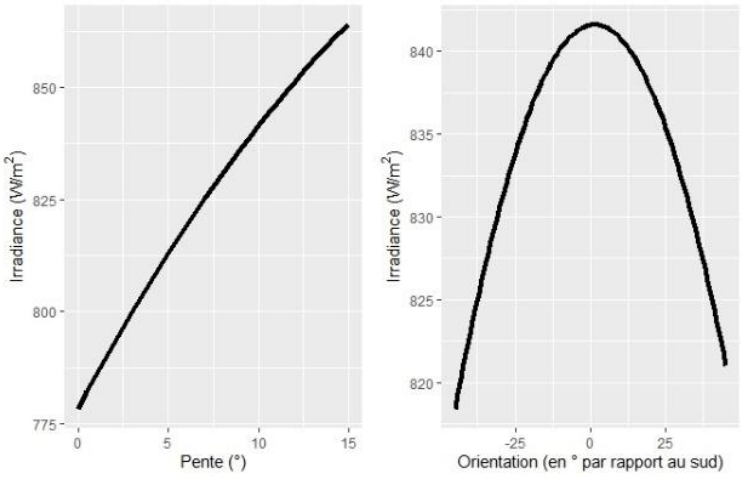


Figure 12 : Modélisation des effets de la pente (à gauche, orientation plein sud) et de l'orientation (à droite pour une pente de 10°) sur l'irradiance (ce ne sont pas des données observées, mais une modélisation théorique : *cf.* Seyednasrollah et al., 2013).

Concernant l'irradiance, la Figure 12 montre l'effet que peut avoir la pente pour une surface orientée plein sud (à gauche), et l'effet que peut avoir l'orientation pour une pente donnée de 10° (à droite), place

Bellecour, le 1er mai à midi[48]. L'idée, comme avec les panneaux solaires, est de rechercher une orientation la plus perpendiculaire possible par rapport aux radiations. Si la lecture de ces courbes vous fait perdre le nord, trouvez simplement le sud pour votre potager.

1.3.6 Qualité de l'air

Deux tiers de la surface des continents sont, en moyenne, couverts par les nuages ; or, la nébulosité réduit l'irradiance au sol. Cette réduction peut dépasser 75 % entre un ciel couvert et un ciel dégagé, comme le montre la différence entre les courbes bleu et rose de la Figure 13. Cette dernière indique aussi qu'une journée dégagée d'hiver peut apporter plus d'irradiance qu'une journée couverte d'été, mais moins longtemps, il est vrai. Ce fort effet de la nébulosité explique qu'à une même latitude, des zones plus couramment couvertes par les nuages vont recevoir moins de radiations.

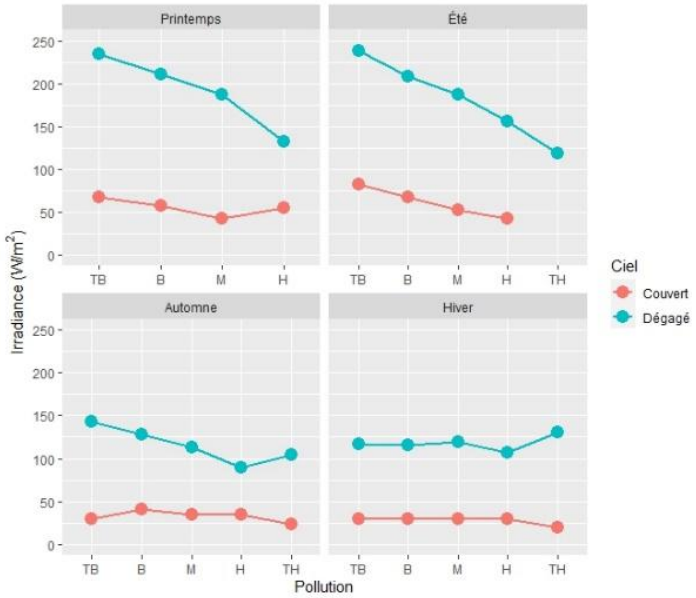


Figure 13 : Influence sur l'irradiance (partie visible du spectre) de la saison, de la nébulosité (ciel couvert ou dégagé) et du niveau de pollution (de très bas = TB à très haut = TH) à Ostrava (République Tchèque, *cf.* Musiolková et al., 2021).

[48] Notons que s'il était 15:00, le graphique serait dissymétrique, avec la plus forte puissance pour une orientation vers l'ouest.

La pollution, que ce soit par les aérosols comme les particules fines PM10 ou par les gaz comme le dioxyde de sulfure ou les oxydes d'azote, a également une influence. Dans des observations réalisées en République Tchèque près d'Ostrava, une importante ville industrielle, Musiolková et al. (2021) montrent qu'il y a également une réduction de l'irradiance avec le niveau de pollution, particulièrement au printemps et en été.

Notons que nébulosité et pollution modifient également le rapport entre la lumière diffuse et la lumière directe, et aussi, dans une moindre mesure, la composition spectrale de la lumière.

1.3.7 Écrans

Élément naturel ou artefact, l'écran s'interpose entre le soleil et la plante. Premièrement, le cas de la plante couverte : il peut s'agir d'une sorte de voile servant à modifier le microclimat. Ce voile est caractérisé par son facteur de transmission de la lumière (85 % pour un voile de croissance neuf, 50-70 % pour un voile d'ombrage). Même avec une couverture à 0 % de transmission au-dessus de la plante en été, il restera de la lumière diffuse pouvant l'atteindre par les côtés.

Deuxièmement, dans un système de culture étagé, les végétaux de plus grande taille vont filtrer la lumière, à la fois en qualité, mais surtout en quantité. Sous une canopée, la lumière chute *exponentiellement* selon l'équation de Beer-Lambert :

$$I = I_0 \times \exp(-k \times LAI)$$

avec I_0 l'irradiance au sommet de la canopée, k un coefficient d'extinction de la lumière (entre 0.4 et 0.7 pour le maïs au stade de floraison par exemple, *cf.* Lacasa et al., 2021 ; ce coefficient dépendant de la forme des feuilles, *cf.* Monsi & Saeki, 2005 ; mais aussi de la configuration d'implantation, par exemple l'espacement des rangs, *cf.* Flénet et al., 1996) et LAI (*leaf area index*, en m^2/m^2) est la surface que recouvrent au sol les feuilles situées entre le haut de la canopée et la hauteur considérée. Sous nos latitudes, l'irradiance au sommet I_0 est assez faible par rapport aux zones tropicales : dès lors, il faut sans doute régler correctement l'espacement des cultures et le type de

plantes à l'étage supérieur pour avoir une irradiance raisonnable aux étages inférieurs.

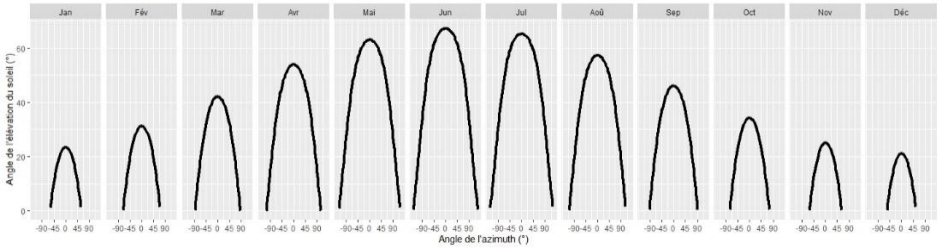


Figure 14 : Hauteur et azimut du soleil sur la ville de Lyon selon les mois de l'année.

Troisièmement, l'écran peut être vertical, comme un bâtiment ou une haie, et avoir une ombre portée sur le potager. La Figure 14 montre que la hauteur du soleil varie énormément au cours de l'année.

Cela entraîne que les ombres portées vont être très différentes, par exemple entre le 8 décembre (fête des Lumières à Lyon) et le 21 juin, comme l'indique la Figure 15. En hiver, le moindre obstacle à la lumière, qui est de surcroît plus faible et dure moins longtemps, sera très préjudiciable. Il faut donc prévoir une bonne distance pour implanter des cultures d'hiver au nord d'une haie, d'un mur ou d'un arbre. En revanche, en été, un effet d'ombre pendant une partie de la journée peut être intéressant pour certains légumes tolérant moins la chaleur (laitue, par exemple).

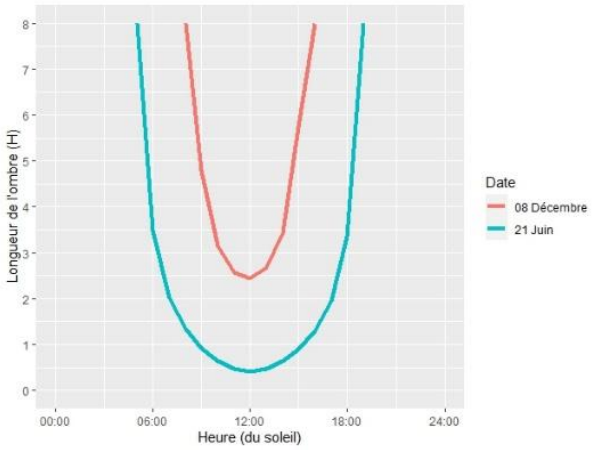


Figure 15 : Comparaison de la longueur de l'ombre (en unité de hauteur de l'écran) selon l'heure de la journée en hiver et en été.

1.4 Réponse des plantes à la lumière

La lumière est à l'origine du processus fondamental de croissance et de développement des végétaux : la photosynthèse. Mais elle sert aussi de signal concernant des informations spatio-temporelles importantes provenant de leur environnement, ce qui induit des réactions adaptées ou des modifications de forme : germination, évitement de l'ombre, floraison ; on parle de photomorphogénèse.

1.4.1 Photosynthèse

Les êtres vivants sont distingués en autotrophes, ceux qui sont capables de se nourrir eux-mêmes à partir de matière minérale, et hétérotrophes, ceux qui se nourrissent à partir de matière organique. Au départ de la chaîne trophique, se trouvent les végétaux.

Ces derniers parviennent à s'alimenter grâce à un mécanisme biologique appelé photosynthèse qui produit des sucres (glucose, saccharose, amidon), à la fois source d'énergie et matériau fondamental de construction de la plante (cellulose, hémicellulose et lignine). Nous allons ici relativement détailler ce mécanisme, car cela nous permettra de mieux comprendre comment le favoriser ensuite.

La cellule végétale comprend des organites spécifiques, les chloroplastes, qui renferment au sein d'une (double) membrane deux parties essentielles : les thylakoïdes, où se déroule la première phase dite claire de la photosynthèse, et le stroma, lieu de la seconde phase dite obscure.

Phase claire de la photosynthèse

La phase claire commence par l'oxydation de l'eau. Cette réaction chimique se produit, entre autres, grâce à des ions manganèse et permet de générer des protons, des électrons donc de l'énergie électrique, et un déchet intéressant : le dioxygène.

$$2H_2O \text{ -> } 4H^+ + 4e^- + O_2$$

Ces électrons sont récupérés par le photosystème II. On y distingue un complexe antennaire constitué de différents types de pigments (chlorophylle *a* et *b*, mais aussi carotène et xanthophylle) et un centre réactionnel composé de deux pigments de chlorophylle *a* nommés P680.

L'énergie photonique récoltée par l'antenne excite P680 (P680+hν -> P680*) et fait sortir un électron énergisé (P680* -> $P680^+ + e^-$) qui va rejoindre une première chaîne d'accepteurs d'électrons. Pour que le pigment revienne à son état stable, il faut qu'il se procure un électron, qui va lui venir... de l'oxydation de l'eau ($P680^+ + e^-$ -> P680).

Les électrons énergisés sont transférés via diverses molécules et, au passage, pompent des protons à l'extérieur dans le stroma. Ils parviennent au complexe du cytochrome, où ces protons sont libérés dans les thylakoïdes. Par une protéine (contenant un peu de cuivre), ils sont conduits au photosystème I. Ce dernier est similaire au photosystème II, mais son centre réactionnel est formé de deux pigments de chlorophylle P700. Là aussi, les électrons viennent remplacer des électrons excités de P700, qui entrent dans une seconde chaîne d'accepteurs d'électrons. Y sont présentes des protéines contenant du fer et du soufre, qui permettent en fin de chaîne une réduction de la coenzyme $NADP^+$:

$$NADP^+ + 2e^- + H^+ \text{ -> } NADPH$$

D'autre part, de nombreux protons sont apparus dans les thylakoïdes lors de l'oxydation de l'eau ou du pompage sur la première chaîne de transport, ce qui crée un gradient permettant la photophosphorylation acyclique productrice d'ATP. Une photophosphorylation cyclique se déroule parallèlement, basée uniquement sur P700, permettant de produire de l'ATP supplémentaire :

$$ADP + P_i \text{ -> } ATP.$$

À ce moment, la phase claire de la photosynthèse est finie : elle a permis de *transformer l'énergie radiative en énergie chimique* (NADPH et ATP). Nous entrons dans la phase obscure qui se déroule dans le stroma.

Phase obscure de la photosynthèse

Cette phase, dite du cycle de Calvin ou de la caverne de Platon, comprend trois parties : une fixation de carbone sur un métabolite (RuBP), une réduction et une régénération du RuBP.

Dans la première partie, le RuBP fixe du dioxyde de carbone grâce à une enzyme très importante, et extrêmement répandue : le Rubisco. On obtient alors une molécule à trois carbones (PGA), c'est pourquoi on parle de photosynthèse de type C3 :

$$3RuBP + 3CO_2 \text{ -> } 6PGA.$$

Dans la deuxième partie, les sources chimiques d'énergie issues de la phase claire sont employées pour réduire le PGA et produire une forme phosphatée (PGAL) du triose $C_3H_6O_3$:

$$6PGA + 6ATP + 6NADPH + 6H^+ \text{ -> } 6PGAL + 6ADP + 6NADH^+$$

La troisième partie permet de régénérer le RuBP à partir de cinq molécules de PGAL, en utilisant à nouveau un peu d'énergie chimique :

$$5PGAL + 3ATP \text{ -> } 3RuBP + 3ADP \text{ et } 1PGAL.$$

Il se libère par conséquent une molécule de PGAL qui va permettre de former les sucres finaux $C_6H_{12}O_6$.

1.4.2 Faciliter la photosynthèse

La photosynthèse peut se résumer à une lumineuse formule :

$$6H_2O + \text{Photons} + 6CO_2 \text{ -> } C_6H_{12}O_6 + 6O_2.$$

Trois éléments sont donc à la base de son bon déroulement : la lumière, l'eau et le dioxyde de carbone. Toutefois, le long développement précédent n'a pas été inutile : car il permet de prendre conscience que sont apparus, au cours des différentes étapes, d'autres éléments tels que l'azote, le phosphore, le manganèse... Enfin, de façon générale, les réactions biochimiques se passent plus ou moins bien selon la température, ce que nous allons également prendre en considération.

Lumière et photosynthèse

Le premier élément indispensable est la lumière. On montre, en l'absence d'autres facteurs limitants, que la relation entre l'irradiance (I) et la photosynthèse nette (Pn), décrite dans la Figure 16, est correctement modélisée par l'équation de Mitscherlich :

$$P_n(I) = P_M \times (1\text{-}\exp(\text{-}k \times (I\text{-}I_0))$$

avec pour paramètres P_M la photosynthèse maximale possible, I_0 l'irradiance où $Pn(I_0)=0$ et k un indicateur de productivité au point I_0.

À partir de ces paramètres, se calculent pour chaque légume, cinq renseignements importants concernant sa photosynthèse.

La capacité maximum de photosynthèse P_M qui, ici, différencie très clairement l'amaranthe des trois autres légumes. Il se trouve que l'amaranthe utilise un autre type de photosynthèse, dit C4, qui permet des performances bien meilleures en condition de grand éclairement.

Le point de compensation de la lumière (LCP), qui est la valeur (I_0) en deçà de laquelle la photosynthèse devient négative. Comment est-ce possible ? En fait, les plantes ne font pas que consommer du dioxyde de carbone par la photosynthèse, elles en produisent aussi car elles respirent. Avec une faible luminosité, en particulier la nuit, la respiration prend le pas sur la photosynthèse. Le LCP indique l'éclairage minimum pour que cette espèce pousse. Si nous avons le choix entre différentes conditions de luminosité, par exemple avec des zones plus ou moins éclairées, il faut préférer les espèces avec un LCP bas, ici la bette et le chou kale plutôt que l'épinard : dans les zones plus sombres, elles parviendront mieux à pousser.

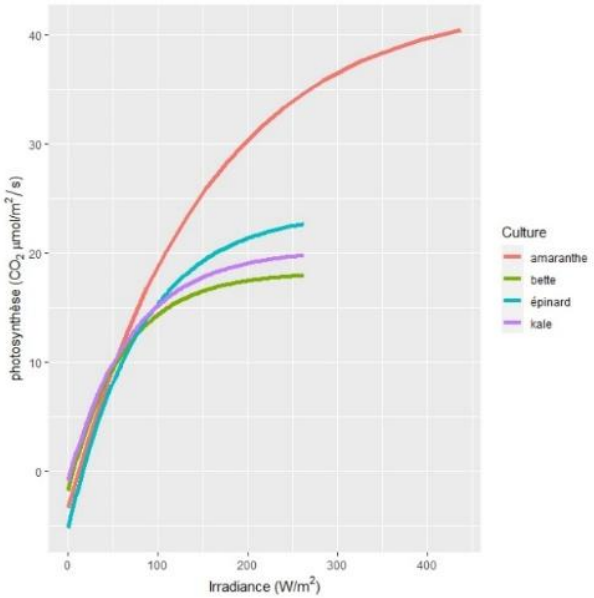


Figure 16 : Photosynthèse nette selon l'irradiance pour quatre légumes.

Le point de saturation de la lumière (LSP), où la photosynthèse atteint 95 % de sa capacité maximale. C'est un point au-delà duquel une irradiance supplémentaire n'apporte plus grand-chose.

La respiration noire (Rd) correspond au cas où l'irradiance est nulle (la nuit) et donc uniquement à l'activité respiratoire de la plante. Cette quantité est intéressante, car elle est reliée négativement à la capacité de conservation une fois la récolte effectuée : une plante avec une forte activité respiratoire se conservera moins longtemps.

Enfin, le gain net en carbone (NCG) est une sorte de bilan d'irradiation sur la journée, où on suppose que, pendant la durée du jour (d en heures), nous gagnons la capacité maximale de photosynthèse ; et la nuit nous perdons la respiration noire, soit NCG=d×PM+(24-d) ×Rd.

Le Tableau 1 donne ces informations pour les quatre espèces observées et permet de déterminer des stratégies adaptées vis-à-vis de la lumière. L'idéal serait bien sûr d'avoir systématiquement ces données[49] pour l'ensemble des légumes du potager.

Tableau 1 : Comparaison pour quatre légumes des informations concernant leur capacité de photosynthèse (à une température donnée).

Espèces	Pmax	LCP	LSP	Rd	NCG	°C
Amaranthe	43,3	11,3	477,9	-3,3	480,0	35
Bette	18,2	5,5	187,5	-1,7	197,8	24
Chou Kale	20,3	2,8	214,3	-0,8	233,6	24
Epinard	23,8	16,0	258,7	-5,2	223,4	24

Attention, ces réponses photosynthétiques à l'irradiance ne sont valables que pour une température donnée (en ce sens, les informations concernant l'amaranthe ne sont pas directement comparables), pour une humidité donnée, et pour une teneur en dioxyde de carbone donnée.

[49] On trouve, chez certains fabricants de solutions d'éclairage artificiel, de tels tableaux... mais je préférerais une revue systématique de la littérature scientifique que je n'ai pas eu le temps de faire.

Concernant cette dernière, ce n'est normalement pas un facteur limitant... *grâce* au réchauffement climatique. Cependant, dans une serre en hiver peu ventilée, cela peut le devenir.

Température et photosynthèse

La photosynthèse des plantes est fortement influencée par la température (Berry & Bjorkman, 1980) ; elle l'est d'autant plus que l'irradiance est élevée. La Figure 17 montre que la photosynthèse, comme bien d'autres réponses métaboliques, augmente avec la température jusqu'à un optimum, puis connaît ensuite une chute. Pour la plupart des plantes, la zone de photosynthèse normale varie de 10 °C à 35 °C. Au-delà, malgré la mise en place de processus d'endurcissement, il se peut que les dommages deviennent irréversibles au système même de la photosynthèse.

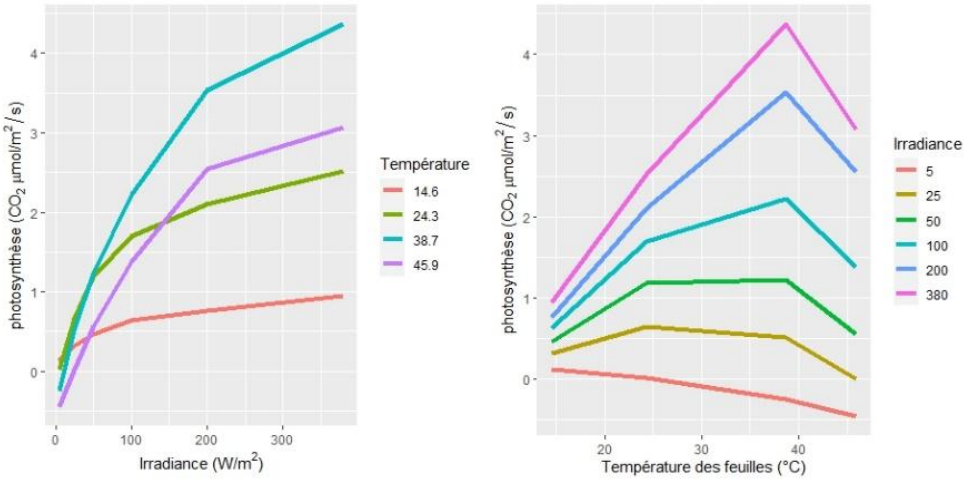


Figure 17 : À gauche, modification de la courbe de réponse à l'irradiance de la photosynthèse selon différentes températures. À droite, relation entre photosynthèse et température pour différents niveaux d'irradiance. La plante considérée est l'herbe à éléphant (*Cenchrus purpureus*) ; données tirées de Ludlow et Wilson[50] (1970).

Les espèces provenant de régions chaudes ont tendance à être plus efficaces à hautes températures, et à avoir une température optimum

[50] Ludlow, M. M., & Wilson, G. L. (1971). Photosynthesis of tropical pasture plants I. Illuminance, carbon dioxide concentration, leaf temperature, and leaf-air vapour pressure difference. *Australian Journal of Biological Sciences*, *24*(3), 449-470.

de photosynthèse plus élevée ; elles sont, en revanche, moins performantes à faible température. C'est le contraire pour les espèces provenant de régions au climat plus frais. Il existe cependant une plasticité phénotypique, et une même espèce peut, selon les conditions, voir son optimum de température déplacé afin de s'acclimater.

Dans cette cuisine photosynthétique, comment sont concoctés les échanges gazeux ? À la sauce stomate ! Les stomates sont des ouvertures de la feuille, qui contrôlent (par l'intermédiaire du potassium) les sorties d'eau et de dioxygène, et les entrées de dioxyde de carbone.

Les stomates exercent un effet sur le taux de photosynthèse et sa dépendance à la température. Cette dernière est elle-même sous l'influence de l'humidité extérieure et du statut hydrique de la plante (eux-mêmes dépendant de la température). Lorsque les stomates se ferment, le taux de dioxyde de carbone baisse par rapport au taux de dioxygène, et se produit un phénomène appelé photorespiration. Ce n'est plus du dioxyde de carbone qui est fixé dans le cycle de Calvin, mais du dioxygène : la photosynthèse diminue donc.

Toutefois, certaines plantes ont un autre mode de photosynthèse que le classique C3 : les plantes en C4 (*cf.* l'amaranthe de la Figure 16) et les plantes CAM[51]. Elles sont capables de très forts taux de photosynthèse lorsque la température s'élève et de repousser l'optimum de température.

Eau et photosynthèse

L'oxydation de l'eau est la base de la photosynthèse, mais seuls 1-2 % de l'eau passant par la plante servent à sa croissance ! L'essentiel part en fait en transpiration. La fermeture des stomates est la cause principale de la réduction de photosynthèse en cas de stress hydrique (Reddy et al., 2004). Cette fermeture se produit pour trois raisons. Primo, lorsque l'air extérieur est sec, on parle de déficit de pression de vapeur, et plus particulièrement sec par rapport aux feuilles : alors le taux de transpiration devient intense. Au-delà d'un seuil, cela conduit à la fermeture des stomates. Secundo, des signaux sont envoyés par les

[51] Pour *Crassulacean Acid Metabolism*.

racines lorsque l'eau vient à manquer dans le sol. Tertio, la faible présence de l'eau dans la feuille *per se* a un rôle, mais à un tel niveau de déficit (30 %) que les deux autres déclencheurs sont généralement déjà actionnés.

Une cause secondaire de réduction de la photosynthèse en cas de stress hydrique est que le métabolisme de la plante en est affecté : activité de Rubisco, régénération de RuBP, phosphorylation, synthèse de l'ATP et celles des sucres finaux.

Macronutriments et photosynthèse

En termes de masse sèche, une plante est composée à 95 % de carbone, d'oxygène et d'hydrogène, qui viennent de l'eau et du dioxyde de carbone. Toutefois, nous avons vu que l'azote est nécessaire lors de la photosynthèse, dans l'omniprésent Rubisco, mais aussi dans toutes les protéines en jeu. De même, le phosphore intervient dans l'ATP, la NADPH, le RuBP... Nous avons également vu passer le potassium, le magnésium, le manganèse, le fer, le cuivre, le soufre. Bref, un ensemble d'éléments minéraux que la plante se procure par ses racines. La nutrition de la plante, et donc les ressources disponibles dans le sol, sont un autre facteur limitant de la photosynthèse.

Tableau 2 : Principaux éléments nutritionnels tirés du sol, intervenant dans la photosynthèse, et leur "lieu d'intervention"

	N	**P**	**Mg**	**Mn**	**Fe**	**S**	**Cu**	**K**	**Cl**	**Ca**
Chlorophylle	×		×							
Photolyse de l'eau	×			×						
Accepteurs d'électrons	×				×	×	×			
ATP	×	×								
NADPH	×	×								
RuBP		×								
Rubisco	×	×	×							
Stomates								×	×	×

1.4.3 Réponse à la quantité de lumière

On a l'impression que les végétaux restent plantés là ! Mais ils s'adaptent en fait à leur environnement et, pour ce faire, la lumière est non seulement une source d'énergie, mais aussi une source d'informations précieuses. Grâce à des photorécepteurs, les plantes vont savoir quelle est la quantité de lumière incidente, et également sa

qualité, sa direction et sa durée. Une série de réactions régulant croissance et développement vont alors pouvoir être déclenchées.

La plante qui germe à l'obscurité, généralement dans le sol, présente une tige allongée, de petites feuilles repliées et une couleur blanchâtre. C'est une phase normale, dite d'étiolement. Lorsqu'elle émerge à la lumière, une phase de dé-étiolement s'enclenche : la tige ralentit sa croissance, les feuilles se déploient, la photosynthèse commence, et la plantule devient verte. Il arrive toutefois, dans des conditions de faible éclairement, que la plantule continue cette croissance exagérée de la tige, en développant de petites feuilles peu colorées, jusqu'à parfois conduire à son dépérissement.

Des techniques d'étiolement forcé ou blanchiment sont aussi employées au potager, en couvrant certains légumes comme les chicorées ou les cardons, afin de réduire leur amertume ; ou en les faisant carrément pousser dans l'obscurité, comme c'est le cas avec les endives ou les asperges. On butte les poireaux pour obtenir de longs fûts blancs, ainsi que les pommes de terre pour leur éviter de verdir et de devenir toxiques.

L'alternance du jour et de la nuit est aussi détectée par les plantes, qui réagissent parfois en repliant leurs feuilles (haricot) ou leurs fleurs (pissenlit) pendant la nuit, c'est la nyctinastie, qui fait partie des nombreux rythmes circadiens connus chez les végétaux.

1.4.4 Réponse à la qualité de la lumière

Sans même parler de leur quantité, toutes les lumières ne se valent pas. La qualité de la lumière est liée à sa composition spectrale[52]. Ainsi, nous avons présenté la photosynthèse comme causée par la lumière synthétiquement active (PAR) mais, en réalité, ce sont les bandes de longueur d'ondes rouge (600–700 nm) et bleu (400–500 nm) de la

[52] Les informations lumineuses sont détectées par les végétaux grâce à divers photorécepteurs : phytochromes, cryptochromes et phototropines. Les plus importants sont les phytochromes qui détectent les bandes rouge et rouge lointain. Les cryptochrome, sensibles aux UV et à la lumière bleue, sont en particulier responsables de l'ouverture des stomates le jour.

lumière qui sont en jeu. La lumière verte (500–600 nm) ne servirait-elle alors à rien ? Folta et Maruhnich (2007) montrent qu'elle sert en fait à lutter contre les deux autres bandes de longueur d'onde : elle ralentit l'ouverture des stomates et la croissance de la plante. On peut donc étrangement rajouter de la lumière (verte), et constater que la plante pousse moins ! Cela permet sans doute d'obtenir une croissance plus équilibrée ; ou bien de signaler à la plante que les conditions ne sont pas favorables, et qu'il est urgent d'attendre.

Les plantes parviennent également à détecter l'ombre causée par d'autres plantes. Non seulement, comme pour toute ombre, la quantité de lumière est réduite, mais elle est aussi moins chargée en rouge et en bleu, et proportionnellement plus en rouge lointain (700–800 nm) et, dans une moindre mesure, en vert. Cette information peut alors engendrer deux stratégies écologiques pour faire face à ce problème. Les plantes de soleil (*shade avoider*) vont entrer en compétition pour le soleil, avec des réactions connues sous le nom de syndrome d'évitement de l'ombre : poussée de la tige, des pétioles, feuilles dirigées vers le haut, limitation des ramifications... Si la plante ne gagne pas la compétition vers le haut de la canopée, elle peut aussi fleurir plus rapidement, pour au moins assurer sa descendance (Franklin, 2008). Les plantes d'ombre (*shade tolerant*) vont, elles, développer la surface de leurs feuilles, améliorer leur rendement photosynthétique en basse irradiance, et aussi augmenter leurs défenses contre les herbivores[53] (Gommers et al, 2013).

Au-delà des différences interspécifiques, il existe une forte variabilité intraspécifique dans la tolérance à l'ombre. Dans des systèmes de haute densité de culture ou de culture étagée, des plantes tolérantes à l'ombre présentent l'intérêt de ne pas gaspiller leur énergie dans une lutte sans issue, et d'optimiser leur photosynthèse. On peut donc chercher des cultivars, par exemple de tomates (Chozin et al., 2016), adaptés à de tels systèmes productifs.

Les graines sont souvent dormantes, afin de pouvoir attendre un moment favorable pour germer. Beaucoup de petites graines sont photodormantes : elles utilisent la lumière comme signal, car cela leur

[53] Car leurs larges feuilles sont tentantes...

indique qu'elles sont proches de la surface, ce qui est indispensable au vu de leurs faibles réserves, ne permettant qu'une courte croissance autonome. Chez ces espèces, la lumière rouge favorise la germination et le rouge lointain l'inhibe. L'article de Geneve (1998) indique que les genres botaniques *Amaranthus* (les amaranthes), *Lactuca* (laitue), *Apium* (céleri, mais aussi coriandre, aneth), *Daucus* (carotte) et *Portulaca* (pourpier) sont concernés au potager. Inversement, *Allium* (poireau et oignon) et les cucurbitacées (Thanos & Mitrakos, 1992 ; Nerson, 2007) nécessitent de l'obscurité. Cela est, bien entendu, à mettre en relation avec la profondeur à privilégier pour les semis.

Les UV-C et la plupart des UV-B sont heureusement bloqués par la couche d'ozone stratosphérique. Les UV parvenant aux plantes causent d'abord des dommages à leur ADN (Lambers et al., 2008) et baissent leur productivité.

1.4.5 Réponse à la direction de la lumière

Les plantes s'orientent vers la lumière, c'est le phototropisme. Elles modifient leur forme par le truchement d'une hormone de croissance : l'auxine, qui augmente du côté opposé à la lumière. C'est la lumière bleue qui déclenche ce phénomène, que l'on observe souvent chez des plantules exposées derrière une fenêtre.

Les feuilles et fleurs peuvent changer d'orientation en fonction de la position du soleil pendant la journée, en cherchant soit à être perpendiculaires soit à être parallèles à ses rayons : on parle d'héliotropisme. On trouve ces plantes dans les familles botaniques des astéracées (tournesol), des fabacées (soja) et des malvacées (Mauve de Mauritanie[54]). Un gain d'interception des radiations de 30 à 40 % est observé chez ces plantes héliotropiques, ce qui explique leur productivité (Ehleringer & Forseth, 1980).

1.4.6 Réponse à la durée de la lumière

La durée du jour intervient également comme un signal pour certaines plantes, en leur indiquant que la saison est propice à la

[54] À feuilles comestibles et très jolies fleurs !

reproduction. On distingue des plantes de jours courts, qui fleurissent en deçà d'un certain seuil de photopériode ; les plantes de jours longs, qui fleurissent, au contraire, au-delà d'un certain seuil ; et les plantes indifférentes.

Plus précisément, ce qui semble compter le plus, ce n'est pas la durée du jour, mais celle de la nuit... Ce phénomène est utilisé en horticulture pour maîtriser la floraison des chrysanthèmes, afin qu'ils soient prêts à la Toussaint. Il suffit d'un petit éclairage pendant la nuit qui la raccourcit (et donne l'impression d'un soleil levant comme si le jour était plus long). Au potager, nous allons principalement être concernés par l'épinard qui est une plante de jours longs, et s'il est installé un peu tard au printemps, a une montaison prématurée obligatoire dès que la durée du jour dépasse 12.5 à 15 heures (selon les cultivars). D'autres légumes, la durée du jour s'allongeant, ont une montaison facultative, passant souvent par la température (Wiebe, 1999) : la laitue, la chicorée, la betterave, le radis, la carotte, le chou chinois, le poireau, l'oignon et l'artichaut (mais, pour ce dernier, cela nous intéresse). Inversement, le soja (et le maïs) est une plante de jours courts, et il faut choisir les cultivars, qui ont été activement sélectionnés, pour avoir des fruits au plus vite. Enfin, la photopériode ne joue pas que sur la floraison, elle intervient également dans la formation des organes de réserve, comme chez la pomme de terre où les tubercules sont initiés en jours courts, alors que chez l'oignon, les bulbes le sont en jours longs.

1.5 Gestion de la lumière

La lumière va être gérée de façon différente selon la saison. Nous allons distinguer : le printemps et l'automne, où elle est généralement satisfaisante ; la saison d'hiver, où elle est insuffisante ; enfin, la saison d'été, où elle est parfois trop importante.

1.5.1 La quantité de lumière est satisfaisante

L'emplacement du potager doit être choisi en privilégiant les pentes bien exposées et en limitant les écrans au sud du potager : mur, haie, arbre...

La productivité d'une culture est fonction de la lumière qu'elle va pouvoir intercepter. Or, cette aptitude dépend de la capacité de photosynthèse de la plante, de son architecture (hauteur, mais aussi emplacement et orientation de ses feuilles) et de la surface qu'occupent les feuilles par rapport à celle du sol : le LAI[55] (Campillo et al., 2012).

L'implantation des cultures doit, par conséquent, être pensée pour privilégier une forte densité maximisant le LAI[56] : l'objectif étant de parvenir à une canopée couvrant le sol à maturité, tout en se méfiant des étagements, facteurs d'ombre (*cf.* équation de Beer-Lambert dépendant du... LAI). Pour ne donner qu'un exemple, il est possible de rapprocher deux rangs de petits pois, mais en les orientant du sud au nord. D'est en ouest, le rang situé au nord, et d'éventuelles cultures plus basses au nord de celui-ci, subiraient l'ombre du rang du sud tout au long de la journée.

Ainsi, les inter-rangs et intra-rangs de culture sont des compromis à trouver entre praticité – de récolte et d'entretien comme le désherbage – et partage de ressources, en premier lieu lumineuses[57].

1.5.2 La quantité de lumière est insuffisante

L'être et le néon

L'éclairage artificiel n'est *a priori* pas destiné au jardinier amateur. Néanmoins, s'il produit ses propres plants à l'intérieur dans de mauvaises conditions d'éclairement, par exemple en jours courts au nord de la France ou avec une mauvaise orientation du logement, cela peut apporter une aide ponctuelle. Plusieurs systèmes existent : lampes fluorescentes, lampes à sodium haute pression, lumière du phare d'Alexandrie[58] ou LED. Ces dernières sont incontestablement plus économes en énergie, de plus longue durée de vie, générant moins de

---

[55] *Leaf Area Index*, pour mémoire.

[56] Les problèmes de densité de culture (espacement des inter-rangs et intra-rangs) seront développés dans le chapitre « Interactions végétales ».

[57] En n'oubliant pas, comme exposé précédemment, que les ressources du sol (eau et azote principalement), conditionnent la bonne exploitation de ces ressources lumineuses.

[58] Rhaaa !

chaleur, et autorisent un réglage plus simple de la composition spectrale. Pionene et al. (2015) montrent également qu'elles permettent une plus grande récolte et d'une meilleure qualité (plus d'antioxydants et moins de nitrates). La composition spectrale est à adapter à l'espèce, mais un rapport du rouge sur le bleu de 0.7 semble idéal pour les légumes-feuilles, et donc les plantules. Pour le cannabis, il faut peut-être prévoir un rapport plus élevé, favorisant la floraison.

L'irradiance doit se régler selon la plante, pour être proche de son point de saturation de la lumière ; sans le dépasser, ce qui constituerait une perte d'énergie. La durée d'éclairement intervient, bien entendu, sur l'irradiation (qui est l'irradiance moyenne multipliée par la photopériode) et donc sur la croissance des plantes. Il a été, de plus, montré par Adams et Langton (2005) que, pour une même irradiation, mais répartie sur une plus longue période d'éclairement, la croissance pouvait être plus importante, ce qui ouvre des perspectives d'économie en éclairage artificiel.

Aménagement du potager d'hiver

Rien ne nous oblige à cultiver toute la surface du potager toute l'année. Il faut donc absolument réserver les parties les plus ensoleillées à l'hiver, et laisser les autres, moins bien exposées ou fortement ombrées par des écrans, au repos. Cela passe parfois par un aménagement : *déplacer* un arbre, rabattre une haie...

Une autre possibilité est de réaliser un ados. Il s'agit d'une bande de terrain de l'ordre de 1m20 de large, qui est bâtie en pente d'environ 20° orientée vers le sud : une disposition qui permet à la lumière de frapper plus perpendiculairement la surface. Une côtière est un ados réalisé contre un mur au nord, afin de profiter d'une restitution supplémentaire de chaleur.

Les voiles de croissance sont aussi employés en saison froide pour augmenter la température. Or, ils diminuent de 15 %[59] la transmission de la lumière. Rien n'empêche de les retirer au cours de la journée pour offrir plus de soleil aux légumes.

[59] Et bien plus lorsqu'ils sont sales...

Endurcissement des semis

Si on ne peut déplacer ni les écrans ni le potager, il reste qu'on peut déplacer les légumes ! Enfin, du moins sous forme de plantules (en plaques ou autres). Pour éviter un étiolement à l'intérieur, il est possible de les sortir en journée, lorsque la température s'y prête. Cette opération leur permet de bénéficier d'un bain de lumière, mais aussi d'un endurcissement. Il s'agit d'une acclimatation des plantules à leurs futures conditions écologiques : plus fraîches, plus ventées et avec des précipitations.

1.5.3 La quantité de lumière est trop importante

Sélection des plantes

L'une des techniques les plus simples consiste à choisir la bonne plante pour la bonne saison. Dans leurs conditions optimales de culture, c'est-à-dire avec une irradiance et une température élevées, les plantes à photosynthèse C4 sont deux fois plus productives que les plantes à photosynthèse C3. Il n'y a pas que la capacité photosynthétique qui fasse la différence, elles ont également une plus grande efficience dans l'utilisation de l'eau, ce qui les désigne très clairement comme cultures d'été (Brown, 1999). Elles font enfin preuve d'une meilleure utilisation de l'azote. Au potager d'été, il est donc possible de cultiver le maïs doux, les amaranthes et le pourpier. Les plantes à photosynthèse CAM partagent les avantages précédents (Bohley et al., 2015 ; Winter, 2019), on y ajoutera par conséquent la baselle, la tétragone cornue et la ficoïde glaciale[60].

Voiles d'ombrage

Une première technique est spécifique aux cultures protégées en serre, sous tunnel... Il s'agit de filtres qui permettent de réfléchir en partie la lumière ; ou de façon plus sélective, de bloquer les dangereux ultraviolets, ou de réduire le rouge lointain afin de diminuer la chaleur.

Au champ, il existe la possibilité de monter des structures avec des toits plus ou moins opaques : cannisses, véritables voiles d'ombrage,

[60] Des développements sur le mode de culture de toutes ces espèces sont disponibles dans la partie « Cabinet de curiosités ».

simples voiles de croissance détournés de leur usage habituel (mais ventilé)... Certains voiles ou filets d'ombrage possèdent une pigmentation permettant de filtrer des bandes particulières de lumière (Rajapakse & Shahak, 2007).

Écrans végétaux

C'est en été que l'irradiance au sommet de la canopée (I_0) est maximale sous nos latitudes : il devient alors envisageable de réaliser des intercultures, c'est-à-dire d'implanter, au même endroit et au même moment, plusieurs cultures, en espérant utiliser des différences de taille pour abriter les plus sensibles du soleil.

L'étage supérieur peut ainsi être constitué de hautes plantes à photosynthèse C4 (maïs doux typiquement), de décoratifs tournesols ou de plantes comme des haricots ou des courges grimpant le long d'un treillis, d'un tuteur, d'un tipi... On peut même implanter du basilic aux pieds de tomates pour regrouper la récolte. Dans tous ces systèmes d'associations, il va falloir bien régler les espèces en jeu, leur densité et leur *timing* d'installation[61].

Au sein d'une même culture, comme celle des tomates ou des concombres (Wilson et al. 1992), il est possible de serrer plus - en gardant une certaine praticité d'entretien et de récolte - et d'utiliser au sol un bâchage de couleur blanche, pour jouer sur l'albédo et réfléchir de la lumière vers le bas de la canopée.

1.6 Changement climatique et lumière

Que disent les prévisions sur les modifications possibles de l'irradiance dans le cadre du changement climatique ? À la lumière des études les plus récentes, Solaun et Cerdá (2019) concluent prudemment que, selon le modèle de prédiction employé, l'échelle temporelle ou la localisation, des résultats contradictoires apparaissent.

De façon plus localisée, Huber et al. (2016), pour la période 2035-2039, suggèrent une petite augmentation de l'irradiance en Europe ; et

[61] Voir le chapitre concernant les interactions végétales pour en savoir plus, en particulier sur l'exemple précis du basilic et de la tomate.

Jerez et al. (2015) avancent une petite augmentation pour la période 2070-2099 dans le sud de l'Europe, mais peu significative en France.

D'où pourrait bien provenir cette incertaine modification ? Ni les positions respectives du Soleil et de la Terre, ni la constante solaire, et encore moins la vitesse de la lumière ne vont changer ! C'est en fait le passage dans l'atmosphère qui peut modifier les radiations. Celui-ci contient, en particulier, des gaz à effet de serre, des aérosols et de la vapeur d'eau (ce que Django Reinhardt appelle des nuages). Les gaz à effet de serre ont un effet essentiellement sur les grandes longueurs d'onde (c'est bien là qu'est le problème !), mais ils sont négligeables pour ce qui est de l'irradiance PAR. En revanche, nous avons vu que la nébulosité et les aérosols ont un impact réel sur l'irradiance, et ce sont leurs modifications qui vont compter. Pour ce qui est de la nébulosité, elle semble peu changer en Europe ; c'est le taux de particules fines qui pourrait diminuer, et qui augmenterait alors légèrement l'irradiance (c'est ce qui explique en tout cas les résultats de Huber et al., 2016).

L'augmentation du dioxyde de carbone peut aussi avoir un effet sur la photosynthèse en améliorant son rendement, en particulier pour les plantes en C3, et les rendre plus compétitives vis-à-vis des plantes en C4. Toutefois, l'augmentation corrélative de température peut réduire ce rattrapage (Brown, 1999). L'effet stimulant du CO_2 ne semble cependant pas suffisant pour rattraper les pertes prévisibles de récoltes occasionnées par le changement climatique (Long et al., 2006).

> Du côté de chez Stéphane : Reste un phénomène lumineux des plus merveilleux, que nous pouvons produire au potager quand nous trouvons le temps un peu long à arroser (par aspersion, dos au Soleil) : un petit arc-en-ciel. Et l'explication scientifique qu'en a donnée Isaac Newton le rend encore plus beau, en nous apprenant que nous sommes seuls à le voir ainsi, et qu'il change à tout moment (Epstein & Greenberg, 1984).

1.7 Références

Adams, S. R., & Langton, F. A. (2005). Photoperiod and plant growth: a review. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, *80*(1), 2-10.

Berry, J., & Bjorkman, O. (1980). Photosynthetic response and adaptation to temperature in higher plants. *Annual Review of Plant Physiology*, *31*(1), 491-543.

Bohley, K., Joos, O., Hartmann, H., Sage, R., Liede-Schumann, S., & Kadereit, G. (2015). Phylogeny of Sesuvioideae (Aizoaceae)–Biogeography, leaf anatomy and the evolution of C4 photosynthesis. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, *17*(2), 116-130.

Brown, R. H. (1999). Agronomic implications of C4 photosynthesis. *C4 Plant Biology*, *1*, 473-507.

Blumthaler, M., Ambach, W., & Ellinger, R. (1997). Increase in solar UV radiation with altitude. *Journal of photochemistry and Photobiology B: Biology*, *39*(2), 130-134.

Campillo, C., Fortes, R., & Prieto, M. D. H. (2012). Solar radiation effect on crop production. *Solar Radiation*, *1*(494), 167-194.

Chozin, M. A., Syukur, M., Melati, M., & Guntoro, D. (2016). Selection of shade-tolerant tomato genotypes. *Journal of Applied Horticulture*, *18*(2), 154-159.

Ehleringer, J., & Forseth, I. (1980). Solar tracking by plants. *Science*, *210*(4474), 1094-1098.

Epstein, J. L., & Greenberg, M. L. (1984). Decomposing Newton's Rainbow. *Journal of the History of Ideas*, *45*(1), 115-140.

Erwin, J., & Gesick, E. (2017). Photosynthetic responses of swiss chard, kale, and spinach cultivars to irradiance and carbon dioxide concentration. *HortScience*, *52*(5), 706-712.

Evans, T. P., & Winterhalder, B. (2000). Modified solar insolation as an agronomic factor in terraced environments. *Land Degradation & Development*, *11*(3), 273-287.

Flénet, F., Kiniry, J. R., Board, J. E., Westgate, M. E., & Reicosky, D. C. (1996). Row spacing effects on light extinction coefficients of corn, sorghum, soybean, and sunflower. *Agronomy Journal*, *88*(2), 185-190.

Folta, K. M., & Maruhnich, S. A. (2007). Green light: a signal to slow down or stop. *Journal of Experimental Botany*, *58*(12), 3099-3111.

Franklin, K. A. (2008). Shade avoidance. *New Phytologist*, *179*(4), 930-944.

Gommers, C. M., Visser, E. J., St Onge, K. R., Voesenek, L. A., & Pierik, R. (2013). Shade tolerance: when growing tall is not an option. *Trends in Plant Science*, *18*(2), 65-71.

Huber, I., Bugliaro, L., Ponater, M., Garny, H., Emde, C., & Mayer, B. (2016). Do climate models project changes in solar resources?. *Solar Energy*, *129*, 65-84.

Jerez, S., Tobin, I., Vautard, R., Montávez, J. P., López-Romero, J. M., Thais, F., ... & Wild, M. (2015). The impact of climate change on photovoltaic power generation in Europe. *Nature Communications*, *6*(1), 10014.

Lacasa, J., Hefley, T. J., Otegui, M. E., & Ciampitti, I. A. (2021). A practical guide to estimating the light extinction coefficient with nonlinear models—a case study on maize. *Plant Methods*, *17*(1), 1-11.

Lambers, H., Chapin, F. S., & Pons, T. L. (2008). *Plant physiological ecology* (Vol. 2, pp. 11-99). New York: Springer.

Lin, Z. F., & Ehleringer, J. (1983). Photosynthetic characteristics of Amaranthus tricolor, a C 4 tropical leafy vegetable. *Photosynthesis Research*, *4*, 171-178.

Long, S. P., Ainsworth, E. A., Leakey, A. D., Nosberger, J., & Ort, D. R. (2006). Food for thought: lower-than-expected crop yield stimulation with rising CO2 concentrations. *Science, 312*, 1918-1921.

Monsi, M., & Saeki, T. (2005). On the factor light in plant communities and its importance for matter production. *Annals of Botany, 95*(3), 549-567.

Musiolková, M., Huszár, P., Navrátil, M., & Špunda, V. (2021). Impact of season, cloud cover, and air pollution on different spectral regions of ultraviolet and visible incident solar radiation at the surface. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *147*(738), 2834-2849.

Nerson, H. (2007). Seed production and germinability of cucurbit crops. *Seed Science and Biotechnology*, *1*(1), 1-10.

Nieuwhof, M. (1976). The effect of temperature on growth and development of cultivars of radish under winter conditions. *Scientia Horticulturae*, *5*(2), 111-118.

Piovene, C., Orsini, F., Bosi, S., Sanoubar, R., Bregola, V., Dinelli, G., & Gianquinto, G. (2015). Optimal red: blue ratio in led lighting for nutraceutical indoor horticulture. *Scientia Horticulturae*, *193*, 202-208.

Pyankov, V. I., Ziegler, H., Akhani, H., Deigele, C., & Luettge, U. (2010). European plants with C4 photosynthesis: geographical and taxonomic distribution and relations to climate parameters. *Botanical Journal of the Linnean Society*, *163*(3), 283-304.

Rajapakse, N. C., & Shahak, Y. (2007). Light-quality manipulation by horticulture industry. *Annual Plant Review Light Plant Development*, *30*, 290.

Raven, P.H., Evert, R.F., & Eichhorn, S.E. (2014). *Biologie végétale*. De Boeck (3ème édition).

Salisbury, F. B. (1981). Responses to photoperiod. In *Physiological Plant Ecology I: Responses to the Physical Environment* (pp. 135-167). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Seyednasrollah, B., Kumar, M., & Link, T. E. (2013). On the role of vegetation density on net snow cover radiation at the forest floor. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *118*(15), 8359-8374.

Solaun, K., & Cerdá, E. (2019). Climate change impacts on renewable energy generation. A review of quantitative projections. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *116*, 109415.

Thanos, C. A., & Mitrakos, K. (1992). Watermelon seed germination. 1. Effects of light, temperature and osmotica. *Seed Science Research*, *2*(3), 155-162.

Trenberth, K. E., Fasullo, J. T., & Kiehl, J. (2009). Earth's global energy budget. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *90*(3), 311-324.

Wiebe, H. J. (1989, August). Vernalization of vegetable crops-a review. In *VI Symposium on the Timing of Field Production of Vegetables 267* (pp. 323-328).

Wilson, J. W., Hand, D. W., & Hannah, M. A. (1992). Light interception and photosynthetic efficiency in some glasshouse crops. *Journal of Experimental Botany*, *43*(3), 363-373.

Winter, K. (2019). Ecophysiology of constitutive and facultative CAM photosynthesis. *Journal of Experimental Botany*, *70*(22), 6495-6508.

1.8 Ctrl-R

Plusieurs chapitres contiennent une section intitulée « Ctrl-R ». Il s'agit de programmes informatiques permettant de réaliser divers calculs et graphiques évoqués dans le cours du texte, *mais surtout de les adapter à sa propre situation*. Cette adaptation passe par la modification de quelques paramètres : latitude, longitude, altitude ou caractéristiques du sol. Ces paramètres sont surlignés en jaune fluo dans les programmes, afin de les repérer plus aisément, et de ne pas perdre de temps à déchiffrer l'ensemble[62].

Une fois ces modifications effectuées, il est nécessaire d'utiliser le logiciel libre de distribution R pour faire fonctionner les programmes ; ce logiciel peut être installé[63] sur tous les systèmes d'exploitation, mais le plus simple est probablement d'employer une version en ligne comme : https://rdrr.io/snippets/

```
##################################################
########## GRAPHIQUE DES IRRADIANCES MENSUELLES
##################################################

### Vous pouvez obtenir les coordonnées GPS de l'endroit
# qui vous intéresse sur le site :
# https://www.geoportail.gouv.fr/donnees/carte-topographique-ign#!

### les données nécessaires viennent de :
# https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/fr/#PVP
### on récupère automatiquement sur ce site
# la température mensuelle et l'irradiation
# globale horizontale mensuelle
### De là on obtient l'irradiation journalière moyenne en
# divisant cette quantité par le nombre de jours du mois
# et en multipliant par 1000 pour obtenir des Wh/m2
```

[62] Les lignes débutant par des # commentent ce qui est fait.

[63] https://cran.r-project.org/

```
### Ce sont les données moyennes de la place Bellecour (Lyon)
# de 2010 à 2020

require(solaR)
latitude <- 45.759881
sol<-calcSol(latitude,    fBTd(mode="prom"),    sample="hour",
keep.night=FALSE)

G0mm<-
c(40.65,61.07,112.32,148.51,169.04,190.63,201.03,176.53,129.8
6,78.06,45.38,36.12)
nbd<-c(31,28.25,31,30,31,30,31,31,30,31,30,31)
G0dm<-1000*G0mm/nbd
T2m <-
c(3.57,4.05,7.85,11.95,15.06,19.69,22.26,21.57,17.69,12.87,7.
56,4.65)
BD<-readG0dm(G0dm=G0dm, Ta=T2m, lat=latitude)
compD<-fCompD(sol, BD, corr = "Page")
compI<-fCompI(sol, compD)

library(ggplot2)
Mois<-
rep(c("Janvier","Février","Mars","Avril","Mai","Juin","Juille
t","Août","Septembre","Octobre","Novembre","Décembre"),table(
month(index(compI))))
Heure<-hour(index(compI))
Radiation<-compI$G0
Mois3<-
factor(Mois,levels=c("Janvier","Février","Mars","Avril","Mai"
,"Juin","Juillet","Août","Septembre","Octobre","Novembre","Dé
cembre"))
Lyon<-data.frame(Heure,Mois3,Radiation)
ggplot(data=Lyon)+aes(x=Heure,y=Radiation)+geom_area(fill="bl
ue")+
facet_wrap(Mois3,nrow=4)+theme_gray()+
ylab("Irradiance (W/m^2)")


##############################################
########## DUREE DU JOUR A LILLE ET MARSEILLE
##############################################

require(geosphere)
dat<-1:365
lat.marseille<-43.30
lat.lille<-50.62
plot(dat,daylength(lat=lat.lille, doy=dat),axes=FALSE,
type="l",ylim=c(8,17),ylab="Durée du jour (h)",xlab="",lwd=3)
lines(dat,daylength(lat=lat.marseille, doy=dat),lty=2,lwd=3)
box()
axis(2,las=2)
x<-15+cumsum(c(0,31,28.25,31,30,31,30,31,31,30,31,30))
```

```
Mois<-
c("Jan","Fév","Mar","Avr","Mai","Jun","Jul","Aoû","Sep",
"Oct","Nov","Déc")
axis(1,at=x,lab=Mois)
grid()
abline(h=10,lty=4,lwd=2)
legend("topright",lty=c(1,2),lwd=c(3,3),legend=c("Lille","Mar
seille"))


##################################################
########## MODELISATION DE L EFFET DE L ALTITUDE
##################################################
# sur l'irradiation en ciel dégagée (W/m2)
# la localisation est celle de la place Bellecour (Lyon) et
# la date le 1er mai 2023

require(solrad)
h<- seq(0,2000,by=10)
plot(h,OpenRadiation(121.5, Lat = 45.76, Lon=4.84,
SLon=4.84,  DS=0,  Elevation  =  h),xlab= "Altitude  (m)",ylab=
"Irradiance (W/m^2), ciel dégagé" ,type= "l",lwd=3)


##################################################
########## EFFET DE LA PENTE ET DE L ORIENTATION
##################################################
# sur l'irradiance
# Toujours à Bellecour, le 1er mai.

require(solrad)
latitude<-45.76
longitude<-4.84
elevation<-167
doy<-121.5
Slope<-seq(0,15,by=0.5)
Irradiance<-Solar(DOY=doy, Lat=latitude,
Lon=longitude, SLon=longitude, DS=0, Elevation=elevation,
Slope=Slope, Aspect=0)$Sdiropen+Solar(DOY=doy, Lat=latitude,
Lon=longitude, SLon=longitude, DS=0, Elevation=elevation,
Slope=Slope, Aspect=0)$Sdifopen
Sun<-data.frame(Slope,Irradiance)

require(ggplot2)
ggplot(data=Sun)+aes(x=Slope,y=Irradiance)+geom_line(lwd=3)+
theme_gray()+xlab("Pente (°)")+ylab("Irradiance (W/m^2)")

doy<-121.5
Slope<-10
Aspect<-seq(-45,45,by=1)

Irradiance<-Solar(DOY=doy, Lat=latitude,
Lon=longitude, SLon=longitude, DS=0, Elevation=elevation,
```

```
Slope=Slope,            Aspect=Aspect)$Sdiropen+Solar(DOY=doy,
Lat=latitude,
Lon=longitude, SLon=longitude, DS=0, Elevation=elevation,
Slope=Slope, Aspect=Aspect)$Sdifopen
Sun<-data.frame(Aspect,Irradiance)

ggplot(data=Sun)+aes(x=Aspect,y=Irradiance)+geom_line(lwd=3)+
theme_gray()+xlab("Orientation   (en   °   par   rapport   au
sud)")+ylab("Irradiance (W/m^2)")



##########################################
########## HAUTEUR DU SOLEIL SELON LES MOIS
##########################################

require(solaR)
lat <- 45.759881
SolD <- fSolD(lat, BTd = fBTd(mode = "prom"))
SolI <- fSolI(SolD, sample = "10 min", keep.night = FALSE)
mon <- month.abb
mon1<-
c("Janvier","Février","Mars","Avril","Mai","Juin","Juillet","
Août","Septembre","Octobre","Novembre","Décembre")
mon2                                                    <-
c("Jan","Fév","Mar","Avr","Mai","Jun","Jul","Aoû","Sep","Oct"
,"Nov","Déc")

require(ggplot2)
y<-r2d(SolI$AlS)
x<-r2d(SolI$AzS)
require(lubridate)
Mois<-month(SolI)
dataset<-data.frame(x,y,Mois)
dataset$Mois<-
factor(dataset$Mois,lab=c("Jan","Fév","Mar","Avr","Mai","Jun"
,"Jul","Aoû","Sep","Oct","Nov","Déc"))

ggplot(data=dataset)+aes(x=x,y=y)+
geom_line(lwd=1.5)+
facet_grid(~Mois)+
ylab("Angle de l'élévation du soleil (°)")+
xlab("Angle de l'azimuth (°)")+
theme_gray()+
scale_x_continuous(breaks = c(-90,-45,0,45,90))


##########################################
########## LONGUEUR DE L OMBRE
##########################################
# pour un obstacle d une hauteur H
# changer la latitude (lat)
# et le jour de l'année j dans BTd[j]
# par exemple j=342 st le 08/12
```

```
require("solaR")
H<-1
lat <- 45.76
BTd <- fBTd(mode = 'serie')
SolD2 <- fSolD(lat, BTd[342])
SolI2 <- fSolI(SolD2, sample = "hour", keep.night = TRUE)
Ombre2<-H/tan(SolI2$AlS)
SolD3 <- fSolD(lat, BTd[172])
SolI3 <- fSolI(SolD3, sample = "hour", keep.night = TRUE)
Ombre3<-H/tan(SolI3$AlS)
Time<-0:23
plot(Time[Ombre3>0],Ombre3[Ombre3>0],type="l",xlim=c(0,24),yl
im=c(0,8),axes=FALSE,xlab="Heure  (du  soleil)",ylab="Longueur
de l'ombre (H)")
lines(Time[Ombre2>0],Ombre2[Ombre2>0],lty=2)
box()
axis(side=2,at=0:8)
axis(side=1,at=c(0,6,12,18,24),label=c("00:00","06:00","12:00
","18:00","24:00"))
grid()
legend("bottomright",     legend     =     c("21     Juin","08
Décembre"),lty=c(1,2))
```

2 Température

2.1 Qu'est-ce que la température ?

Au niveau microscopique, la température est une mesure de l'agitation des particules d'un gaz, d'un liquide ou d'un solide. Le degré zéro de cette agitation est le point de départ de l'échelle des degrés Kelvin (K) ; cependant, l'échelle de température que nous emploierons au potager, est celle, plus usitée, des degrés Celsius (°C avec °C=K-273.15).

En météorologie, afin d'obtenir des mesures standardisées, un thermomètre est placé dans une boîte blanche, aérée, ouverte vers le nord, située à environ 1.5 mètre du sol. Ce dispositif permet d'éviter des variations induites par le rayonnement solaire direct sur le thermomètre, par la re-radiation provenant du sol, et par les turbulences et précipitations. Nous mesurons, sur une journée, la température minimum (Tn) et la température maximum (Tx), dont nous déduisons la température moyenne : Tm=(Tn+Tx)/2. Nous nous intéresserons, en outre, aux journées de gel (Tn<0°C).

La température des feuilles au soleil, la température à la surface du sol au soleil et la température dans le sol sont différentes de la température de l'air sous abri ; mais toutes sont en relation avec elle. Nous verrons que le jardinier dispose de divers moyens pour les modifier à son avantage.

2.2 Réponse des plantes à la température

Les plantes ne peuvent pas vraiment contrôler leur température interne et sont donc soumises aux fluctuations saisonnières et quotidiennes de la température ambiante. D'autant plus qu'elles sont sessiles, elles ne peuvent, par conséquent, aller s'abriter ! Les plantes doivent s'adapter à cette situation et, au cours de l'évolution, ont trouvé des réponses différentes : la plus évidente étant la distribution naturelle très contrastée des plantes sur la planète.

Dans ce chapitre, nous allons comparer deux espèces reines du potager : la tomate (*Solanum lycopersicon*), une plante originaire de

l'Amérique centrale ou andine, et la laitue (*Lactuca sativa*), provenant du bassin méditerranéen. Commençons par le commencement : la germination des graines.

2.2.1 Germination et température

Les tests de germination permettent d'estimer la qualité d'un lot de semences ; leur déroulement est l'objet d'un protocole complexe, réglé par l'*International Seed Testing Association* (Milivojević et al., 2018). Grosso modo, un ensemble de graines est disposé sur un papier imbibé en permanence et, à intervalles réguliers, le nombre cumulé de graines ayant germé[64] est relevé.

Modélisation du pourcentage cumulé de germination

L'évolution, au cours du temps, de ce pourcentage cumulé de germination peut être modélisée (voir Figure 18) par la fonction logistique[65] :

$$G(t) = \frac{Gm}{1 + \exp(-GS \times (t - D50))}$$

où les trois paramètres[66] sont *Gm*, le pourcentage maximum de graines ayant germé, également appelé faculté germinative ; *GS* qui quantifie la « pente » de la courbe ; et *D50* qui correspond à la durée nécessaire pour dépasser 50 % *des graines germées*. On préfère souvent à ce dernier la quantité suivante[67] : *T50* qui est la durée nécessaire pour atteindre 50 % de *germination de l'ensemble des graines*.

---

[64] Que veut dire germer ? Pour la laitue, par exemple, c'est lorsque la radicule a dépassé 1 mm. Il ne s'agit donc pas de mesurer le véritable temps d'émergence de la plantule.

[65] Je ne rentre pas dans les détails des nombreux modèles proposés (Gompertz, Weibull, log-normal) ni des procédures d'ajustement plus ou moins sophistiquées (moindres carrés, log-vraisemblance, avec censure de données groupées, etc.). On pourra se reporter à Scott et al. (1984) pour une telle discussion.

[66] Certains autres modèles permettent aussi de définir une asymétrie de germination, c'est-à-dire que la forme de la fonction à droite et à gauche du point D50 n'est pas « en miroir ». C'est surtout intéressant lorsque les dernières graines germent avec beaucoup de retard.

[67] T50=D50-ln(Gm/50-1)/GS

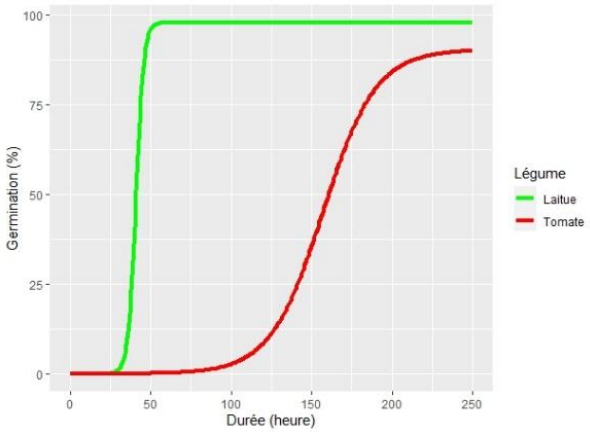


Figure 18 : Modélisation de la germination cumulée (%) en fonction de la durée (heure) pour la tomate et la laitue à 15 °C.

Le paramètre *Gm* est une garantie de qualité des semences et, pour les semences commercialisées, la Commission européenne impose des taux minimaux. On demande ainsi, pour de la laitue et la tomate, une faculté germinative de 75 % ; mais, pour la carotte ou le persil, généralement plus récalcitrants, le minimum est fixé à 65 % ; alors qu'il est à 85 % pour le maïs[68]. Bien entendu, rien ne garantit que des graines autoproduites, ou âgées, atteignent ces seuils. Sur notre exemple de la Figure 18, la laitue (*Gm*=98 %) germe mieux que la tomate (*Gm*=90 %).

Le paramètre *GS* est également important pour un cultivar, car il permet de vérifier l'uniformité de germination d'un lot de semences. Pour qu'un cultivar soit inscrit au *catalogue officiel des espèces et des variétés de plantes cultivées en France*, il faut prouver son homogénéité. Il est très clair, sur la Figure 18, que la laitue a une germination plus uniforme (*GS*=0.416) que la tomate (*GS*= 0.061) : lorsque la première graine de laitue germe, les autres suivent rapidement.

Toutefois, l'information la plus intéressante est fournie par le paramètre *T50*, qui indique le temps médian de germination[69]. Pour

[68] Annexe 2 de la directive 2002/55/CE du conseil du 13 juin 2002, concernant la commercialisation des semences de légumes.

[69] À condition, bien entendu, que le taux de germination *Gm* dépasse 50 %...

notre exemple, la laitue germe en *T50*=1.7 jours et la tomate en *T50*=6.7 jours. Par la suite, le raisonnement a plutôt lieu en termes de vitesse de germination : on considère en fait *V50*=1/*T50*, dont les unités sont des jour^{-1} (ou heure^{-1}) ; soit pour la laitue *V50*=0.57 et pour la tomate *V50*=.0.15.

La laitue, sur cet exemple, présente de meilleures faculté germinative, uniformité et vitesse de germination que la tomate. Cependant, dans les deux cas, l'expérience s'est déroulée en milieu contrôlé, avec une température de 15°. La question est maintenant de savoir si cette comparaison tient toujours lorsque la température est modifiée ?

Faculté germinative et la température

Si le sol est humide, Garcia-Huidebro et al. (1982) indiquent que sa température est le facteur essentiel, en ce qui concerne la faculté germinative *Gm*, mais aussi la vitesse de germination *V50*. Pour ce qui est de la faculté germinative, il existe en général une température de base, au-dessous de laquelle il n'y a pas de germination ; puis, juste au-dessus, une sorte de plateau, où la faculté germinative est maximale ; ce, jusqu'à une certaine température plafond, où elle retombe presqu'immédiatement à zéro (Figure 19).

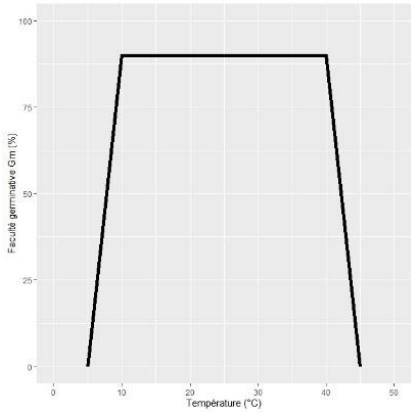


Figure 19 : Faculté germinative du basilic (qui accompagnera parfaitement la tomate), selon la température (données de Zhou et al., 2016).

C'est donc plutôt un effet de tout ou rien qu'exerce la température sur ce paramètre. Une espèce se caractérise, de ce point de vue,

uniquement par ses températures de base et de plafond, et sa faculté germinative.

Températures cardinales de germination

On pourrait se dire que les semences vont de toute façon germer entre les deux températures de base et de plafond et, par conséquent, qu'il suffit de viser cette fenêtre. Cependant, considérer la vitesse de germination est important, non seulement pour hâter, au bout du compte, la récolte, mais aussi parce qu'une plus longue germination entraîne de plus grands risques, de maladies par exemple. Or, l'effet de la température s'avère plus progressif sur la vitesse de germination que sur la faculté germinative : la Figure 20 montre les valeurs de *V50* obtenues pour des températures de 10 °C à 35 °C, concernant la tomate (Sousaraei et al., 2021, cultivar 'Esfarayen'). La relation entre vitesse de germination et température présente néanmoins toujours la même forme[70] : (a) aux basses températures, il n'y a pas germination et la vitesse est par conséquent nulle ; (b) puis, à partir d'un premier seuil dit température de base (Tb), elle commence à augmenter de façon presque linéaire, jusqu'à une température optimale (To), où la germination est la plus rapide possible ; (c) pour ensuite baisser, souvent plus brutalement, à des températures plus élevées, jusqu'à un nouveau seuil dit température plafond (Tc), à partir duquel il n'y a plus de germination. Les trois seuils (Tb, To et Tc) sont appelés températures cardinales[71], et vont caractériser la germination de l'espèce.

Pour la tomate, sont observées des températures cardinales de germination de l'ordre de Tb=8-10 °C, To=15-29 °C et Tc= 35 °C (Shamsiri et al., 2018) ; et, pour la laitue, des températures de Tb= 3 °C (Wagenvoort & Bierhuizen, 1977), To= 15-22 °C et Tc=25-30 °C (Gray, 1975).

---

[70] Là encore, de nombreux modèles ont été proposés, j'utilise ici le plus simple, une fonction triangulaire, mais il existe aussi une fonction dite « dentée » (de forme trapézoïdale) ou des versions plus continues comme le modèle de Yin et al. (1995), basé sur une fonction Beta.

[71] Ces températures cardinales peuvent être également obtenues en ajustant les autres modèles statistiques cités...

Ces températures cardinales vont être un guide précieux afin de prévoir une date raisonnable pour un semis direct et afin d'organiser, le mieux possible, les conditions contrôlées d'un semis indirect. On peut trouver dans le *Knott's Handbbook for vegetable growers* (table 3.4 p.108, disponible en ligne) les températures cardinales de germination pour les principaux légumes. On y voit un effet assez amusant d'arrondi, du fait que les Anglo-Saxons utilisent le degré Fahrenheit plutôt que la mesure en degré Celsius.

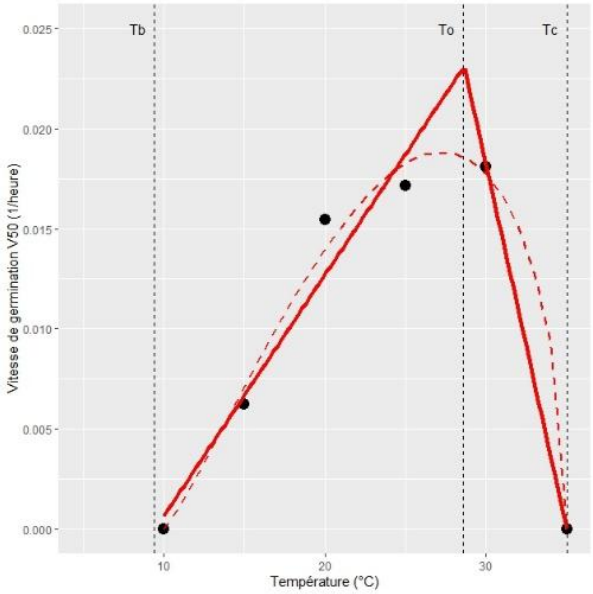


Figure 20 : Modélisation "triangulaire" de la vitesse de germination de la tomate en fonction de la température, et détermination des températures cardinales (Tb température de base, To température optimale et Tc température plafond).

Vers un calendrier des semis

La Figure 21 montre les températures de base de germination pour la plupart des espèces potagères. On peut y repérer que beaucoup d'espèces présentent des valeurs entre 0 °C et 5 °C, qu'il s'en trouve ensuite quelques-unes entre 5 °C et 10 °C, puis à nouveau un bon nombre entre 10 °C et 12.5 °C (pour simplifier). Sans surprise, on retrouve une opposition entre des plantes d'origine tempérée, comme la laitue, et tropicale, comme la tomate.

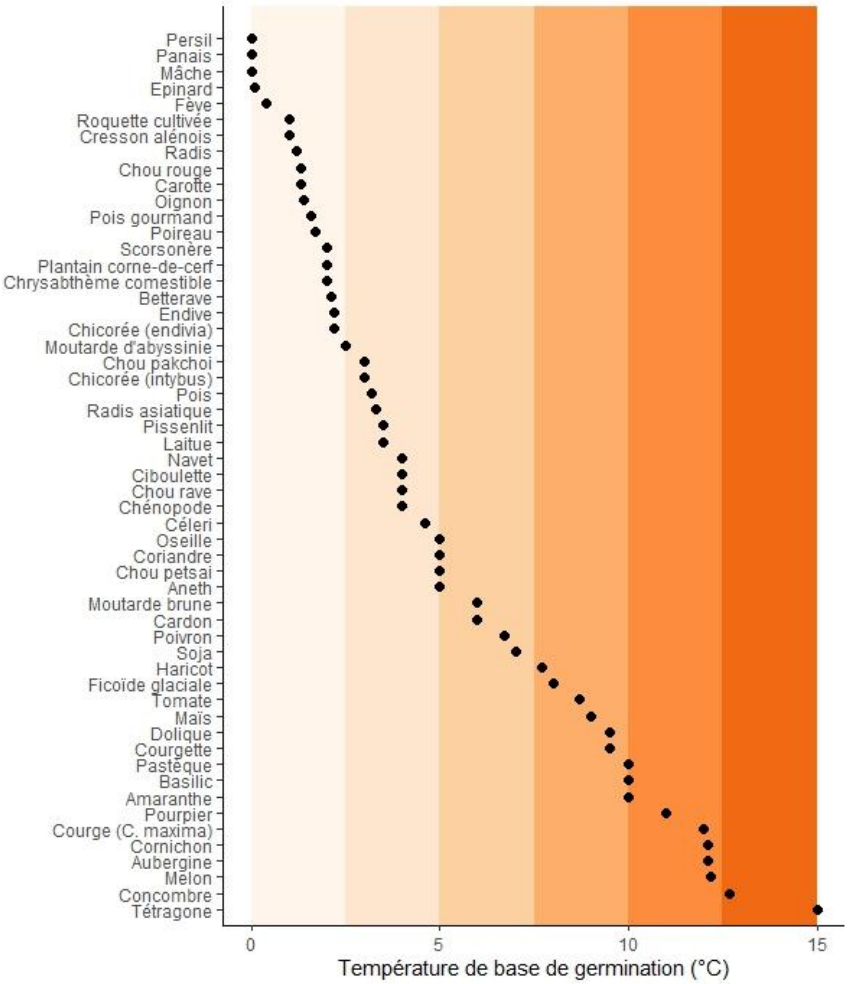


Figure 21 : Température de base de germination (°C) pour de nombreux légumes.

Même s'il y a des subtilités entre toutes les plantes situées au-dessous de 5 °C, par exemple l'épinard peut probablement être semé ou planté avant la laitue en fin d'hiver, il faut cependant, avant d'établir un calendrier ultra-précis fondé sur ces températures de base, être conscient de plusieurs choses. Pour calculer ces températures, il a fallu, au sein d'un lot de semences, généralement issu d'un cultivar précis (premier facteur de variation), cultivé dans une exploitation précise (deuxième), tirer « au hasard » un ensemble de graines (troisième), puis, sur un choix donné de températures (quatrième), relever à intervalles réguliers (cinquième) le nombre de graines germées. Les calculs qui s'ensuivent et diffèrent selon les modèles

choisis (sixième[72]) capturent *une part* de ces variations dans ce qu'on appelle l'erreur standard, ici de l'ordre de 1 °C, ce qui entraîne que ces températures de base sont connues à plus ou moins 2 °C.

Dormance et température

Toutefois, la température intervient sur la germination de bien d'autres façons : en constituant chez certaines espèces un signal. La plupart des graines ont une période de dormance, pendant laquelle elles ne germent pas ; il s'agit d'une adaptation écologique leur permettant d'attendre que l'environnement leur soit plus favorable. Il existe de très nombreux types de dormance, décrits dans Geneve (2003), mais on distingue particulièrement la dormance primaire et secondaire.

Dans la dormance primaire, une condition (morphologique ou physiologique) fait que la graine ne peut germer dès sa conception. La plupart du temps, une imbibition et une température convenable permettent de lever cette dormance. Cependant, certaines graines ont, par exemple, des embryons non encore complètement développés, et réclament des conditions supplémentaires. C'est le cas du genre *Daucus* (la carotte), dont la levée de dormance est encouragée par une stratification chaude, c'est-à-dire une opération avant le semis où l'on plonge, par exemple, les graines dans de l'eau à 20 °C. Il existe également des techniques de stratification froide, Palme (2021) conseille ainsi, pour la claytone de Cuba à implanter en fin d'été, de poser les graines dans une boîte sur du sable humide, et de laisser le tout au réfrigérateur jusqu'au début de la germination. Dans tous les cas, il faut non seulement réguler la température pour une stratification, mais aussi imbiber les graines (il ne suffit pas de mettre des graines sèches au froid, Geneve 2005). Une bonne ventilation est également importante pour fournir de l'oxygène à la graine.

Dans la dormance secondaire, la dormance primaire est en fait levée, mais une circonstance extérieure entraîne une nouvelle plongée en dormance. La thermodormance est ainsi due à de hautes températures.

---

[72] Et cela se voit sur la Figure 20, où a été discrètement ajouté en pointillés une modélisation par le modèle de Yin et al. (1995), qui conduit à une température optimale différente : 27.2 °C, contre .28.6 °C pour le modèle triangulaire.

Ce phénomène ne doit pas être confondu avec le fait que la température plafond soit dépassée, car dans ce cas, lorsque la température retombe, les graines germent à nouveau ; dans le cas de la thermodormance, les graines sont « bloquées », et seule une forte stratification froide peut les relancer rapidement. La laitue et le céleri sont notoirement connus pour ce problème, on prendra donc des dispositions pour des semis de fin d'été.

> Du côté de chez Stéphane : Je sème en plaques mes laitues d'automne début août, en les laissant dans une cave fraîche, mais proche d'une fenêtre afin d'éliminer l'autre problème de la laitue : celui de la photodormance. Bien entendu, dès la levée, il faut les sortir pour conjurer l'étiolement, mais en les gardant à l'ombre pour une croissance à température raisonnable (voir plus loin).

2.2.2 Croissance, développement et température

Températures-limites de croissance

De la même façon que la vitesse de germination est reliée à la température, il est possible, au moins sur le plan théorique, de relier la vitesse de croissance (de la tige, des feuilles, des racines...) à la température. La Figure 22 montre une schématisation de cette relation. On y retrouve les températures cardinales, mais ici pour la croissance : la température de base (Tb), souvent appelée zéro de végétation, au-dessus de laquelle la croissance commence ; la température optimale (To), où la croissance est la plus rapide ; et la température plafond (Tc), à partir de laquelle la croissance s'arrête. On trouvera, pour les légumes classiques, ces températures cardinales dans le document *Knott's Handbook for Vegetable Growers* (table 3.3 p. 107, disponible en ligne).

S'y ajoutent deux températures, dites létales (Tl1 et Tl2), au-delà desquelles la plante meurt, du fait de conditions trop difficiles. Bien que ces températures létales varient selon l'origine géographique de l'espèce, elles paraîtront assez intuitives pour l'être humain qui est, après tout, adapté à la même planète...

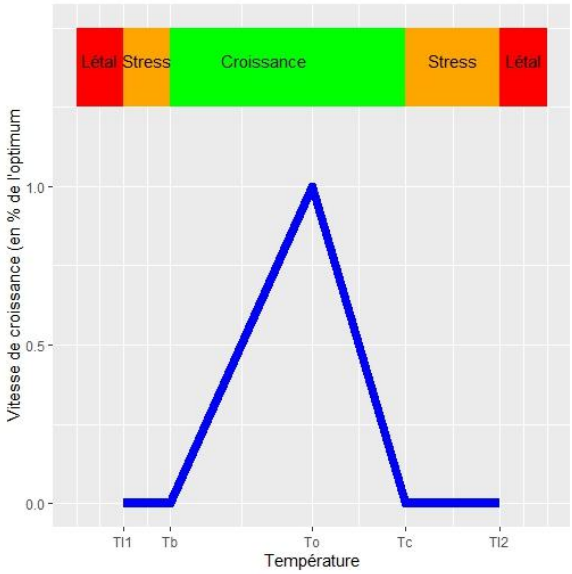


Figure 22 ; Limites de températures pour la croissance d'un végétal (Tl1=température létale minimum, Tb =température de base de croissance, To =température optimale de croissance, Tc =température plafond de croissance, Tl2= température létale maximum).

Ces cinq températures constituent ce qu'on appelle les températures-limites (Luo, 2016). Ceci permet de définir sur la Figure 22 trois situations : (1) en rouge, les températures létales ; (2) en orange, les températures de stress, où la plante ne pousse pas, mais elle survit, parfois avec quelques dommages ; et (3) en vert, les températures de croissance. La plupart des plantes sont mésophiles, à l'aise dans des températures de 10 à 30 °C. La partie triangulaire est souvent dissymétrique : la chute après l'optimum s'avérant plus brutale que la montée depuis la température de base. Ce schéma est un exemple de ce qu'on appelle une courbe de réponse de la plante à un facteur, qui est, en l'occurrence, la température, mais peut aussi bien être repris pour l'eau ou pour la nutrition de la plante.

L'un des objectifs du jardinage est d'éviter aux légumes les zones létales, et même les zones de stress, en mettant en place différents dispositifs ou itinéraires techniques.

Durée jusqu'à la maturité

L'une des questions pratiques importantes concernant la croissance est de savoir combien de temps est nécessaire à un légume pour atteindre la « maturité », c'est-à-dire un état où il peut être récolté.

Cela permet non seulement d'organiser sa récolte, mais aussi de prévoir quand sa succession va pouvoir être mise en place : on cherche toujours à optimiser l'utilisation de l'espace et du temps au potager.

Il existe des tableaux qui résument, pour les légumes principaux, cette information : il est possible d'en trouver une compilation dans l'annexe (*cf.* Durée (jours) avant récolte).

Cependant, on doit s'attendre à ce que cette durée jusqu'à la récolte soit fonction de la température, et la Figure 23 montre, pour deux espèces (laitue et radis) où plusieurs séries de semis sont courantes, que c'est clairement le cas[73]. C'est ce thème que nous allons à présent développer, avec la théorie de la somme de chaleur.

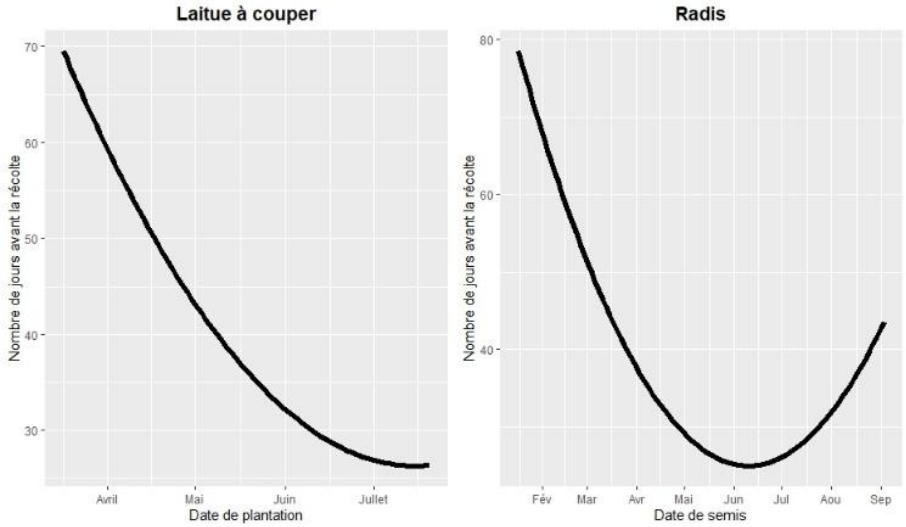


Figure 23 : Relation entre la date d'installation et le nombre de jours pour obtenir une récolte (pour la laitue, voir Kristensenet al., 1985 ; et pour le radis, voir Gray & Steckel, 1986).

Somme de chaleur

Lorsque nous regardons le modèle de croissance de la Figure 22, et que nous nous concentrons sur la partie située entre le zéro de végétation (Tb) et la température optimale de croissance (To), nous obtenons la Figure 24, sur des données proches d'une croissance théorique de la tomate.

[73] Il s'y mêle aussi des considérations de luminosité, il est vrai.

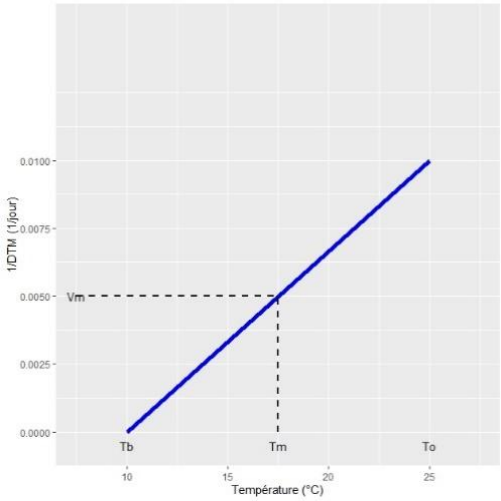


Figure 24 : Relation entre la vitesse de croissance, qui est l'inverse de la durée jusqu'à la récolte, et la température (pour les températures situées entre le zéro de végétation et la croissance optimale).

On a donc une relation linéaire du type 1/J=a×Tm+b, où J est le nombre de jours nécessaires pour atteindre la maturité, et Tm la température moyenne observée sur la période de pousse. Après quelques modifications[74], nous obtenons l'équation :

$$J = \frac{HS}{Tm - Tb}$$

avec HS (=1/a) dit somme de chaleur.

Cette équation explique pourquoi une laitue semée en mars met plus longtemps à pousser qu'une laitue semée en avril (parce que, sur les deux périodes de pousse, Tm est différent ; sans compter la luminosité).

Cette équation permet également d'introduire un certain nombre de stratégies pour accélérer la récolte (Figure 25). Premièrement, il est possible de « jouer » sur le zéro de végétation (en haut à gauche de la figure), en faisant appel à des cultivars précoces. Deuxièmement, la somme de chaleur peut être diminuée (en bas à gauche, la pente de la

[74] En partant de (Eq. 1) : 1/J=aTm+b, on sait qu'au point Tb, nous avons 1/J=0, d'où b=-aTb. Dès lors, (Eq.1) devient 1/J=a(Tm-Tb), soit J=1/(a(Tm-Tb)). En posant HS=1/a, nous finissons avec J=HS/(Tm-Tb).

droite augmente, donc son inverse HS diminue), en employant des cultivars rapides, parfois aussi appelés hâtifs. Troisièmement, la température moyenne Tm peut être augmentée, par l'emploi de voiles de croissance, de semis indirects ou... du changement climatique (en haut à droite). Quatrièmement, si la relation avec la vitesse est linéaire, elle est en fait inverse entre le nombre de jours de maturité et la température (en bas à droite). Aussi, une augmentation de la température moyenne a un effet beaucoup plus net aux basses températures qu'aux hautes températures, c'est pourquoi les voiles de croissance sont, lorsque la température s'adoucit, moins utiles (voire parfois contre-productifs, en diminuant l'autre facteur limitant : la luminosité).

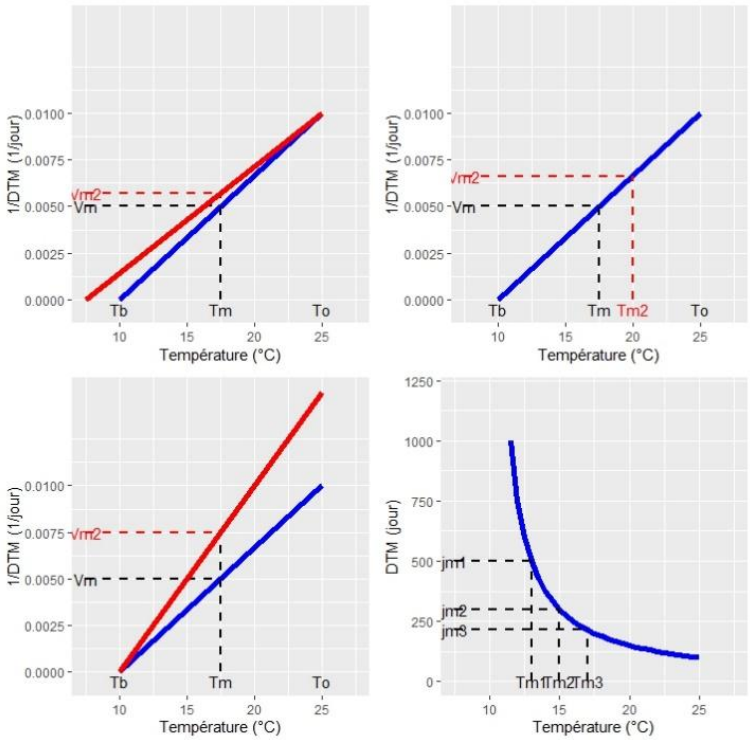


Figure 25 : Modifications de l'équation de la somme de chaleur.

Pour revenir un instant sur la germination, l'équation de la somme de chaleur est aussi employée pour les températures infra-optimales, mais en la paramétrant en fonction d'un pourcentage de germination quelconque g (plutôt que systématiquement avec g=50 %). On appelle cette relation entre la vitesse de germination de la fraction g des graines

($1/t_g$) et la température moyenne (T) sur la période, le modèle de temps thermique :

$$1/t_g=(T-T_b)/\theta_{T(g)}$$

où T_b est la température de base, et θ_T la constante thermique qui dépend du pourcentage de germination recherché *g*.

Lorsque *g* varie, nous nous retrouvons dans le cas de la Figure 25 en bas à gauche, où c'est la pente qui change, mais la température de base reste constante. La faculté germinative n'est pas modifiée dans ce modèle, mais uniquement la vitesse de germination. À température constante, plus le pourcentage de germination est faible (les premiers 10 %, par exemple), plus la germination est rapide. Il existe donc une stratégie de semis, où l'on sème beaucoup plus que nécessaire, pour voir germer plus rapidement les premiers pourcents, et on éclaircira par la suite le reste. On y gagne du temps de germination[75], et probablement de la vigueur pour les plantes. Cette stratégie prend tout son sens avec des graines vieillissantes, qui germent moins bien. On appellera cette stratégie : « Qui sème dru, records battus ».

Degrés-jours de croissance

L'équation de la somme de chaleur permet un développement intéressant, que je renvoie en note de bas de page[76], et qui conduit à l'équation des degrés-jours :

$$HS = \sum_{j=1}^{J} (T_j - Tb)$$

La quantité[77] T_j-Tb indique donc, pour le jour j, sa contribution à la somme de chaleur (qu'il faut atteindre), soit dans l'exemple de la Figure 24 : HS=1/a=1/(0.01/(25-10))=1500.

---

[75] Mais pas du temps d'éclaircissage...

[76] En partant de J=HS/(Tm-Tb), nous avons HS=J×(Tm-Tb), or $Tm=\Sigma_j T_j/J$, et en tant que constante $Tb=\Sigma_j Tb/J$, d'où $HS= J\times \Sigma_j(T_j-Tb)/J= \Sigma_j(T_j-Tb)$.

[77] En fait, il arrive que Tj<Tb, il faut alors prendre une décision sur ce que l'on va utiliser (Tj=Tb ?). Il arrive également que Tj>To et, là aussi, différentes solutions ont été proposées, je ne rentre pas dans les détails.

Pour un exemple concret avec la tomate, Zalom et Wilson (1998) donnent le nombre de degrés-jours (> 10 °C), depuis l'émergence de la plantule, pour atteindre différents stades : floraison (185), fruit vert de bonne taille (557), apparition des premiers fruits rouges (909) et maturation de l'ensemble des fruits[78] (1214). On peut d'ailleurs voir que le système des degrés-jours peut s'appliquer à partir de n'importe quelle étape phénologique, c'est-à-dire qu'en constatant que les fruits sont verts par exemple, il faudra 362 (=909-557) degrés-jours pour avoir la première récolte.

Les plantes, comme certains animaux, ne régulent pas réellement leur température interne, et la température de leur environnement est, dès lors, un facteur majeur de leur développement[79]. La somme de chaleur est une mesure du temps physiologique nécessaire pour accomplir ce développement ; et avec la température de base, elles forment ce qu'on appelle les constantes thermiques. La somme de chaleur permet, en théorie, de prendre en compte dans le temps de développement ce qui est dû au facteur température.

Le concept de temps thermique a été employé pour décrire la germination des cultures et des adventices, leur croissance, leur maturité, l'apparition des fleurs et des fruits. Il a permis de mieux définir des dates de plantation, de récolte ou de traitement. En effet, le concept a aussi été beaucoup appliqué aux insectes, et donc aux interactions entre les plantes et les insectes. Les constantes thermiques permettent de comprendre l'adaptation d'une espèce à un environnement donné : on vérifie facilement que les espèces tempérées ont des températures de base plus basses que les espèces tropicales. On montre aussi qu'il existe une sorte de compromis entre les deux constantes (*trade-off*) : lorsque la température de base est élevée, la somme de chaleur est petite ; et vice-versa. Il va donc être difficile de trouver des espèces, ou même des cultivars, à la fois précoces et rapides. Au sein d'une même espèce, la température de base est généralement moins variable que la somme de chaleur : on doit par conséquent pouvoir plus facilement sélectionner sur la base de la rapidité.

---

[78] Ce sont des tomates destinées à l'industrie, et il y a une seule récolte.

[79] Même si elles agissent sur la température des feuilles par leur transpiration.

Ceci dit, la somme de chaleur peut être modifiée par d'autres éléments comme, par exemple, la disposition de nutriments ; ce qui est très clair chez les insectes, qui prolongent le temps dans un état (larvaire, par exemple) s'ils ne disposent pas d'assez de nourriture. La somme de chaleur paraît moins flexible chez les plantes et explique, en l'absence de nutriments, qu'elles vont conserver le même rythme, mais être, au final, bien moins développées. En clair : une récolte moindre si l'eau ou les nutriments viennent à manquer.

Le modèle des degrés-jours repose entièrement sur la linéarité entre température et taux de développement, mais certaines lois chimiques ont tendance à considérer que la relation est plus de nature exponentielle. (Â chaque fois que nous avons 10 °C de plus, la croissance double : c'est la loi de Van't Hoff.) Je me garderai de prendre parti, mais je rappellerai, en tant que statisticien, la phrase de Georges Box : « Tous les modèles sont faux, mais certains sont plus utiles que d'autres ». D'après Trudgill et al. (2005), le modèle des degrés-jours a de nombreuses fois démontré son utilité.

Pour autant, est-ce que ce système des degrés-jours permet vraiment une meilleure prédiction des dates de récolte que la simple notion de durée moyenne avant la maturité ? En fait, cela n'est pas toujours le cas, et il faut bien souvent, afin d'être plus efficace, définir les constantes thermiques spécifiquement pour un cultivar et une localisation (Hodge, 1991). Mais ce n'est parfois même pas suffisant, concernant la laitue, Krisyensen et al. (1987) montrent que la somme de chaleur (avec Tb=4 °C[80]) doit encore être corrigée de la date de plantation par une régression linéaire[81]. En outre, même dans la version la plus simple ci-dessus, il existe plusieurs façons de s'y prendre pour réaliser le calcul des degrés-jours, ce qui peut occasionner des erreurs (McMaster & Wilhelm, 1997), et les différences peuvent être considérables ; il convient de savoir quelle méthode a été utilisée pour chaque cas... ce qui n'est pas toujours précisé par les auteurs.

---

[80] Mais, selon les travaux, différentes températures de base ont été trouvées, de 0 °C à 6 °C...

[81] HS=303.7+1.343×tp, où tp est la date de plantation (le premier janvier, tp=1).

Everaarts (1999) propose une revue des connaissances sur les dates de récolte des principaux légumes de plein champ cultivés en Europe. Sur 29 légumes, 9 seulement ont vu se développer une méthodologie. Cela s'explique par le fait que certains légumes offrent une latitude dans la date de leur récolte, en gardant leurs qualités (ils peuvent rester en terre, par exemple), ou bien se conservent assez facilement suite à la récolte. En revanche, pour d'autres (laitues, radis, pois, certains choux...), la fenêtre est beaucoup plus raccourcie ; pour ceux-ci, la méthode des degrés-jours de croissance a été largement étudiée. Toutefois, dans certains cas, elle ne conduit pas à une amélioration notable par rapport à la méthode plus simple du nombre moyen de jours ; ou, dans d'autres cas, elle demande à être complétée par des renseignements supplémentaires : non seulement cultivar et date de plantation, mais aussi humidité du sol, densité de culture et parfois même certaines mesures intermédiaires de la plante (de la taille de la tête du chou-fleur, par exemple). Enfin – mais on pouvait s'en douter – la méthode devient plus précise si l'on ne raisonne pas à partir du semis, mais de l'émergence, ou d'un certain stade phénologique : nombre de feuilles, mieux de la floraison (ce qui est probablement également vrai pour la méthode du nombre moyen de jours).

Ceci nous amène à une différence fondamentale entre le jardinage amateur et la science agronomique pour les grandes cultures. Dans cette dernière, souvent confrontée à des monocultures et à des enjeux financiers très importants, il est intéressant de développer des modèles sophistiqués pour prédire une date de floraison, de fructification, de traitement ou de récolte ; et des modèles beaucoup plus complexes que celui des degrés-jours, incluant de nombreux paramètres, ont été mis sur pied. Mais, dans un potager, avec une très grande diversité d'espèces sur un petit espace, les problématiques sont radicalement différentes, et assurer une planification, même approximative, à l'aide des durées moyennes avant récolte, est déjà un problème complexe.

Stress de froid (rusticité)

En deçà de son zéro de végétation, commence donc la zone de stress pour la plante. Notons que le stress de basse température est, le plus souvent, renforcé par un stress de jour court et de faible irradiance. On distingue trois types de plantes : celles qui sont sensibles au froid

(<10°C), celles qui sont sensibles au gel (<0°C), et celles qui sont résistantes au gel, que l'on dit rustiques. La tolérance au froid consiste à avoir une température létale très basse, et une capacité à minimiser les dommages en zone de stress. En zone de refroidissement, les dommages sont généralement réversibles, mais c'est moins le cas en zone de gel. Il s'agit là d'un critère essentiel pour définir le calendrier des cultures : d'une part pour sélectionner les végétaux rustiques capables de survivre en hiver, voire d'y pousser un peu ; et d'autre part pour éviter absolument aux plantes sensibles au froid, comme la tomate, une période de gel[82] tardif.

Le gel a un effet dévastateur sur les végétaux d'été, mais il n'est pas une condition nécessaire pour leur occasionner un stress. Ceux-ci sont, en effet, sensibles au refroidissement (température de 0 °C à 10 °C voire 15 °C). Les dommages de refroidissement réduisent la taille des feuilles, peuvent produire un jaunissement (chlorose), voire la mort de tissus (nécrose), et réduisent au final la production de tomate, poivron, melon, pastèque, ou la germination du haricot. Il est possible, dans une certaine mesure, d'acclimater les plantes fragiles au froid par un endurcissement, ce qui change leur composition en lipides et en sucres, et leur autorise une meilleure résistance en cas de coup dur. La résistance au froid et au gel n'est pas un caractère statique, mais se modifie au cours de la saison.

En revanche, le gel en lui-même n'est pas une condition suffisante pour endommager les végétaux de saison fraîche : il est nécessaire que leurs tissus soient gelés. Il a longtemps été considéré qu'une température de -5 °C était le seuil de résistance des légumes ; or, il s'avère que certaines verdures asiatiques peuvent résister à -14 °C (Theurl et al., 2017). Il est donc possible de réaliser des cultures d'hiver en plein champ ; et avec une meilleure productivité encore sous abri froid (voile de croissance ou tunnel non chauffé). Ce sont les racines qui sont les plus sensibles au gel, il faut donc, pour les plantes vivaces, les bien protéger à l'entrée de l'hiver.

---

[82] Il existe plusieurs définitions du gel, mais nous resterons sur la définition météorologique classique, où il est indiqué par une température au-dessous de zéro dans un abri de Stevenson.

Kader et al. (1974) classent les légumes en fonction de leur rusticité. Il existe un autre classement, assez intéressant, qui est celui de la *Royal Horticultural Society* (Gardiner., 2013). Ces deux informations sont réunies dans le tableau « Rusticité des légumes » proposé en annexe.

Il est donc primordial de connaître les dates de derniers gels au printemps, et de premiers gels en automne. Attention, la température moyenne n'est pas le bon indicateur, il faut se fier à la température minimale du jour (donc celle du matin). La Figure 26 montre les risques de gel concernant mon potager, dans la région lyonnaise. C'est généralement au tout début du mois de mai que le risque de gel est écarté, d'où la date traditionnelle des « saints de glace » (12-13 mai), conseillée pour implanter les cultures fragiles de type solanacées et cucurbitacées.

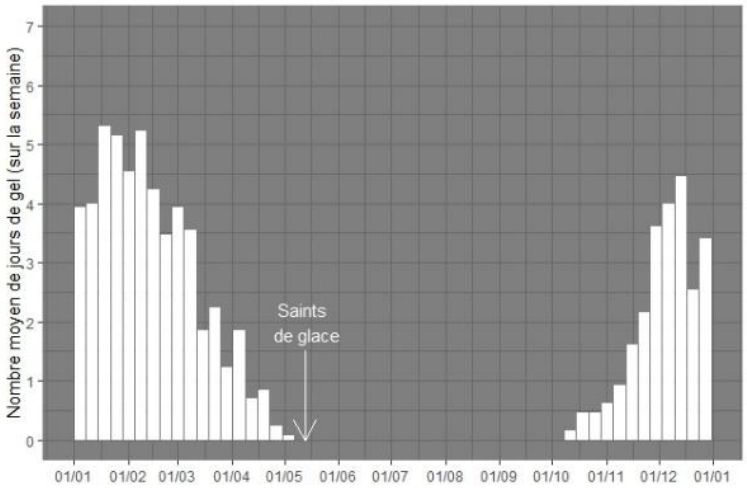


Figure 26 : Nombre moyen de jours de gel par semaine au long de l'année dans mon potager (calculé sur la période 2010-2022).

Stress de chaleur

Le stress de chaleur commence vers 35-40 °C. Les effets en sont visibles : les feuilles se replient, subissent des coups de soleil, voire tombent ; les fruits perdent leur couleur ; et la production, globalement, chute. De façon moins évidente, nous avons vu précédemment que le stress de chaleur pouvait réduire le taux net de photosynthèse du fait de la photorespiration chez les plantes C3 ; mais il modifie également d'autres activités métaboliques, diminue la

pollinisation et la mise à fruit. Sans compter le fait qu'un stress de chaleur est généralement combiné avec un stress hydrique, voire un stress oxydant, handicapant plus encore la production. Il existe des adaptations, des feuilles en particulier : présence de poils, feuilles cireuses, feuilles orientées verticalement plutôt que face au soleil... Les plantes les plus résistantes au stress de chaleur sont celles à photosynthèse C4.

Pour la tomate (Hazra et al, 2007), à partir de températures journalières moyennes de 28-29 °C, pourtant pas si éloignées de la zone optimale de 20-25 °C, les problèmes commencent. Si la plante semble encore fonctionner normalement, il y a pourtant déjà une réduction de la mise à fruit, des fruits plus petits et de moindre qualité. De plus (Peet et al.,1997), des températures de nuit qui sont idéalement de 15-20 °C, peuvent être dépassées lors de canicules, et nuire à la production. La période la plus sensible est une à deux semaines avant l'anthèse (l'ouverture des fleurs). En clair, nous sommes sur un optimum de 27 °C le jour et 15 °C la nuit ; il existe de nettes différences variétales de ce point de vue, et les essais de divers auteurs montrent l'intérêt de variétés tolérantes.

Pour le poivron, Erickson et al. (2011) indiquent que la mise à fruit est réduite lorsque la température journalière dépasse 32 °C. Le haricot, lui, présente une grande sensibilité aux températures (Konsens et al., 1991), tant basses (pour la germination, par exemple) que hautes. C'est en fait un légume plutôt adapté à des températures modérées. Les périodes de fortes températures sont associées à des baisses de mise à fruit (les gousses). Abou-Hussein (2012) insiste également sur la qualité de la récolte qui est altérée, avec des haricots plus fibreux.

Le pois doit rester une culture de saison fraîche, pas trop tardive, car au-dessus de 25-26 °C, la récolte est également réduite (Muehlbauer & McPhee, 1997, cités dans Abou-Hussein, 2012).

Pour finir, Abou-Hussein (2012) développe le cas complexe du stress de température chez la pomme de terre. La tubérisation est induite par de faibles températures et une courte photopériode. Elle doit donc être plantée tôt, pour ne pas récolter que des feuilles ; mais, si ses températures de croissance sont assez basses pour une solanacée, elle reste néanmoins fidèle à sa famille, en supportant très mal le gel. Sur

un grand nombre de variétés classiquement cultivées, aucune ne survit à un gel de -2.5 °C (Li et al., 1981). Aucune croissance n'est possible en deçà de 2 °C (Kooman & Haverkort,1995). La fenêtre est donc réduite ! Il semble indispensable d'envisager un étalement des cultures et une protection efficace.

2.2.3 Thermopériodisme

S'il existe une température de croissance optimale qu'il faut essayer d'approcher en conditions contrôlées (semis indirects, châssis, serre), il s'avère qu'être constamment à cette température n'est pas forcément la meilleure solution. Went (1944) a mis en lumière, pour la tomate, le phénomène de thermopériodisme. Il s'agit d'alterner des températures de jour, autour de 25 °C, avec des températures de nuit plus basses ($<$ 20 °C), ce qui permet une croissance et une mise à fruit plus rapides, et une récolte plus abondante. Le thermopériodisme a été observé pour d'autres légumes, comme le piment, le concombre, le haricot...

2.2.4 Vernalisation et montaison prématurée

La vernalisation est le déclenchement de la floraison par les méristèmes, en réponse à de faibles températures. C'est un phénomène absolument normal pour une bisannuelle comme, par exemple, la bette ; mais il est possible que le phénomène se produise en première année, si elle est plantée tôt et subit un coup de froid : on parle alors de montaison prématurée. La montaison est le changement qui conduit à la reproduction par apparition d'une hampe florale. Dans la montaison prématurée, la plante ne peut accomplir son cycle de développement complet et, par conséquent, ne peut fournir une récolte intéressante (pour une carotte, par exemple). La montaison prématurée peut aussi altérer le goût ou la texture du légume (pour une laitue), ou la taille de sa partie comestible, qui est justement l'inflorescence chez le brocoli et le chou-fleur.

Wiebe (1989) a résumé les conditions de vernalisation des principales espèces légumières (*cf.* tableau « Vernalisation des légumes » disponible en annexe). La température usuelle de vernalisation n'est pas très basse, plutôt entre 5 et 8 °C, mais peut aller à 10 °C, voire 14 °C. Les choux chinois et, dans une moindre

mesure, le chou-fleur et le brocoli, y sont sensibles jusqu'à 20 °C, et doivent donc être plantés plus tard. La vernalisation peut être annulée par de fortes températures suivant la période de froid, un phénomène appelé dévernalisation. Pour vernaliser, il est souvent nécessaire chez les bisannuelles que la plante ait atteint un certain stade de développement, repéré par un nombre de feuilles. Ce n'est pas le cas avec les annuelles, qui peuvent y être sensibles dès la germination, comme la chicorée par exemple. Il y a des espèces, essentiellement les bisannuelles, pour lesquelles la vernalisation est obligatoire ; et d'autres pour lesquelles elle est facultative (épinard, laitue, endive, pois) ; d'autres facteurs prédominent dans ce cas, comme le stress hydrique ou la fertilisation. L'étude de Waycott (1995) montre, pour la laitue, que c'est le photopériodisme qui est déterminant, la température ne jouant qu'un rôle de renforcement.

Les situations les plus délicates sont, par exemple, la plantation d'oignons qui peuvent, s'ils sont trop développés à l'entrée de l'hiver, monter rapidement sans produire de bulbes ; ou bien les choux chinois (et plus généralement les verdures asiatiques de l'espèce *Brassica rapa*), pour lesquels il vaut mieux attendre la saison chaude.

La laitue et le radis sont des plantes de jours longs quantitatives, ce qui signifie qu'elles peuvent également monter en jours courts, mais que la longueur du jour accélère la vitesse de montaison. Les températures élevées sont dans ce cas un facteur supplémentaire, qui avance la montaison...

Les solutions à la montaison sont : (1) de choisir des cultivars adaptés, il existe, par exemple, des cultivars de laitue de jours longs qui ne sont pas adaptés à la culture d'été, et des cultivars de jours neutres qui conviennent *mieux* ; (2) pour les légumes sensibles à la vernalisation, il convient de ne pas semer et de ne pas planter trop tôt ; (3) pour les cultures sensibles aux jours longs et aux températures élevées, il faut se souvenir qu'on parle de manger des légumes de saison, et de ne pas vouloir absolument obtenir des radis ou des laitues en été ; (4) pour la production des plants, où les conditions sont plus maîtrisables qu'en plein champ, il faut éviter le froid, par exemple pour les céleris en fin d'hiver, et le chaud, par exemple pour les laitues ou les épinards en fin d'été.

2.3 Facteurs de variation de la température

La température est, en grande partie, une conséquence des facteurs de variation des radiations solaires (évoqués dans le chapitre précédent), de leur transmission dans l'atmosphère, de l'angle avec lequel elles atteignent la surface terrestre, et de la nature même de cette surface.

2.3.1 Macrovariations à l'échelle de la France

Sans surprise, la latitude va avoir une influence sur la moyenne des températures annuelles, mais aussi sur leur amplitude : les différences étant plus marquées au nord. L'altitude va, là encore, jouer un rôle et on observe, en moyenne, une baisse de 0.6 °C pour cent mètres d'élévation : à cause, d'une part, de la baisse de la pression atmosphérique, et d'autre part, du fait qu'il y a une plus grande re-radiation durant la nuit, ce qui entraîne des températures (de nuit) encore plus basses. Ces spécificités des climats de montagne expliquent le retard dans leurs calendriers de culture.

Le nouveau facteur est la présence de grandes masses d'eau, océan Atlantique en particulier (ou à l'inverse, la continentalité). L'eau possède en effet une capacité thermique massique élevée, et va avoir un effet tampon sur les températures, en limitant leur amplitude dans les zones « côtières » ; ceci étant couplé à des précipitations différentes.

La Figure 27 illustre ces trois effets de latitude, d'altitude et de continentalité sur les températures mensuelles de quatre villes françaises ; considérant, pour aider à la visualisation, deux températures de référence : 5 °C pour les légumes rustiques et 15 °C pour les légumes délicats. La ville de Montpellier est propice aux cultures fragiles et à une saison de culture allongée. Au contraire, la ville du Puy-en-Velay, située à 750 mètres d'altitude, plus au nord et loin des côtes, présente une saison de croissance limitée. La ville de Nantes est celle qui possède la plus faible amplitude, on peut parler de « douceur du climat ». Enfin, la ville de Strasbourg, plus septentrionale et continentale, offre un climat plus froid et plus contrasté.

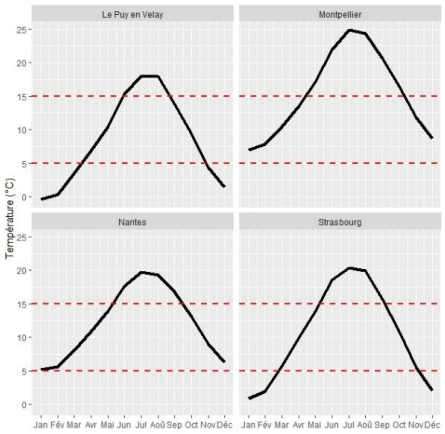


Figure 27 : Températures moyennes mensuelles dans quatre villes françaises sur la période 2010-2022.

La carte de Joly et al. (2010) résume clairement ces informations climatiques[83]. Elle souligne le rôle de trois pôles dans la constitution de notre climat métropolitain : l'Atlantique, la Méditerranée et « la » montagne. Tous les potagers ne jouent pas dans la même catégorie, et les écarts d'implantation peuvent être d'un bon mois.

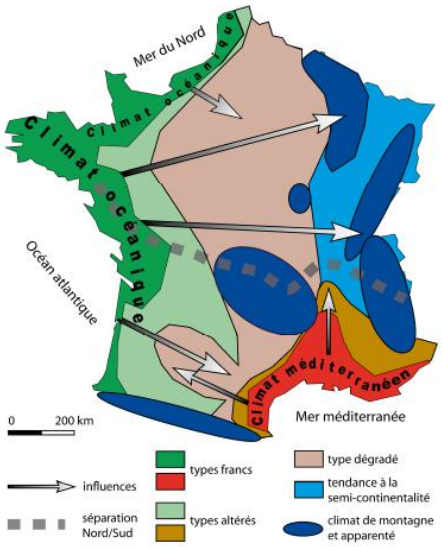


Figure 28 : Les climats français (tiré de Joly et al., 2010)

[83] Cette carte est basée sur les températures et précipitations mesurées par les stations de Météo-France de 1970 à 2000. L'article présente l'avantage d'expliciter son mode de construction, ce qui n'est pas toujours le cas des cartes de climat.

2.3.2 Mésovariations à l'échelle du paysage

Au sein des zones climatiques, la présence de plus petites masses d'eau peut créer un effet tampon. Les reliefs locaux, l'orientation et l'inclinaison vont aussi modifier le cycles annuel et le cycle journalier de température.

Pour ceux qui ont un potager en ville, ils vont devoir tenir compte de l'effet îlot de chaleur urbaine. Il a été montré que la température est plus élevée en ville que dans sa banlieue ou dans la campagne environnante. Cela est dû à des surfaces, souvent imperméables, qui réduisent l'évaporation ; à des surfaces qui absorbent plus les radiations et les stockent ; et à la moindre présence de végétation et de plans d'eau. Cet effet est plus fort en été qu'en hiver[84], et plus fort le jour que la nuit (Peng et al. 2012). En été, cet effet peut largement aller de 2 °C à 6 °C, et devient dangereux pour les plantes et leur jardinier. Il est même observé dans des villes de petite taille (Hein et al., 2015).

Par conséquent, il convient de connaître, pour sa *propre* localisation, les données climatiques récentes, ce que permettent les outils informatiques proposés dans la section « Ctrl-R ».

En ce qui concerne mon potager, situé à 25 kilomètres de Lyon et à une altitude de 350 mètres, la Figure 29 indique la température minimale, moyenne et maximale mensuelle, sur la période 2010-2022. La ligne des 5 °C nous amène à une installation de printemps début mars, et une installation pour l'hiver au plus tard en octobre. La ligne de 15 °C suggère la mise en place des cultures d'été à partir de la mi-mai[85].

La considération des températures minimale et maximale, et concomitamment des températures de stress des plantes, laisse imaginer la sécurité qu'apportent des dispositifs contre le froid et le chaud.

---

[84] Où il est alors « intéressant ».

[85] L'étiquette du mois indiquée sur la figure est placée en son milieu.

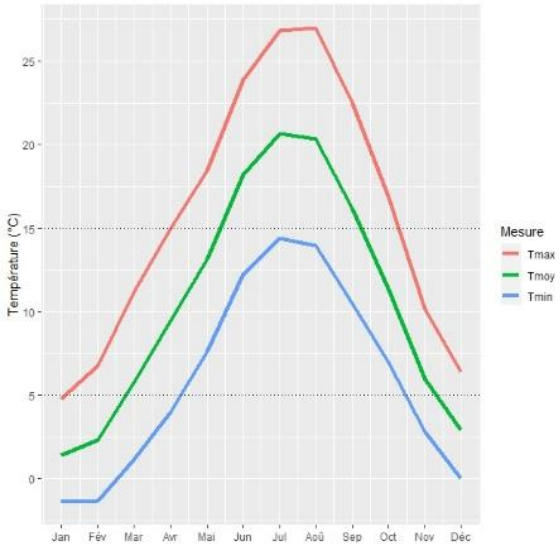


Figure 29 : Températures mensuelles (minimale, moyenne et maximale) pour Lentilly, une commune proche de Lyon où est situé mon propre potager. Données moyennes sur la période 2010-2022.

Cependant, au sein d'une même journée (Figure 30), ces dispositifs sont peut-être à modifier. En saison froide, les couvertures thermiques, nécessaires la nuit, réduisent finalement la (déjà) faible luminosité de jour. Inversement, en saison chaude, des dispositifs d'ombrage sont surtout utiles dans l'après-midi.

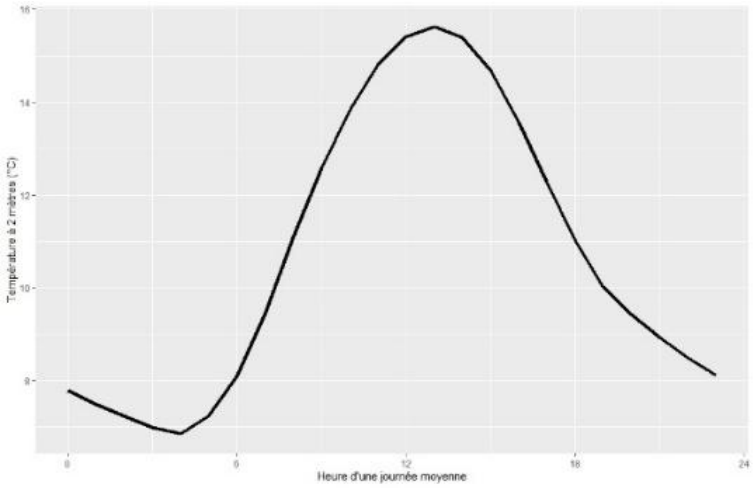


Figure 30 : Température d'une journée moyenne dans mon potager (sur la période 2010-2022).

2.3.3 Microvariations à l'échelle du potager

La topographie et la présence d'obstacles, déjà évoqués pour la lumière, sont aussi des facteurs de variation de température à petite échelle : on parle de microclimats ; et nous verrons, dans la section suivante, les stratégies disponibles pour les mettre en place.

Néanmoins, jusqu'à présent, nous avons uniquement parlé de la température de l'air : il faut en venir à la température du sol. De façon générale, une augmentation de la température du sol hâte la germination, l'émergence, la croissance de la plante et la précocité de récolte (Willis & Larson, 1957). Indirectement, elle régule l'activité métabolique des organismes du sol, qui vont largement contribuer à la nutrition des plantes. Il est possible d'avoir des repiquages qui ne *décollent* pas, à cause d'une température du sol trop basse.

La température dans le sol provient de la diffusion de l'énergie thermique, d'origine radiative, depuis la surface. Elle peut être modélisée par une équation de transfert de chaleur (à diffusivité thermique constante) :

$$T(t,z)=T_m+A\exp(-z/d)\cos(\omega(t-t_0)-z/d) \text{ où } d=(2D/\omega)^{1/2}.$$

Les deux variables sont t le jour de l'année et z la profondeur. Les paramètres sont T_m la température moyenne sur l'année, $A=(T_{min}-T_{max})/2$ est l'amplitude des variations de température, t_0 le moment où la température maximale est atteinte, $\omega=2\pi/P$ où P est la période du cycle (365 ici, mais on peut appliquer l'équation sur une journée, Gülser et Ekberli, 2004) ; enfin, D est la diffusivité thermique.

La température moyenne annuelle (Figure 31) est identique à toutes les profondeurs, mais l'amplitude décroît exponentiellement depuis la surface. Le fait le plus important pour le potager est qu'il y a un déphasage linéaire de la température du sol : elle a un « retard » par rapport à la température à la surface. Cela signifie que le sol va rester froid plus longtemps en fin d'hiver que peut le laisser penser la température de l'air, d'où les problèmes déjà évoqué pour la germination et la nutrition ; et, à l'inverse, que le sol va rester chaud plus longtemps en automne, permettant à des semis tardifs d'émerger malgré tout.

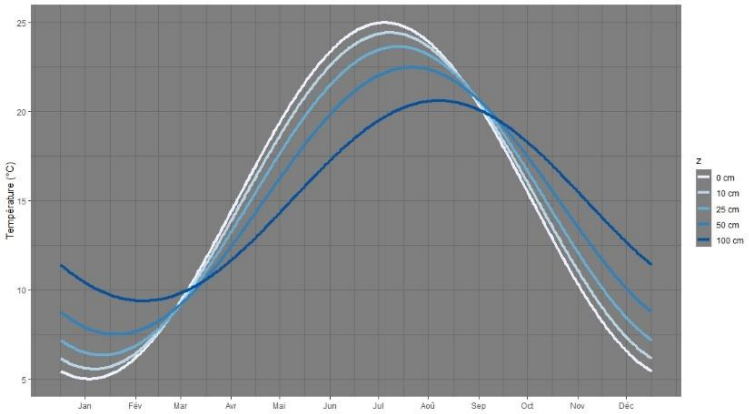


Figure 31 : Températures du sol sur l'année, différenciées selon la profondeur (avec ici D=3×10^{-7} m^2/s).

Tous les sols n'ont pas la même diffusivité : elle est plus grande dans le sable, puis dans les limons, que dans les argiles (Lukiashchenko & Arkhangelskaya, 2018) : un sol sableux réchauffera donc plus vite au printemps. Enfin, un sol plus humide permet une meilleure diffusion. Notons que nous avons un peu simplifié les choses : la diffusivité n'est pas toujours constante selon les horizons de sol.

2.4 Gestion de la température

2.4.1 Gestion des températures élevées

Il est, bien sûr, nécessaire de gérer les hautes températures : à cet effet, de nombreuses solutions ont déjà été mises en avant dans le chapitre consacré à la lumière. Je n'ai pas, toutefois, abordé un élément déterminant : l'irrigation.

La température des feuilles a un effet sur la transpiration, la respiration et la photosynthèse. Les plantes montrent une capacité d'adaptation, au cours de la saison ou selon leur localisation : elles parviennent à ajuster leur température optimale de photosynthèse.

Elles sont également capables de thermoréguler par rapport à leur environnement : plus chaudes s'il fait frais, et plus froides s'il fait chaud. Les plantes ne sont donc pas poïkilothermes, c'est-à-dire avec une température interne qui varie complètement en fonction de la température extérieure. La faculté de thermorégulation est reliée à la forme et à l'épaisseur des feuilles. Même s'il existe une grande variation

de réponses thermales selon les espèces et les environnements, Michaletz et al. (2016) montrent, sur le plan théorique et empirique, que la température des feuilles opère un découplage par rapport à la température de l'air, avec une augmentation de 0.70-0.75 °C de la température de la feuille pour une augmentation de 1 °C de la température ambiante : on parle d'homéothermie. Finalement, la température des feuilles est rarement égale à celle de l'air, sauf vers 30 °C (Figure 32).

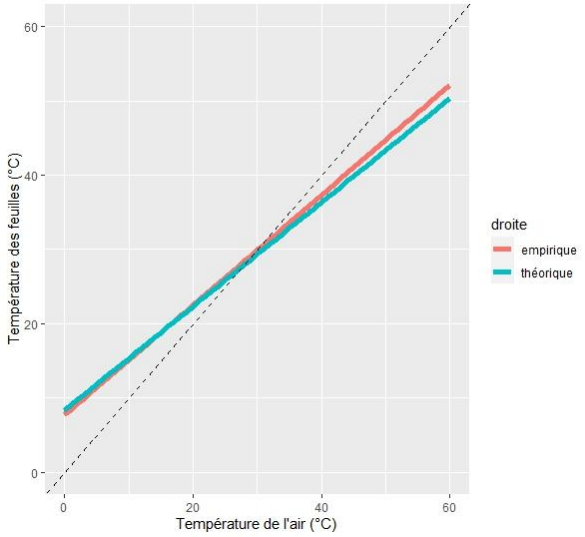


Figure 32 : Température des feuilles en fonction de la température de l'air. Modèle théorique basé sur un budget énergétique et modèle empirique ajusté à 1 504 feuilles (Michaletz et al., 2016).

Cette capacité de thermorégulation, très intéressante à haute température, est en revanche affectée par le stress hydrique (Linacre, 1964). Des plantes bien hydratées peuvent avoir des températures de 5-10 °C plus basses que l'air ambiant, grâce à une transpiration abondante, et avoir ainsi la capacité de mieux résister, et même de continuer à réaliser de la photosynthèse. Parallèlement, les micro-organismes du sol ont aussi besoin d'eau pour continuer à assurer la minéralisation de la matière organique, et la nutrition de nos légumes. Veiller à ce que nos cultures disposent d'eau tout au long de l'été est le moyen *le plus naturel* de les protéger. Voilà, toute vérité n'est pas bonne à lire. Maintenant, la suite de la discussion portera sur la gestion du froid.

2.4.2 La bonne plante au bon moment au bon endroit

> Du côté de chez Stéphane : La Quintinie, jardinier du Potager du Roy, parvenait à produire des melons dès le mois d'avril, grâce à des couches chaudes, des cloches en verre et des couvertures. Avec quel goût ? Louis XIV n'avait peut-être pas de palais ? À part Versailles, bien entendu.

Le premier principe est, contrairement à La Quintinie, d'installer la bonne plante au bon moment au bon endroit. On peut rêver de cultiver des melons au Puy-en-Velay, mais le succès est plutôt à chercher du côté de la lentille. On peut rêver de cultiver des laitues en été à Montpellier, mais ce sera aussi très compliqué. Je n'empêche personne de se dépasser, mais il faut mettre son clignotant !

D'après Prasad et Chakravorty (2015), la laitue est un peu une exception. Bien qu'originaire d'une zone plutôt tempérée, elle supporte assez mal l'approche du 0 °C. Ceci dit, au sein d'une même espèce, les cultivars permettent de jouer sur la rusticité, la précocité, la rapidité, ou la résistance à la chaleur et à la montaison. Si j'en crois la liste EUPVP (*European Commission Plant Variety Portal*), au 22 décembre 2023, il existait en Europe 5845 cultivars de laitue et 9006 cultivars de tomate ! Il doit donc être possible de minimiser les risques de problèmes. Une autre solution est de miser sur les cultivars locaux. Si je prends la région lyonnaise où j'habite, on peut cultiver en confiance le poireau 'Bleu de Solaize', la 'Bette à cardes blanches de Lyon' (ou d'Ampuis), le 'Cardon Vert de Vaulx-en-Velin', la laitue[86] 'Frisée de Beauregard', la 'Laitue de Pierre-Bénite' et d'autres encore (Crozat et al. 2010).

[86] Plus connue sous le nom de 'Reine des Glaces'.

2.4.3 Calendrier de semis « Yin et Yang »

Thompson (2008), dans ce qu'il appelle sa *vue simpliste du monde*[87], résume le problème de l'installation (semis ou plantation) à deux situations. D'une part, pour les cultures délicates (tomate, haricot, celles qui sont dans les zones orange de la Figure 21), il va falloir dépasser la date des derniers gels. D'autre part, pour ce qui est des autres cultures (laitue, radis, celles qui sont dans les zones blanches de la Figure 21), il faut en gros que la température dépasse 5° C. En effet, en deçà de cette limite, soit il n'y a pas de germination, soit elle est très lente et, pour ce qui est d'une plantation, elle est aussi très ralentie (Figure 24). Thompson conclut qu'un conseil général reste difficile à donner, car la localisation, l'altitude, l'exposition (et les particularités de l'année) varient.

Ceci dit, nous pouvons, en partant des coordonnées géographiques de chaque emplacement, nous baser sur les données climatiques récentes, afin de déterminer approximativement ces deux moments. Ainsi, pour ce qui est de mon potager par exemple, la Figure 29 indique la température moyenne, et il suffit donc de trouver la date qui correspond au passage des 5 °C pour les cultures rustiques. Je propose, dans la section « Ctrl-R », une procédure informatique qui calcule automatiquement cette date, selon n'importe quelles coordonnées GPS. Pour mon cas, ce sera le 15 mars[88] (Figure 33).

De la même façon, un coup d'œil à la Figure 26 nous permet de savoir, toujours dans mon cas, que la deuxième semaine de mai permettra l'installation des tomates (en anglais : *to-may-to*) et autres, en toute quiétude.

Pour le jardinier qui a besoin de magie, et qui regrette le calendrier lunaire biodynamique[89], je propose d'appeler cette méthode le *calendrier Yin et Yang*. Le Yin, relié au froid, qui donne les dates de semis pour la laitue ; et le yang, relié au chaud, celles pour la tomate.

---

[87] Il est quand même professeur d'écologie des plantes à l'université de Sheffield (GB), et jardinier passionné.

[88] Avec une fourchette de ±1.5 jours

[89] En fait je n'ai qu'un problème avec la biodynamie, c'est la biodynamie (voir le chapitre sur le calendrier lunaire).

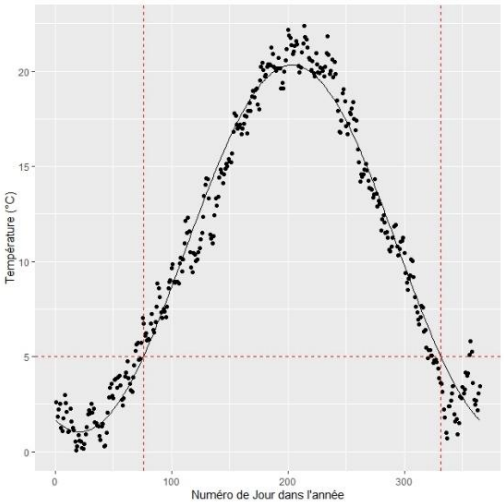


Figure 33 : Données journalières de la température moyenne pour la période de 2010-2022 dans mon potager. Une modélisation simple de type cosinusoïdal résume cette relation, et un calcul automatique permet de déterminer les deux dates correspondant au franchissement de la limite des 5 °C.

Le calendrier Yin et Yang forme donc la base du raisonnement. Mais ces données climatiques ne sont que des moyennes et, pour limiter les risques, il existe trois stratégies complémentaires de *timing*.

La première est de ne pas mettre toutes ses tomates cœur-de-bœuf dans le même panier. Il s'agit d'échelonner les installations, on peut se risquer à mettre en place en plein champ quelques plants de tomates vers la fin d'avril ou le début de mai, puis à attendre les traditionnels Saints de Glace pour compléter. De la même façon, risquer quelques graines de radis mi-février ou plantules de laitue début mars n'est pas déraisonnable, en réalisant ensuite des successions tous les quinze jours.

La deuxième stratégie est de garder l'œil sur les prévisions météorologiques, un outil dont les maraîchers des siècles précédents n'auraient pas osé rêver. Même si nous avions prévu notre semis de bette le 15 avril, une fenêtre annoncée de froid par rapport aux moyennes saisonnières devrait nous faire surseoir ; et au contraire, un redoux avancer notre projet. Il existe aussi des thermomètres de sol à bas prix, qui donnent des indications circonstanciées ; car nous avons pu, comme nous le verrons plus loin, prendre soin de modifier le

microclimat par divers dispositifs : bâche préalable, voile de croissance...

La troisième stratégie est de réaliser, le plus souvent possible, des semis indirects. Les nombreux avantages en sont décrits plus loin, mais, en ce qui concerne la gestion de la température, il est évident : premièrement, que la germination et les débuts de la plantule peuvent se dérouler dans des conditions bien mieux contrôlées à l'intérieur ; deuxièmement, que nous gagnons du temps en pouvant démarrer un mois à l'avance par rapport à des semis directs ; troisièmement, que la culture occupe moins longtemps l'espace au champ, et que nous pouvons envisager de multiplier les successions et, en particulier, de récolter une culture primeur de printemps avant d'implanter les cultures d'été mi-mai[90] ; et quatrièmement, en cas de mauvaises conditions météorologiques, qu'il est possible de prolonger le séjour à l'intérieur d'une ou deux semaines, sans handicaper la suite. L'utilisation de semis indirects oblige, et c'est plutôt un bien, à une planification annuelle de ses cultures.

Notons que je n'ai pas évoqué les semis d'automne. Il me semble possible de baser à nouveau le raisonnement sur la barre des 5 °C, après laquelle il y aura très peu de pousse. Le même algorithme donne pour mon potager la date du 26 novembre, il faut donc, selon la culture, prendre en compte son temps jusqu'à la récolte en réalisant une sorte de rétroplanning. Pour une laitue, le tableau en annexe[91] donne 65

---

[90] En effet, imaginons que nous comparions une culture de laitue en semis direct au 15 mars avec une culture plantée le même jour, mais qui a démarré depuis un mois à l'intérieur. Une culture, pour être récoltée, doit atteindre une certaine somme de chaleur HS, ce qui prend un certain nombre de jours J. Le semis direct, dans son dernier mois de pousse, va accumuler une somme HS2 de chaleur. Or, pendant son mois à l'intérieur, proche de la température optimale, le semis indirect aura accumulé comparativement une somme HS2* plus élevée. Donc la somme de chaleur HS1* (HS1*+HS2*=HS) qui lui reste à accumuler au champ est plus petite que le HS1 du semis direct (HS1+HS2=HS). Conséquemment, il lui faut moins de jours pour compléter cette période (celle avant le dernier mois) ET il y a un mois en moins. Cela peut faire au final une différence considérable et permettre de finir le cycle avant l'installation des cultures d'été.

[91] Qui se nomme : Durée (jours) avant récolte.

jours, c'est donc vers le 20 septembre que s'effectueraient les derniers semis.

Une remarque en passant concernant la culture d'hiver : la fertilisation a également un effet sur la capacité des légumes à résister au froid. Une trop grande fertilisation azotée retarde la dormance et expose la plante aux dommages, alors qu'une fertilisation au potassium a tendance à être protectrice.

Une tout autre façon de s'y prendre pour construire un calendrier de semis est d'utiliser la phénologie. Il est ainsi de coutume de planter les pommes de terre quand les lilas fleurissent. Les plantes règlent, en effet, certains événements comme leur floraison en fonction de la température (et de la longueur des jours). Cela peut nous indiquer si la saison est « en avance », ou « en retard », et nous permettre d'agir en conséquence. Je peux ainsi, dans mon potager, me régler sur la floraison spectaculaire d'un prunier sauvage autour du 15 mars, pour lancer les semis de printemps. La saison poussante est définie phénologiquement comme la période entre le débourrement et la chute des feuilles des arbres (Linderholm, 2006). Une étude sur l'ensemble de l'Europe montre que, sur la période 1959-1996, les événements du printemps sont avancés de 6.3 jours, et ceux d'automne sont retardés de 4.5 jours, soit un allongement de 10.8 jours. Il est possible également de définir climatiquement la saison poussante, comme la période entre le dernier gel du printemps et le premier gel de l'automne. La période de jours sans gel a également augmenté, avec des résultats proches des précédents. L'intérêt de l'allongement de la saison poussante pour le potager est de permettre des plantations plus tôt et plus tard, d'offrir une période de maturation plus longue, et de multiplier les successions. Au-delà des plantes, l'allongement de la saison a aussi un effet sur les autres organismes vivants : les organismes du sol, les insectes bénéfiques ou pas...

2.4.4 Dispositifs contre le froid

Nous avons abordé dans le chapitre précédent le choix d'un emplacement judicieux du potager dans le jardin, en prenant en compte les ombres portées et la topographie du terrain (orientation et pente) ; sans négliger la possibilité de réaliser des ados ou des côtières.

Les jardiniers savent ainsi avancer les cultures depuis belle lurette, belle lurette étant, en tout cas, située avant Moreau et Daverne (1845) qui rapportent déjà l'intérêt de ces techniques[92].

Il est également classique d'employer des systèmes de couverture de culture ou de couverture du sol pour élever la température. Bienvenue en plasticulture (Lamont, 2005) !

Les couvertures de culture sont des matériaux en plastique transparents, soit flottants sur les cultures, soit supportés par des arceaux pour éviter un contact direct. Dans ce dernier cas, on distingue les grands tunnels, où l'on se tient debout, et les petits tunnels[93] ; ils sont tous non chauffés. Initialement, ces protections servaient essentiellement au forçage de printemps ou d'automne, pour allonger la saison de pousse ; mais leur emploi s'est étendu à l'hivernage et à la protection contre les insectes et les virus qui parfois les accompagnent.

En ce qui concerne l'extension de la saison et la production de légumes primeurs, il a été démontré un effet sur la précocité, avec un gain pour la laitue pouvant aller de 1 à 4 jours, mais étendu jusqu'à 10 jours si une protection de sol était combinée avec une protection de culture. Les protections offrent une assurance contre le gel de 1 à 3 °C. Lorsque les températures sont au-dessus de zéro, c'est surtout le maximum journalier qui est affecté, plus que le minimum qui reste similaire. Il faut même se méfier et prévoir des techniques d'aération en journée chaude pour que les températures ne deviennent pas dommageables. Il y a également un effet sur la qualité des cultures, car le vent est réduit, et les attaques des insectes sont fortement diminuées ; en revanche, la présence des insectes bénéfiques (pollinisateurs en particulier) baisse également. La luminosité est réduite, et les indications données par les constructeurs (85 % de transmission) ne valent que pour les voiles neufs. Des valeurs de l'ordre de 65 % ont été relevées sinon.

Les protections ont offert de nouvelles perspectives pour la culture hivernale. Il s'avère, en fait, que c'est pour des températures très basses

---

[92] Une édition en ligne est disponible : https://fr.wikisource.org

[93] Les petits tunnels offrent l'avantage d'un prix vraiment concurrentiel, d'un moindre encombrement pour un petit jardin et d'une grande aisance de manipulation.

que le différentiel est le plus grand entre la protection et l'extérieur ; il y a un effet tampon : cela n'empêche pas de geler, mais en limite les conséquences (Sideman et al., 2012). Des systèmes de double couverture (petit tunnel dans un grand tunnel[94]) ont donné des résultats très intéressants (10-15 °C de plus par rapport à l'extérieur pour les températures minimales).

En revanche, ces dispositifs sont moins efficaces en ce qui concerne la production de plants. En effet, les racines sont plus sensibles que la partie aérienne, et il faut prendre des précautions particulières pour les protéger, comme des chauffages ponctuels.

Les couvertures de sol sont employées pour modifier le « budget radiatif », en changeant la quantité de lumière qui est réfléchie, transmise ou absorbée. On ne considérera pas ici leur effet sur la rétention en eau ou sur l'érosion éolienne, mais uniquement sur la température. Les plus utilisées sont les bâches plastiques noires qui élèvent, sur 5 cm de profondeur, la température de 2 à 3 °C. Plus performantes de ce point de vue, les bâches plastiques transparentes parviennent à une augmentation de 4 à 8 °C. Deux timings sont possibles avec les bâches : soit avant la culture[95], pour élever la température du sol (par conséquent, plutôt des bâches transparentes), ce qui est essentiel pour un semis direct ; soit en installant les plantules dans une bâche trouée, plutôt noire alors, pour maîtriser simultanément les adventices.

2.4.5 Soudure

La soudure est une période particulière au potager s'étendant, selon les régions, de mars à mai. Il s'agit de ne pas avoir de « trou » entre les récoltes d'hiver qui s'épuisent et celles de printemps qui se font attendre ; et d'obtenir des légumes frais en « primeur ».

Si la lumière et la température font défaut de décembre à février, nous avons au moins de l'eau. Pour ce qui est de l'installation d'une laitue, par exemple, nous nous retrouvons dans le cas de la Figure 23,

---

[94] On peut *supposer* qu'un voile de forçage posé dans un petit tunnel transparent a aussi un effet positif.

[95] Et seulement jusqu'à l'émergence !

tout à gauche sur l'axe du temps et, si nous attendons le 15 mars, la durée avant la récolte va être de l'ordre de 60-70 jours après la plantation : nous aurons donc raté la soudure. C'est dur.

Il existe, dès lors, deux choix : installer les cultures en automne et leur faire passer l'hiver sous forme de plantules ; ou bien démarrer en fin d'hiver, en deçà de la barre des 5 °C. Dans les deux cas, c'est un calendrier très délicat à mettre en place.

La stratégie d'automne consiste donc à miser sur des espèces rustiques et à prévoir des protections pour les périodes de fort gel. Je propose dans la Figure 34 une éphéméride qui correspond à mon potager lyonnais, afin de pouvoir, à la fois, récolter des légumes l'hiver et réaliser la soudure.

> Du côté de chez Stéphane : Lorsque les cultures d'été sont toutes retirées en octobre, je remplis complètement le potager grâce aux nombreux semis indirects de septembre. L'objectif est toujours d'intercepter le maximum d'énergie solaire, d'espérer une récolte d'hiver et de début de printemps ; mais aussi de protéger le sol, de piéger ses nitrates[96] et de le « travailler », par les racines des plantes.

La stratégie de fin d'hiver repose sur une combinaison de tactiques : (1) cultivars précoces et rapides[97] ; (2) semis indirects, même pour des navets ou des radis ; (3) montée en température du sol avant installation par des bâches transparentes ; (4) forçage après installation à l'aide de voiles de croissance ou de mini-tunnels, voire des bâches noires ; (5) emploi d'engrais coup de fouet, de type sang, guano, car les organismes du sol ont du mal à cette température à minéraliser ; et

---

[96] Nous l'avons évoqué, mais l'azote est un élément indispensable aux légumes. Or, s'il est dans le sol sous la forme de nitrates, il se laisse facilement lixivier en hiver. On se retrouve au printemps avec un sol vidé, qui a, de plus, du mal à redémarrer à cause de la température Les résidus de nos légumes d'hiver sont très azotés, et permettront une remise en jeu d'azote assez rapide.

[97] Comme le cresson alénois, la roquette, les verdures asiatiques, certains navets, des laitues 'de Saint Antoine'... Attention, rien n'est parfait, la montaison peut être très prématurée.

(6) prise de risques, répartie dans le temps : chaque semaine de nouvelles installations sont faites.

Figure 34 : Mon éphéméride approximative (à Lyon), pour des récoltes d'hiver et pour la soudure.

Enfin, (7) nous ne sommes pas obligés d'attendre que les légumes soient parvenus à maturité pour les récolter... Au lieu de planter une laitue tous les 20 cm, il est possible de réaliser un *overbooking*, en embarquant quatre laitues dans le même espace : lorsqu'elles seront parvenues au quart de leur croissance, la récolte sera la même. Dans des conditions certes différentes, la Figure 35 montre que cela semble se produire au bout des 2/3 de la durée avant récolte.

Globalement, comme nous allons le voir dans la section suivante, nos chances de succès dans la soudure ont augmenté *grâce* au changement climatique. Les jours de gel sont, en effet, moins nombreux et les températures moyennes plus élevées, même en hiver.

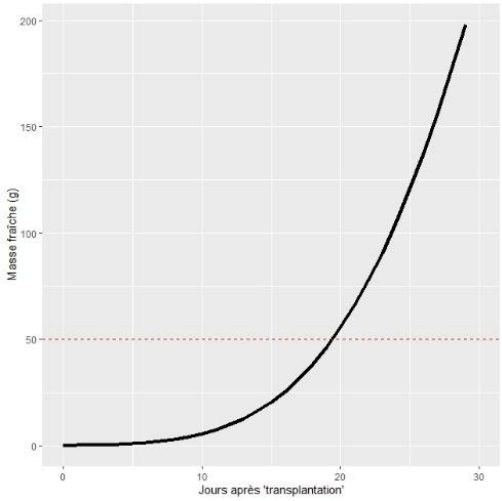


Figure 35 : Croissance de laitue d'après le modèle de Shimizu et al. (2008). Graines semées et repiquées après l'émergence sept jours plus tard, dans un système en hydroponie avec des conditions de croissance optimales.

2.5 Changement climatique et température

L'effet le plus connu du changement climatique est le réchauffement. Le rapport 6 du GIEC (2021) montre qu'il a déjà commencé, avec +1.1 °C par rapport au siècle précédent ; cependant, c'est beaucoup plus prononcé sur les terres (+1.6 °C), où nous cultivons, que dans les océans. Dès lors, il a été observé une plus grande fréquence des chaleurs extrêmes et, inversement, une moindre fréquence des froids extrêmes.

En ce qui concerne le futur, il est acquis que la température va, de toute façon, continuer à augmenter jusqu'en 2050. Plusieurs scénarios existent... l'être humain peut changer (au moins ses sous-vêtements)... Mais il est pratiquement certain que les continents vont se réchauffer plus vite encore, et très probable que les fréquences et intensités de chaleurs extrêmes vont encore augmenter, « ainsi que les sécheresses agricoles et écologiques (forte baisse de l'humidité des sols) dans certaines régions ».

Luo (2011) fait une revue des connaissances concernant l'impact des hautes températures sur les cultures. Il conclut que les limites de températures changent plus ou moins selon le stade phénologiques,

mais que la période la plus délicate est la période reproductive. Par exemple, pour le haricot vert comme pour la tomate, passer une température de 30 °C « autour » de la floraison, réduit significativement la récolte. Il cite ainsi une étude montrant que des plants poussant à 32/26 °C (jour/nuit) ne donnent que 10 % du nombre de fruits obtenus à 28/22 °C ! Il remarque qu'il convient de créer des modèles de croissance qui ne tiennent pas seulement compte de la température moyenne, comme avec les degrés-jours, mais aussi des extrêmes. Ainsi, dans le calendrier Yin et Yang, si une ville comme Montpellier dépasse toute l'année la barre des 5 °C, elle présente aussi une grande partie du temps des températures trop hautes pour permettre la culture de la laitue, et de forts risques pour les fleurs de tomates...

Le changement climatique va poser de nombreux problèmes pour les cultures d'été dans certaines régions ; et ils doivent être anticipés selon les stratégies précédemment avancées pour gérer la lumière et la température (et l'eau !). *A contrario*, il se peut que de nouvelles opportunités s'ouvrent pour élargir la saison poussante, devancer les dates de semis, espérer moins de gels sur les cultures d'hiver.

Reconsidérer les courbes de température mensuelle et journalière (Figure 29 et Figure 30), ainsi que celle du nombre de jours de gels (Figure 26), possiblement les plus récentes et établies selon sa localisation, me semble constituer un bon point de départ pour la réflexion.

2.6 Références

Abou-Hussein, S. D. (2012). Climate change and its impact on the productivity and quality of vegetable crops. *Journal of Applied Science Research*, *8*, 4359-4383.

Bierhuizen, J. F., & Wagenvoort, W. A. (1974). Some aspects of seed germination in vegetables. 1. The determination and application of heat sums and minimum temperature for germination. *Scientia Horticulturae*, *2*(3), 213-219.

Blonder, B., & Michaletz, S. T. (2018). A model for leaf temperature decoupling from air temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, *262*, 354-360.

Cha, M. K., Kim, C. S., Austin, J., & Cho, Y. Y. (2014). Comparison of cardinal temperatures of lettuce using bilinear, parabolic, and beta distribution functions. *Journal of Bio-Environment Control*, *23*(1), 39-42.

Crozat, S., Marchenay, P., & Bérard, L. (2010). *Fleurs, fruits, légumes* (pp. 160). Lyon, Editions lyonnaises d'art et d'histoire.

Erickson, A. N., & Markhart, A. H. (2001). Flower production, fruit set, and physiology of bell pepper during elevated temperature and vapor pressure deficit. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, *126*(6), 697-702.

Ferrante, A., & Mariani, L. (2018). Agronomic management for enhancing plant tolerance to abiotic stresses: High and low values of temperature, light intensity, and relative humidity. *Horticulturae*, *4*(3), 21.

Gardiner, J. (2013). New RHS hardiness ratings. *The Garden*, *138*(2), 68-69.

Geneve, R. L. (2003). Impact of temperature on seed dormancy. *HortScience*, *38*(3), 336-340.

Geneve, R. L. (2005). Some common misconceptions about seed dormancy. In *Combined Proceedings-International Plant Propagotors Society* (Vol. 55, p. 327). IPPS; 1998.

GIEC, 2021 : Résumé à l'intention des décideurs. In: Changement climatique 2021: les bases scientifiques physiques. Contribution du Groupe de travail I au sixième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [publiésous la direction de Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, et B. Zhou]. Cambridge University Press.

Gray, D., & Steckel, J. R. (1986). A relationship between sowing date and harvest date for radish (Raphanus sativus). *Journal of Horticultural Science*, *61*(3), 349-352.

Gülser, C., & Ekberli, İ. (2004). A comparison of estimated and measured diurnal soil temperature through a clay soil depth. *Journal of Applied Sciences*, *4*(3), 418-423.

Hatfield, J. L., & Prueger, J. H. (2015). Temperature extremes: Effect on plant growth and development. *Weather and Climate Extremes*, *10*, 4-10.

Hazra, P., Samsul, H. A., Sikder, D., & Peter, K. V. (2007). Breeding tomato (Lycopersicon esculentum Mill) resistant to high temperature stress. *International Journal of Plant Breeding*, *1*(1), 31-40.

Heimburger, H. V. (1924). Reactions of earthworms to temperature and atmospheric humidity. *Ecology*, *5*(3), 276-282.

Heinl, M., Hammerle, A., Tappeiner, U., & Leitinger, G. (2015). Determinants of urban–rural land surface temperature differences–A landscape scale perspective. *Landscape and Urban Planning*, *134*, 33-42.

Hodges, T. (1991). Temperature and water stress effects on phenology. *Predicting Crop Phenology*, 7-13.

Joly, D., Brossard, T., Cardot, H., Cavailhes, J., Hilal, M., & Wavresky, P. (2010). Les types de climats en France, une construction spatiale. *Cybergeo: European Journal of Geography*.

Kader, A. A., Lyons, J. M., & Morris, L. L. (1974). Postharvest responses of vegetables to preharvest field temperature. *HortScience*, *9*(6), 523-527.

Konsens, I., Ofir, M., & Kigel, J. (1991). The effect of temperature on the production and abscission of flowers and pods in snap bean (Phaseolus vulgaris L.). *Annals of Botany*, *67*(5), 391-399.

Kooman, P. L., & Haverkort, A. J. (1995). Modelling development and growth of the potato crop influenced by temperature and daylength: LINTUL-POTATO. In *Potato ecology and modelling of crops under conditions limiting growth* (pp. 41-59). Springer, Dordrecht.

Krug, H., & Liebig, H. P. (1980). Diurnal thermoperiodism of the cucumber. *Working-party on Greenhouse Cucumber 118*, 83-94.

Lamont, W. J. (2005). Plastics: Modifying the microclimate for the production of vegetable crops. *HortTechnology*, *15*(3), 477-481.

Li, P. H., Huner, N. P. A., Toivio-Kinnucan, M., Chen, H. H., & Palta, J. P. (1981). Potato freezing injury and survival, and their relationships to other stress. *American Potato Journal*, *58*(1), 15-29.

Linacre, E. T. (1964). A note on a feature of leaf and air temperatures. *Agricultural Meteorology*, *1*(1), 66-72.

Linderholm, H. W. (2006). Growing season changes in the last century. *Agricultural and Forest Meteorology*, *137*(1-2), 1-14.

Lukiashchenko, K. I., & Arkhangelskaya, T. A. (2018). Modelling thermal diffusivity of differently textured soils. *Eurasian Soil Science*, *51*, 183-189.

Luo, Q. (2011). Temperature thresholds and crop production: a review. *Climatic Change*, *109*(3-4), 583-598.

McCormick, J. I., Goodger, R. A., & Chynoweth, R. J. (2014). Cardinal temperatures and vernalisation requirements for a selection of vegetables for seed production. *Agronomy New Zealand*, *44*, 71-83.

McMaster, G. S., & Wilhelm, W. W. (1997). Growing degree-days: one equation, two interpretations. *Agricultural and Forest Meteorology*, *87*(4), 291-300.

Michaletz, S. T., Weiser, M. D., McDowell, N. G., Zhou, J., Kaspari, M., Helliker, B. R., & Enquist, B. J. (2016). The energetic and carbon economic origins of leaf thermoregulation. *Nature Plants, 2*(9), 1-9.

Milivojević, M., Ripka, Z., & Petrović, T. (2018). ISTA rules changes in seed germination testing at the beginning of the 21st century. *Journal on Processing and Energy in Agriculture*, *22*(1), 40-45.

Palme W. (2021) *Le potager au cœur de l'hiver*. Tana éditions, Paris.

Palme, W. (2021). Wintamines (Greenresilient Factsheet). Disponible en ligne.

Peng, S., Piao, S., Ciais, P., Friedlingstein, P., Ottle, C., Bréon, F. M., ... & Myneni, R. B. (2012). Surface urban heat island across 419 global big cities. *Environmental Science & Technology*, *46*(2), 696-703.

Pietikäinen, J., Pettersson, M., & Bååth, E. (2005). Comparison of temperature effects on soil respiration and bacterial and fungal growth rates. *FEMS Microbiology Ecology*, *52*(1), 49-58.

Porter, J. R., & Gawith, M. (1999). Temperatures and the growth and development of wheat: a review. *European Journal of Agronomy*, *10*(1), 23-36.

Prasad, B. V. G., & Chakravorty, S. (2015). Effects of climate change on vegetable cultivation-a review. *Nature Environment and Pollution Technology*, *14*(4), 923.

Ratte, H. T. (1984). Temperature and insect development. In *Environmental physiology and biochemistry of insects* (pp. 33-66). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Scott, S. J., Jones, R. A., & Williams, W. (1984). Review of data analysis methods for seed germination 1. *Crop Science*, *24*(6), 1192-1199.

Shimizu, H., Kushida, M., & Fujinuma, W. (2008). A growth model for leaf lettuce under greenhouse environments. *Environmental Control in Biology*, *46*(4), 211-219.

Sideman, R. G., Brown, A., Martin, C. A., Hazzard, R., & Cavanagh, A. (2012). Temperature moderating effects of low tunnels over winter in cool climates. *HortScience*, *47*(9), S404ÀS405.

Sideman, B. (2017). Row covers. In *A guide to the manufacture, performance, and potential of plastics in agriculture* (pp. 61-77). Elsevier.

Sousaraei, N., Torabi, B., Mashaiekhi, K., Soltani, E., & Mousavizadeh, S. J. (2021). Variation of seed germination response to temperature in tomato landraces: An adaptation strategy to environmental conditions. *Scientia horticulturae*, *281*, 109987.

Theurl, M. C., Hörtenhuber, S. J., Lindenthal, T., & Palme, W. (2017). Unheated soil-grown winter vegetables in Austria: Greenhouse gas emissions and socio-economic factors of diffusion potential. *Journal of Cleaner Production*, *151*, 134-144.

Tribouillois, H., Dürr, C., Demilly, D., Wagner, M. H., & Justes, E. (2016). Determination of germination response to temperature and water potential for a wide range of cover crop species and related functional groups. *PloS one*, *11*(8), e0161185.

Trudgill, D., Honek, A. D. L. I., Li, D., & van Straalen, N. M. (2005). Thermal time–concepts and utility. *Annals of Applied Biology*, *146*(1), 1-14.

Wagenvoort, W. A., & Bierhuizen, J. F. (1977). Some aspects of seed germination in vegetables. II. The effect of temperature fluctuation, depth of sowing, seed size and cultivar, on heat sum

and minimum temperature for germination. *Scientia Horticulturae*, *6*(4), 259-270.

Waycott, W. (1995). Photoperiodic response of genetically diverse lettuce accessions. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, *120*(3), 460-467.

Went, F. W. (1944). Plant growth under controlled conditions. II. Thermoperiodicity in growth and fruiting of the tomato. *American Journal of Botany*, 135-150.

Wiebe, H. J. (1989, August). Vernalization of vegetable crops-a review. In *VI Symposium on the Timing of Field Production of Vegetables 267* (pp. 323-328).

Yan, W., & Hunt, L. A. (1999). An equation for modelling the temperature response of plants using only the cardinal temperatures. *Annals of Botany*, *84*(5), 607-614.

Yin, X., Kropff, M. J., McLaren, G., & Visperas, R. M. (1995). A nonlinear model for crop development as a function of temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, *77*(1-2), 1-16.

Zalom, F. G., & Wilson, L. T. (1998, May). Predicting phenological events of California processing tomatoes. In *VI International Symposium on Processing Tomato & Workshop on Irrigation & Fertigation of Processing Tomato 487* (pp. 41-48).

Zhou, D., Barney, J., Ponder, M. A., & Welbaum, G. E. (2016). Germination response of six sweet basil (Ocimum basilicum) cultivars to temperature. *Seed Technology*, 43-51.

Źróbek-Sokolnik, A. (2012). Temperature stress and responses of plants. *Environmental adaptations and stress tolerance of plants in the era of climate change*, 113-134.

2.7 Ctrl-R

```
##################################################
########### TEMPERATURES MENSUELLES SUR 2010-2022
##################################################

require(nasapower)
daily_data <- get_power(
 community = "ag",
 lonlat = c(4.6633554,45.8179161),
 pars = c("T2M_MIN", "T2M_MAX", "T2M"),
 dates = c("2010-01-01", "2022-12-31"),
```

```
 temporal_api = "daily")
daily_data<-as.data.frame(daily_data)

Tn<-tapply(daily_data[,8],daily_data[,4],mean)
Tm<-tapply(daily_data[,10],daily_data[,4],mean)
Tx<-tapply(daily_data[,9],daily_data[,4],mean)
T<-c(Tn,Tm,Tx)
Mesure<-
factor(rep(c("Tmin","Tmoy","Tmax"),rep(12,3)),levels=c("Tmax"
,"Tmoy","Tmin"))
Mois<-rep(1:12,3)
month_data<-data.frame(T,Mesure,Mois)
Mois<-
c("Jan","Fév","Mar","Avr","Mai","Jun","Jul","Aoû","Sep",
"Oct","Nov","Déc")

require(ggplot2)
ggplot(data=month_data)+aes(x=Mois,y=T,group=Mesure,colour=Me
sure)+
geom_line(lwd=1.5)+
theme_gray()+xlab("")+ylab("Température (°C)")+
scale_x_continuous(breaks = 1:12,labels = Mois)+
geom_hline(yintercept=5, linetype="dotted")+
geom_hline(yintercept=15, linetype="dotted")+
scale_y_continuous(breaks = c(0,5,10,15,20,25))


##################################################
########## TEMPERATURES JOURNALIERES SUR 2010-2022
##################################################

require(nasapower)
hourly_data <- get_power(
 community = "ag",
 lonlat = c(4.6633554,45.8179161),
 pars = c("T2M"),
 dates = c("2010-01-01", "2022-12-31"),
 temporal_api = "hourly")
hourly_data<-as.data.frame(hourly_data)


T<-tapply(hourly_data[,7],hourly_data[,6],mean)
Heure<-0:23
hourly_data<-data.frame(T,Heure)

require(ggplot2)
ggplot(data=hourly_data)+aes(x=Heure,y=T)+
geom_line(lwd=1.5)+
theme_gray()+xlab("Heure d'une journée
 moyenne")+ylab("Température à 2 mètres (°C)")+
scale_x_continuous(breaks = c(0,6,12,18,24))


#######################
```

```
########## JOURS DE GEL
#######################

require(nasapower)
daily_data <- get_power(
 community = "ag",
 lonlat = c(4.6633554,45.8179161),
 pars = c("T2M_MIN"),
 dates = c("2010-01-01", "2022-12-31"),
 temporal_api = "daily")

daily_data<-as.data.frame(daily_data)
daily_data$G<-as.numeric(daily_data[,8]<0)
daily_data$S<-
cut(daily_data[,6],breaks=c(seq(0.5,363,by=7),367))

a<-(361-3.5)/51
b<-3.5-a
x<-a*(1:52)+b
y<-7*tapply(daily_data$G,daily_data$S,mean)
Dataset<-data.frame(x,y)

require(ggplot2)
ggplot(data=Dataset)+aes(x=x,y=y)+
geom_bar(stat = "identity",fill="white")+
theme_dark()+xlab("")+ylab("Nombre moyen de jours de gel (sur
la semaine)")+
scale_x_continuous(breaks                                    =
cumsum(c(0,31,28.25,31,30,31,30,31,31,30,31,30,31)),
labels = c("01/01","01/02","01/03","01/04","01/05","01/06",
"01/07","01/08","01/09","01/10","01/11","01/12","01/01"))+
scale_y_continuous(breaks =0:7,limits=c(0,7))+
geom_segment(aes(x=132, y=1.5, xend=132, yend=0),
arrow = arrow(length=unit(.5, 'cm')),colour="white")+
annotate("text",x=132,y=2,label="Saints         \n         de
glace",colour="white")


##################################
########## CALENDRIER YIN ET YANG
##################################

require(nasapower)
daily_data <- get_power(
 community = "ag",
 lonlat = c(4.6633554,45.8179161),
 pars = c("T2M"),
 dates = c("2010-01-01", "2022-12-31"),
 temporal_api = "daily")
daily_data<-as.data.frame(daily_data)

# calcul des paramètres du modèle cosinusoidal
Temp<-function(x,Tm,A,T0){
Tm+A*cos(2*pi*(x-T0)/365)
```

```
}

x<-1:365
y<-tapply(daily_data[,8],daily_data[,6],mean)[-366]
Dataset<-data.frame(x,y)
nlst<-nls(y~Temp(x,Tm,A,T0),
, data=Dataset,start=list(Tm=10,A=10,T0=200))
coef(nlst)
z<-Temp(x,Tm=coef(nlst)[1],A=coef(nlst)[2],T0=coef(nlst)[3])
Dataset<-data.frame(x,y,z)

# calcul des deux dates correspondants à 5°C
solveTemp<-function(y,Tm,A,T0){
acos((y-Tm)/A)*365/(2*pi)+T0
}

if((coef(nlst)[1]-coef(nlst)[2])>5){
print("Attention : La température minimum est supérieur à 5°C")
}

YY5a<-2*coef(nlst)[3]-
solveTemp(y=5,Tm=coef(nlst)[1],A=coef(nlst)[2],T0=coef(nlst)[
3])
YY5b<-
solveTemp(y=5,Tm=coef(nlst)[1],A=coef(nlst)[2],T0=coef(nlst)[
3])
require(lubridate)
DOY<-
function(n,Year=NULL){
if(is.null(Year)){Year<-year(now())}
Year<-as.character(Year)
x<-strptime(paste(Year, n), format="%Y %j")
paste(   mday(x),   as.character(month(x,label=TRUE,abbr   =
FALSE)))
}

DOY(YY5a)
DOY(YY5b)

# calcul de la fourchette
Jacob<-function(Tm,A,T0){
J1<-365/(2*pi)*(-1/(sqrt(1-((5-Tm)/A)^2)))*(-1/A)
J2<-365/(2*pi)*(-1/(sqrt(1-((5-Tm)/A)^2)))*(-(5-Tm)/A^2)
J3<-1
as.matrix(c(J1,J2,J3),ncol=1)
}

varD<-function(J,V){
t(J)%*%V%*%J
}

V<-vcov(nlst)
P<-coef(nlst)
J<-Jacob(P[1],P[2],P[3])
```

```
2*sqrt(varD(J=J,V=V))

# Le graphique

require(ggplot2)
ggplot(Dataset)+aes(x=x,y=y)+geom_point()+
xlab("Numéro de Jour dans l'année")+
ylab("Température (°C)")+
geom_line(aes(x=x,y=z))+
geom_hline(yintercept=5, linetype="dashed",col="red")+
geom_vline(xintercept=c(YY5a,YY5b),
linetype="dashed",col="red")
```

3 H_2

3.1 Qu'est-ce que l'eau ?

3.1.1 De l'importance de l'eau et de l'irrigation raisonnée

L'eau pure est une substance composée de molécules H_2O. Elle comporte trois phases : gazeuse (vapeur d'eau), liquide (eau... liquide) et solide (glace, qui a la curieuse propriété d'être moins dense que l'eau liquide). La molécule H_2O est une molécule polaire[98], ce qui lui permet d'établir des ponts avec d'autres ions ou molécules polaires. Cela explique des propriétés particulièrement intéressantes : de cohérence entre molécules d'eau, d'adhérence, et de bonnes capacités en tant que solvant. Elle présente, enfin, une capacité thermique[99] et une enthalpie de vaporisation[100] élevées. Mais *l'eau n'est en réalité jamais pure*, elle contient toujours des sels minéraux en solution ; et des impuretés et organismes vivants en suspension.

L'eau est indispensable à la vie terrestre. Si elle représente de l'ordre de 90 % de la masse des végétaux, ce n'est là qu'une part infime de l'eau absorbée par les racines, qui sert à 98-99 % à la transpiration (Raven et al., 2014). Cela rend moins surprenant le fait que l'irrigation des cultures corresponde à 70 % de l'eau douce employée dans le monde (FAO, 2020) et que cette ressource soit en danger. Il convient, par conséquent, de s'interroger sur son emploi, même au niveau de notre modeste potager.

D'une part, la sur-irrigation a plusieurs inconvénients : elle peut entraîner une battance du sol, un ruissellement parfois accompagné d'une érosion, mais aussi une infiltration profonde ; il y a alors perte de nutriments vers les nappes phréatiques ou les eaux de surface, on pense particulièrement aux nitrates qui polluent ainsi ces réservoirs.

---

[98] Avec deux charges partielles négatives pour l'oxygène, et une charge partielle positive pour les hydrogènes.

[99] Capacité à absorber et à restituer de la chaleur.

[100] La quantité de chaleur perdue lors de la vaporisation, ce qui explique que la transpiration soit rafraîchissante.

L'eau en excès asphyxie les racines des plantes et diminue leur productivité. Enfin, il est également possible qu'une trop grande humidité, particulièrement en hiver, favorise l'apparition de maladies. Le gâchis de l'eau a un coût économique pour le jardinier et pose, plus généralement, de sérieux problèmes en aggravant la sécheresse dans certaines régions.

On a donc récemment assisté à la parution d'ouvrages traitant, à juste titre, d'un « jardin économe en eau », ou plus étonnamment d'un « jardin sans arrosage », voire même d'un « jardin sans eau ».

Il est cependant assez clair que la sous-irrigation conduit à une baisse de la quantité et de la qualité de la production. C'est d'ailleurs la première cause de perte de récolte, bien avant les mauvaises herbes, les ravageurs et autres maladies (Boyer, 1982).

Au bout du compte, n'oublions pas qu'aujourd'hui, de nombreux pays ne peuvent pratiquer que la *rain-fed agriculture*, ce qui les expose à une terrible insécurité alimentaire et que, dans le passé, cela a été la cause des grandes famines (Farooq et al., 2021).

Ce chapitre vise essentiellement à comprendre les besoins en irrigation des cultures, afin de les gérer au plus juste : en évitant aussi bien la situation de « l'arroseur arrosé », que celle du « non-arroseur arrosé » (*cf.* Figure 36).

Figure 36 : « L'arroseur arrosé », film des frères Lumière.

3.1.2 Mesure de l'eau contenue dans l'atmosphère

Sauf dans les nuages, l'eau se présente dans l'atmosphère sous forme de gaz. La première mesure de l'humidité est tout simplement, pour un volume d'air donné, de rapporter la masse de la vapeur d'eau qu'il contient à la masse totale du volume, c'est l'humidité spécifique q (en kg/kg ou g/kg). Puisque la vapeur d'eau est un gaz, elle exerce une pression, partie prenante dans la pression atmosphérique : la deuxième mesure est la pression de vapeur partielle e (en Pa, hPa ou kPa). À une pression atmosphérique donnée, on peut utiliser indifféremment q ou e.

Toutefois, l'humidité de l'air ne peut dépasser un certain seuil, dit de saturation, car la vapeur d'eau commence alors à se condenser. Ce seuil, noté e_s ou q_s, dépend de la température : plus l'air est chaud, et plus il peut contenir d'eau. La formule de Clausius-Clapeyron[101] permet de calculer ce seuil : ainsi, à 20 °C, nous avons $e_s = 2\ 364$ Pa et $q_s = 14.6$ g/kg. Il est alors possible de comparer la valeur réelle d'humidité à ce maximum, soit en utilisant le déficit de pression de vapeur e_s-e, soit plus couramment, en employant l'humidité relative RH=$100 \times e/e_s$ (en %).

Enfin, pour une humidité donnée, il est aussi possible de se demander, toujours en employant la formule de Clausius-Clapeyron, à quelle température (plus basse) cette humidité deviendrait saturante : on parle alors de température du point de rosée t_d (en °C ou K).

Selon le type d'hygromètre, la température et l'une des quantités précédentes sont déterminées, ce qui permet d'obtenir toutes les autres par conversion (voir section « Ctrl-R »).

3.1.3 Mesure de l'eau contenue dans le sol

Le contenu en eau du sol peut être mesuré de deux manières différentes. D'une part, la teneur en eau volumique θ est le rapport entre le volume d'eau contenu dans un volume de sol et ce dernier (qui

---

[101] J'utilise la package R *humidity* pour de tels calculs : Jun Cai (2019). humidity: Calculate Water Vapor Measures from Temperature and Dew Point. R package version 0.1.5.

comprend à la fois les volumes d'air, d'eau et de « matière solide »). Cette mesure peut être donnée en % ou également en mm/cm[102]. D'autre part, le potentiel matriciel ψ_m mesure la force de rétention de l'eau exercée par le sol ; il s'agit d'une pression, mais comme elle est négative, on parle plutôt de succion. Elle s'exprime en Pascal ou un de ses dérivés (hPa, kPa, bar, atm). En agronomie, on rencontre aussi fréquemment la transformation : $pF = \log_{10}(\psi_m/98.0638)$.

Pour décrire les capacités hydriques d'un sol, on emploie trois seuils de contenu en eau (*cf.* Figure 37). Le seuil de saturation désigne la situation où tout l'espace vide du sol est comblé par de l'eau, l'air étant alors « chassé ». La teneur en eau volumique correspondante varie selon les types de sol (voir plus loin la Figure 46), mais le potentiel matriciel reste, lui, assez stable : il est, à saturation, proche de zéro.

Si on laisse s'écouler, par gravité, l'eau d'un sol saturé : on atteint, au bout d'un à trois jours, le point de ressuyage, dit aussi capacité au champ. Le potentiel matriciel correspondant est conventionnellement fixé à ψ_m = -33 kPa. À ce niveau, les plantes ont un maximum d'eau à leur disposition, et peuvent en même temps respirer. La quantité d'eau présente au-dessus de la capacité au champ ne reste pas dans l'horizon de sol qui nous intéresse et s'écoule plus bas (éventuellement jusqu'à la nappe phréatique), par les plus grosses porosités ; elle peut donc être considérée comme « perdue » pour les plantes. On appelle eau gravitaire cette quantité située entre le seuil de saturation et la capacité au champ.

En deçà de la capacité au champ, il devient de plus en plus coûteux aux plantes de se procurer l'eau, car elle est plus retenue par le sol. Le point de flétrissement permanent est le contenu en eau où les plantes n'ont plus la force de succion suffisante pour capter l'eau. Il est conventionnellement fixé à ψ_m= -1 500 kPa. Si la situation se prolonge, elles sont alors en danger ; ceci dit, comme nous le verrons, elles sont en situation de stress bien avant (au-delà de ψ_m= -300 kPa selon Datta et al., 2017). La quantité d'eau située entre la capacité au champ et le

[102] On considère la hauteur en millimètres que cette eau, pour une surface donnée, représenterait pour un centimètre de hauteur de sol : on l'obtient en divisant le pourcentage par dix.

point de flétrissement permanent est le réservoir utilisable, on parle aussi d'eau capillaire. C'est cette eau qui va compter pour les plantes. Notons qu'il reste encore pas mal d'eau au-delà du point de flétrissement permanent, dite eau liée, mais elle est très fortement retenue par les particules du sol.

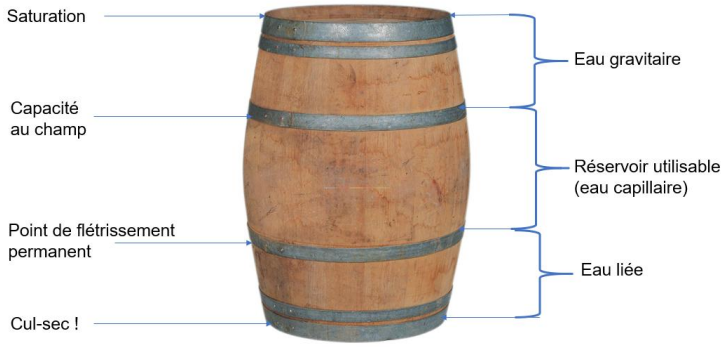


Figure 37 : Les seuils de contenu en eau du sol (à gauche) avec les types d'eau correspondants (à droite).

Les mesures de l'eau dans le sol sont obtenues en employant divers procédés ou appareils, plus ou moins précis, coûteux et faciles d'utilisation : mesure gravimétrique, tensiomètre, capteurs divers...

3.1.4 L'eau échangée entre l'atmosphère et le sol

Évapotranspiration

Une petite partie de l'eau située à la surface de la terre est transformée en vapeur[103], principalement sous l'effet du soleil, et passe alors dans l'atmosphère. Il s'agit surtout de l'eau des océans, mais aussi des lacs, des rivières et, ce qui nous intéressera particulièrement au potager, de celle contenue dans la couche supérieure du sol. Ce

[103] L'eau n'attend pas d'être à 100 °C pour s'évaporer. L'évaporation dépend de la pression *de l'eau*, qui est très faible à sa surface (où la pression *de l'air* ne compte pas), mais conforme à la pression ambiante à l'intérieur du liquide : elle peut dès lors à la surface changer de phase à des températures bien plus basses, c'est ce qu'on appelle le point d'ébullition. Pour une explication détaillée, regarder :
https://www.youtube.com/watch?v=lqg-4TpReo4#t=3m55s

phénomène est appelé évaporation[104]. En fait, la vapeur d'eau de l'atmosphère peut également être d'origine biologique, provenant pour la plus grande part de végétaux qui tirent cette eau du sol, voire, pour certains arbres, de la nappe phréatique ; dans ce cas, on parle de transpiration. Ces deux transferts vers l'atmosphère sont regroupés sous le terme d'évapotranspiration. Elle se mesure en mm (d'eau liquide qu'elle représente), à l'aide de divers appareils tels que des bacs d'évaporation ; ou bien elle peut être approximée, par des formules théoriques, à partir de données météorologiques.

Précipitations

La vapeur d'eau ne fait qu'un court séjour dans l'atmosphère. Suite à divers mécanismes tels que, par exemple, l'élévation sous l'effet de la poussée d'Archimède (la vapeur d'eau est bien moins dense que l'air), le niveau de saturation de l'air est atteint et, autour de noyaux que sont les aérosols, se forment des gouttelettes : c'est la condensation ; apparaissent alors des nuages. Ensuite, ces gouttelettes se regroupent et forment des gouttes par coalescence. Elles vont devenir trop lourdes pour être soutenues dans l'air, et vont retomber sous forme de précipitations. Précipitations de diverses natures, il s'agira, selon la température dans les nuages : de pluie, de neige ou de grêle[105]. La rosée n'est pas considérée comme une précipitation, car elle se forme à la surface des objets, du sol ou des plantes.

Outre leur nature, on s'intéresse au volume des précipitations, en mm pour les pluies (ou de façon équivalente en litres/m^2), mais en cm pour la neige (qui sont ensuite convertis en équivalent mm liquide) ; à leur intensité en mm/h ; et à leur fréquence, par exemple en nombre de pluies supérieures à 1 mm par an. On utilise un simple pluviomètre pour évaluer le volume d'une pluie.

---

[104] Il arrive également que l'eau solide de glaciers passe directement à l'état de vapeur, c'est ce qu'on appelle la sublimation.

[105] ou de bruine, de grésil, de pluies verglaçantes... Je n'évoquerai pas, par la suite, les techniques de protection contre la grêle, je renvoie à un document de l'*Institut National du Management des Stress Abiotiques* indien : https://www.academia.edu.

La grêle cause de grands dommages aux plantes. C'est moins le cas pour la neige, qui peut aussi avoir un rôle bénéfique en tant qu'isolant durant l'hiver. La pluie, si elle est intense, peut également entraîner des dommages directs aux plantes en déracinant, par exemple, des plantules, ou des dommages indirects par le biais d'engorgement dans la zone racinaire (donc manque d'oxygène), voire d'inondations. Elle peut également détériorer les sols par battance ou érosion.

3.1.5 Cycle hydrologique

Le volume total d'eau sur la planète Terre est estimé à 1.4×10^{21} kg. Le « cycle de l'eau » est, d'une part, une description des compartiments terrestres dans lesquels l'eau est stockée, appelés réservoirs, et, d'autre part, une description des flux circulant entre eux. Une partie de ce cycle est couplée avec le cycle du bilan radiatif, en particulier la chaleur latente, mais aussi la réflexion et l'absorption de radiations par les nuages. Le cycle hydrologique présente également des liens avec les cycles biogéochimiques, et spécialement celui de l'azote.

Le Tableau 3, tiré de Oki et al. (2004), montre l'importance des différents réservoirs d'eau. Il peut apparaître paradoxal que les réservoirs qui vont nous intéresser pour le potager (atmosphère et humidité du sol), soient finalement assez petits.

Tableau 3 : Description des réservoirs du cycle hydrologique.

Réservoir	Volume (%)	Temps moyen de stockage
Océans	96,5390	2500 ans
Glaciers et couverture neigeuse permanente	1,7360	56 ans
Eau souterraine	1,6880	8 ans
Sol glacé en périsol	,0216	
Lacs	,0127	
Humidité du sol	,0012	
Eau atmosphérique	,0009	9 jours
Eau maraicageuse	,0008	
Fleuves et rivières	,0002	18 jours
Eau biologique (végétation...)	,0001	

La Figure 38, également inspirée par les travaux d'Oki et al. (*op. cit.*) offre une image simplifiée des flux du cycle hydrologique et de leur importance. Cette fois, ce qui nous concerne en premier lieu au potager

est clairement souligné : les précipitations (terrestres) et l'évapotranspiration (terrestre). On notera en passant la grande quantité nette d'eau transportée depuis les océans et retombant sur les surfaces terrestres. Cela laisse à penser que le bilan local ne sera pas forcément équilibré : l'eau ne retombe pas d'où elle est extraite, *ni dans le temps ni dans l'espace*... Un élément fondamental de la description du cycle de l'eau est, en effet, de le décliner ensuite spatialement et temporellement.

En deuxième lieu pour le potager, il faudra plus précisément décrire un autre « transport », ici globalement considéré comme un écoulement des eaux de surface et souterraines vers leur destination finale : l'océan. Cet écoulement global regroupe, en réalité, plusieurs réservoirs (eaux souterraines, rivières, sol...), et circulations entre eux (ruissellement, par exemple).

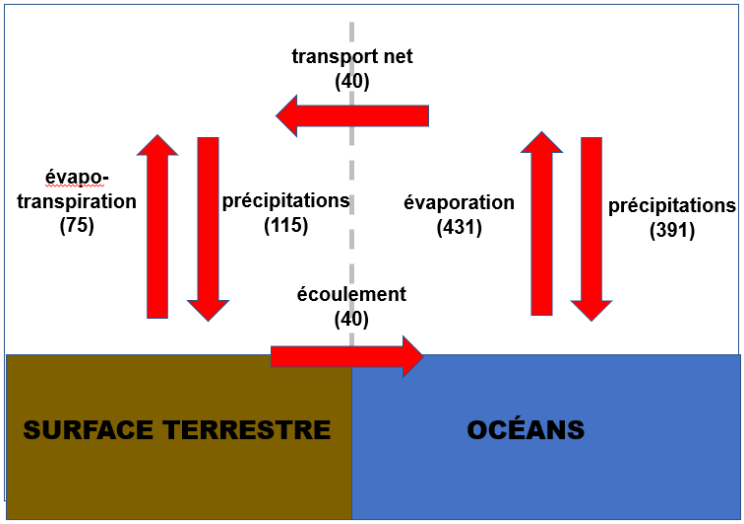


Figure 38 : Représentation simplifiée des flux du cycle hydrologique.
Les nombres entre parenthèses sont des volumes d'eau (en $10^3 \times km^3$).

C'est ce qui est schématisé[106] dans la Figure 39, qui représente la zone racinaire, c'est-à-dire la partie du sol qui est accessible aux plantes. Outre les échanges déjà évoqués, précipitations et évapotranspiration, il va falloir prendre en compte trois autres flux.

[106] Une pure traduction de la figure 6 p. 12 d'Allen et al. (1998).

Premièrement, le ruissellement qui est constitué par l'eau qui ne peut s'infiltrer dans le sol, soit parce que celui-ci est fermé par une croûte de battance, soit parce qu'il est déjà saturé d'eau, soit parce que les précipitations sont trop abondantes pour la vitesse d'infiltration dans le sol. Deuxièmement, les infiltrations profondes qui sont constituées de l'eau gravitaire qui va descendre dans des horizons inférieurs, parfois jusqu'aux aquifères. Troisièmement, les remontées capillaires qui suivent, en quelque sorte, le chemin inverse. Nous négligerons les flux souterrains horizontaux.

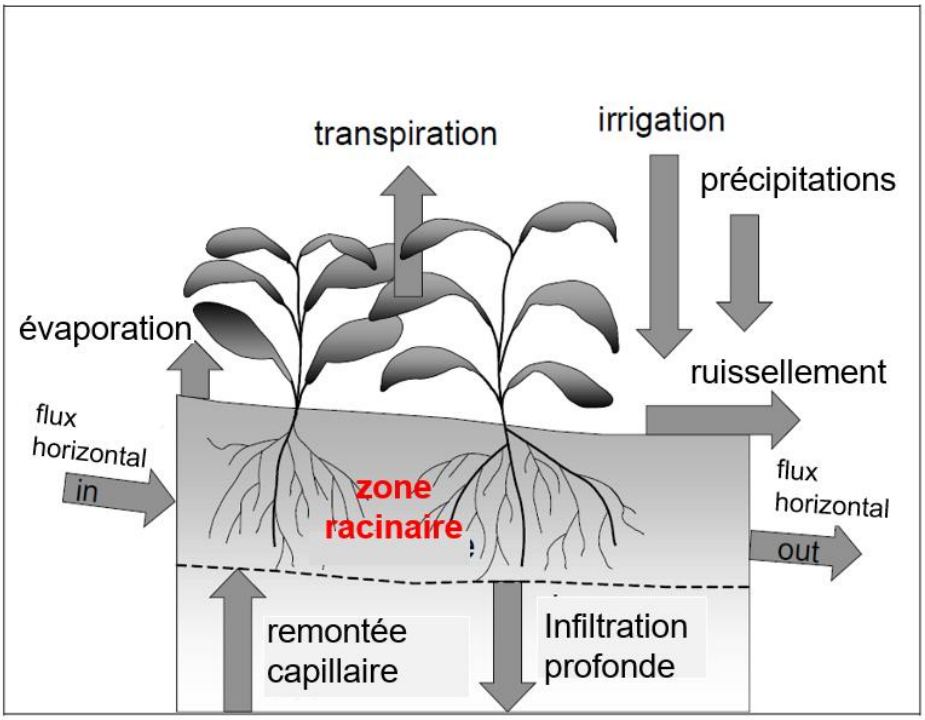


Figure 39 : Description des flux d'eau concernant la zone racinaire.

Le reste du chapitre est essentiellement consacré à la quantification de ces divers flux. Au final, *la nécessité d'irrigation apparaîtra en fonction d'un bilan des entrées et des sorties dans la zone racinaire, afin de s'assurer que suffisamment d'eau est bien disponible pour les plantes*.

Toutefois, avant de nous livrer à cette petite comptabilité hydrologique, voyons ce que les plantes font de cette eau et comment elles composent avec son manque ou son excès.

3.2 Réponse des plantes à l'eau

3.2.1 Germination

Modèle du temps thermique (rappel)

L'eau et la température du sol sont les deux facteurs fondamentaux de la germination, bien que d'autres puissent, dans une moindre mesure, être pris en compte, comme la lumière, la présence de nitrates, ou de fumée (Alvarado & Bradford, 2002). Pour revenir sur la température, et puisque nous nous trouvons, le plus souvent, dans des situations infra-optimales, nous avions évoqué le concept du temps thermique :

$$1/t_g=(T-T_b)/\theta_T(g)$$

avec g un pourcentage de germination donné (souvent 50 %), t_g le temps nécessaire pour observer ce pourcentage de germination, θ_T la constante thermique (qui dépend de g, et dont l'unité est le °C.h ou le °C.jour), T_b la température de base en °C, et T la température moyenne observée sur la période.

Nous avions souligné que la faculté germinative G_m dépendait de la température en termes de tout ou rien : soit nous étions au-dessous de T_b et il ne germait rien, soit au-dessus de T_b et alors la faculté germinative était maximale ; ce qui variait était uniquement la vitesse de germination.

Modèle du temps hydrique

Sur cette base, a été construit le concept de temps hydrique. *Pour une température donnée*, il s'agit de :

$$1/t_g=(\psi- \psi_b(g))/\theta_H$$

où ψ est le potentiel matriciel décrivant l'humidité du sol et θ_H est la constante hydrique (en MPa.h) qui ne dépend plus de g ; en revanche, ψ_b le potentiel matriciel de base, au-dessous duquel il n'y a plus de germination, va, lui, être fonction de g.

La conséquence est que, cette fois, la faculté germinative va dépendre de l'humidité, mais nous aurons toujours une relation linéaire

positive entre la vitesse de germination et le facteur considéré, ici l'eau plutôt que la température.

Pour définir la relation entre l'humidité de base et le taux de germination, *et donc la faculté germinative*, une fonction de répartition normale est employée, caractérisée par ses deux paramètres habituels (espérance μ_b et écart-type σ_b).

À titre d'exemple, nous allons employer l'étude de Bradford (1990) sur la laitue, ici cultivée à 20 °C, ce qui est une température idéale pour cette espèce. Sur la Figure 40, on voit que la faculté germinative est nulle au-dessous de -1 500 kPa et qu'elle atteint son maximum à partir de -750 kPa.

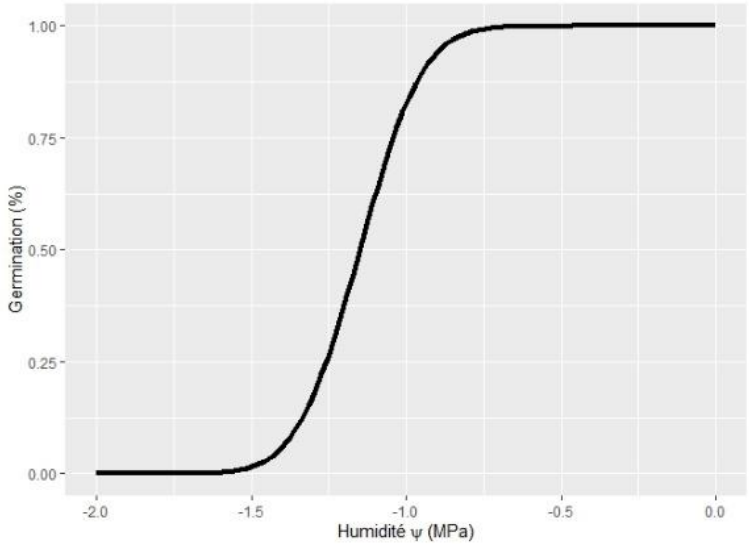


Figure 40 : Fonction reliant le pourcentage de germination et le potentiel matriciel de base pour des laitues. Il s'agit de la fonction de répartition d'une loi normale d'espérance -1.15 MPa et d'écart-type 0.16 MPa.

La Figure 41 montre, pour cette même expérience, la relation entre l'humidité et la vitesse de germination (il s'agit de la sortie de la radicule en heure^{-1}). On voit que, lorsque l'eau n'est pas limitée, la radicule peut sortir en moins d'une journée (1/0.06 heures) ; alors qu'il en faut plus de quatre (1/0.01 heures) à -1 000 kPa, et que tout ne germe pas alors (voir figure précédente).

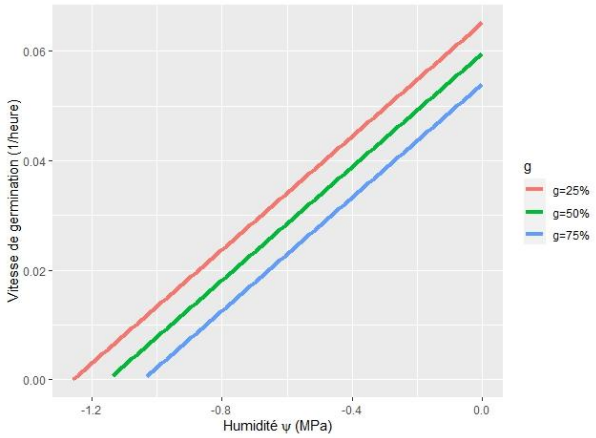


Figure 41 : Modèle de temps hydrique reliant la vitesse de germination à l'humidité du sol pour des laitues (représenté pour trois pourcentages de germination).

En résumé, ce modèle, qui est considéré comme de bonne qualité, indique qu'*à température constante, l'humidité du sol a un effet positif à la fois sur la faculté germinative et sur la vitesse de germination*.

On ne va pas s'arrêter en si bon chemin, passons au :

Modèle du temps hydrothermique

Gummerson (1986) a proposé, pour les températures infra-optimales, de combiner les deux approches précédentes dans le modèle de temps hydrothermique :

$$1/t_g=(\psi\text{-}\ \psi_b(g))(T\text{-}T_b)/\theta_{HT}$$

en reprenant les notations précédentes, sinon pour θ_{HT} qui est la constante hydrothermique (en MPa.°C.h).

À la simple vue du modèle, il est assez clair que, pour un taux de germination g donné : d'une part, pour une humidité donnée ψ, on retrouve le modèle de temps thermique, donc la relation positive entre la vitesse et la température à partir de la température de base T_b ; et d'autre part, lorsqu'on fait augmenter l'humidité, la relation entre la température et la vitesse de croissance va « démarrer » de la même température de base, mais elle aura, en revanche, une pente plus grande : $(\psi\text{-}\ \psi_b(g))/\theta_{HT}$. Enfin, pour une température fixée, on retrouve le modèle de temps hydrique, avec l'effet positif précédemment évoqué de l'humidité sur la faculté germinative.

Simplement, à titre d'illustration, je vais reprendre les données d'Alvarado et Bradford, (2002) sur la germination de la pomme de terre[107]. Le résultat de leur estimation (θ_{HT}=2090 MPa.°C.h ; T_b =3.2°C ; ψ_b(50%)=-1.54 MPa) est visible dans la Figure 42, où j'ai choisi de représenter la relation entre la température et la vitesse de croissance, pour trois valeurs d'humidité du sol. Ces trois valeurs d'humidité, qui sont assez élevées, n'entraînent pas de réduction de la faculté germinative[108].

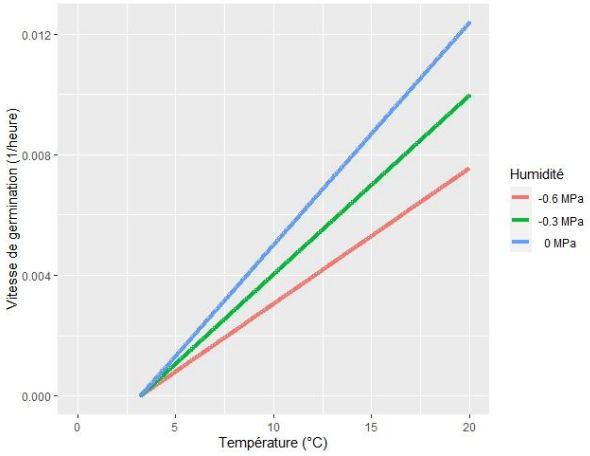


Figure 42 : Modèle de temps hydrothermique pour des graines de pomme de terre. La relation entre température et vitesse de croissance (50 % de germination) est présentée pour différentes valeurs d'humidité du sol.

En conclusion : (1) l'humidité du sol a un effet sur la faculté germinative, si elle n'est pas suffisante, il n'y a tout bonnement pas de germination ; (2) elle a aussi pour effet d'augmenter la vitesse de germination ; et (3) la température, au-delà d'une température de base et jusqu'à la température optimale de cette espèce, à un effet positif et linéaire, à humidité donnée, sur la vitesse de germination.

Cette fois, on va s'arrêter ici. Pour les fans de modélisation, Alvarado et Bradford, (2002) ont généralisé ce modèle aux situations supra-optimales de température.

---

[107] Il existe, en effet, des graines de pomme de terre : elle n'a pas qu'une reproduction végétative.

[108] Qui, pour cet exemple, commence en deçà de ψ= -1MPa (on a σ_b =0.23MPa).

3.2.2 Photosynthèse, croissance et développement

Comme évoqué dans le chapitre sur la lumière, l'eau est nécessaire à une bonne photosynthèse. Pour ne prendre qu'un exemple concret, Zhao et al. (2020) constatent, sur le blé d'hiver, par rapport à une culture bien irriguée (humidité du sol restant à 60–80 % du réservoir utilisable RU), une réduction de la photosynthèse nette moyenne de 3 % (à 50-60 % du RU), 21 % (à 40-50 % du RU) et 36 % (à 30-40 % du RU).

Dès lors, il n'est pas étonnant que Bierhuizen et De Vos (1959) trouvent une relation positive entre l'humidité du sol et la production de plusieurs légumes, estimée par la taille des feuilles, la hauteur de la plante et, par conséquent, sa masse fraîche. Le nombre de feuilles et d'inter-nœuds de la tige ne changent pas, c'est plutôt la taille des cellules et leur contenu en eau qui sont modifiés : c'est pourquoi la masse sèche dépend moins fortement de l'humidité. Il est possible de compenser, pour certaines cultures, un déficit d'humidité dans une période donnée, par les arrosages subséquents, mais ce n'est pas toujours le cas. Au-delà de la quantité, le stress hydrique a également un net effet sur la qualité de la production obtenue. De plus, un déficit lors de certains stades de développement, comme la floraison ou la mise à fruit, chez le haricot vert par exemple, a des conséquences importantes sur la production (des gousses). On ne parle pas dans ces expériences d'aller jusqu'au point de flétrissement (ψ_m=-1 500 kPa), mais plutôt jusqu'à des valeurs de stress modérées (ψ_m =-250 kPa) ; cependant, la réduction de production en pourcentage peut parfois atteindre 70-80 % !

Les deux auteurs remarquent aussi que la production maximum est atteinte vers la capacité au champ, mais au-dessus de celle-ci, elle se réduit pour des problèmes d'aération des racines des plantes, particulièrement sur des sols à faible capacité en air[109]. On peut, en résumé, représenter la relation entre la production et l'humidité du sol, de façon schématique comme sur la Figure 43.

---

[109] À faible volume entre la saturation et la capacité au champ, comme un sol argileux.

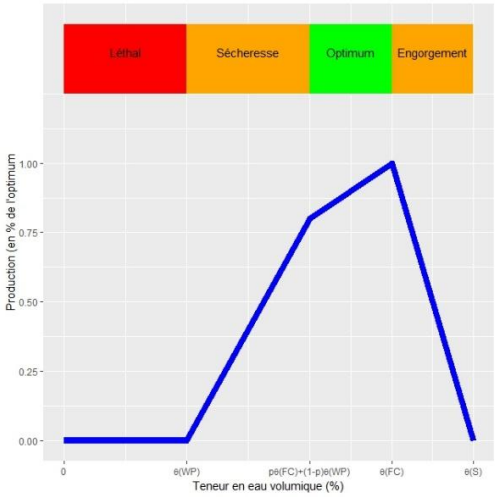


Figure 43 : Courbe de réponse théorique (production de la plante en rapport à l'optimum) en fonction de l'humidité du sol. θ est la teneur en eau volumique, WP est le point de flétrissement permanent, FC la capacité au champ et S le point de saturation. p est une valeur que nous retrouverons plus tard, qui décrit la « sensibilité » de la culture au stress hydrique.

Il semble également que, pour un même déficit hydrique, la perte de production soit plus élevée en périodes de forte transpiration (printemps-été plutôt qu'automne). La conclusion générale des auteurs est qu'en première approximation, dans un horizon racinaire de 40 cm, on ne doit pas perdre plus de 20 à 25 mm d'eau. Dès lors, en période de forte évapotranspiration et faibles précipitations, la durée entre deux irrigations ne doit pas dépasser 7 à 10 jours.

> Du côté de chez Stéphane : Bierhuizen et De Vos (1959) notent, en outre, que la croissance racinaire augmente fortement avec l'humidité du sol. De plus, et *in extenso* « Drying out of the topsoil will result in a more intensive root development in the subsoil, *provided the tension in this layer is low*[110]. However, *this cannot always prevent a decrease of vegetative growth*, as was found for example for dwarf french beans. »

[110] C'est moi qui souligne.

> Or, j'ai souvent entendu dire, voire lu, qu'il ne fallait pas trop arroser, pour ne pas rendre les cultures « fainéantes », et ainsi les forcer à faire des racines. Cela paraît parfois bien risqué, j'ai dû mal entendre.

3.2.3 Stress hydriques extrêmes

Parmi tous les stress que subit la plante, le stress hydrique est, sans doute, le plus dommageable. Aussi, les deux situations de stress représentées dans la Figure 43 méritent, à présent, d'être développées.

Engorgement en eau

L'engorgement en eau (*waterlogging*) est « l'accumulation d'eau en excès dans la zone racinaire » (den Besten et al., 2021). L'air est alors chassé de la porosité du sol, qui se retrouve en état d'hypoxie. Les causes naturelles de l'engorgement sont : une situation de zone inondable, une nappe phréatique proche de la surface, plus localement un emplacement bas dans le jardin, un sol imperméable, ou des précipitations importantes. Les causes humaines sont une irrigation excessive, de mauvais travaux de drainage[111] ou de la compaction. Le problème de l'engorgement, finalement assez courant, est probablement sous-estimé par l'agronomie, qui a tendance à se focaliser sur les dommages causés par la sécheresse.

Les conséquences d'une saturation en eau sont l'asphyxie racinaire et une modification de l'activité microbienne du sol. La plante ferme ses stomates, ses feuilles flétrissent et jaunissent (ce qui extérieurement peut passer pour conséquence d'un déficit hydrique), des racines adventices peuvent pousser au-dessus du sol, et les racines souterraines sont sous-développées. Les dommages pour la production sont en fonction de la durée, mais certaines cultures y sont rapidement sensibles. Ainsi, pour des tomates en développement, un à trois jours d'engorgement peuvent conduire à des pertes de l'ordre de 25 % à 65 % (Table A1 de den Besten et al., 2021). De plus, lorsque l'eau partira, elle pourra entraîner les nutriments vers le bas, ou bien, particulièrement en climat aride, créer une salinisation secondaire.

---

[111] Sans parler de la déforestation dans certains pays.

Sécheresse

La sécheresse (agricole) correspond à la situation où l'humidité du sol n'est plus suffisante pour assurer les besoins des plantes. Elle se combine, généralement, avec d'autres stress comme une température élevée, un soleil excessif et des problèmes de minéralisation dans le sol.

De nombreux processus biochimiques sont altérés par un stress hydrique chez la plante. La photosynthèse diminue, que ce soit à cause de la fermeture des stomates pour limiter la transpiration ou de signaux provenant des racines ; ou à cause de modifications enzymatiques (Rubisco) et de la synthèse de l'ATP. La circulation de la sève brute, et donc des nutriments, vers les feuilles est ralentie. Le partitionnement de la sève élaborée, d'ailleurs moins abondante, privilégie les racines plutôt que les parties reproductives (et donc la production de fruits). La respiration est moindre, mais ne peut bien entendu être supprimée ; les racines consomment, chez le blé par exemple, beaucoup de sucre (50 % de la photosynthèse), dont 60 % servent à leur respiration (Farooq et al., 2021) ! Le stress hydrique entraîne également un stress oxydatif. Au final, il reste complexe de savoir exactement comment ces nombreuses altérations interagissent ; mais décrivons-en, à présent, le résultat.

Un effet, déjà évoqué, est une plus faible germination, qui entraîne un faible et hétérogène démarrage des cultures. Le stress hydrique limite la croissance des cellules et leur multiplication, dès lors, la hauteur de la plante et la surface de ses feuilles diminuent. La floraison est également impactée, ainsi que la mise à fruit et leur mûrissement. En définitive, c'est la production qui est réduite : 13 % chez la pomme de terre, 58-87 % chez le haricot et 25-92 % chez le maïs (Table 1 dans Farroq et al., 2021). L'effet est plus ou moins important selon la sévérité du stress, sa durée, et le stade de développement de la plante.

Il existe des espèces ou variétés qui sont plus tolérantes. Elles peuvent avoir pour stratégie un cycle de vie raccourci, mais au prix d'une diminution de la production, ou carrément de son annulation par montaison prématurée. Cela passe aussi par une réduction de la taille des feuilles ou de leurs dispositifs de protection (poils, cire...). Une bonne architecture des racines est clairement un avantage. Il y a aussi des mécanismes physiologiques spécifiques, comme la photosynthèse

C4 ou CAM. L'amélioration variétale est, de plus en plus souvent, dirigée par cet objectif de tolérance au stress hydrique.

3.3 Précipitations

3.3.1 Variation des précipitations

Autant l'évapotranspiration aura une variation cyclique très nette, reliée au soleil, tant au cours de l'année que de la journée, et être finalement assez prévisible, autant les variations des précipitations sont peu régulières. Si l'on s'en tient au cumul annuel, il est cependant clair que, dans le territoire français métropolitain (voir Figure 44), il y a des zones de faibles et fortes précipitations : cela est dû à l'influence des océans et des montagnes. On constate, toutefois, de fortes variations inter-annuelles : il y a des années pluvieuses (900 mm en 2019 à la station météorologique la plus proche de mon potager) et des années qui le sont moins (seulement 530 mm en 2015).

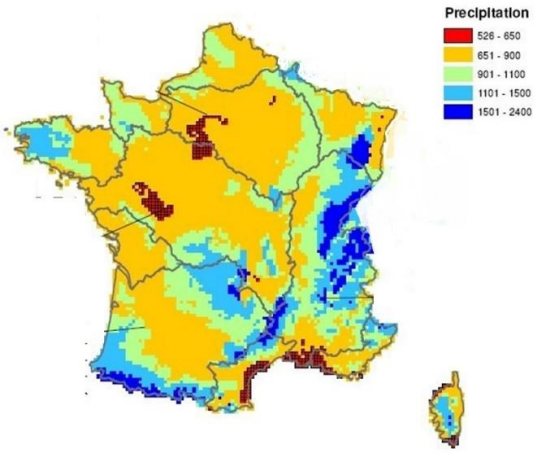


Figure 44 : Précipitations annuelles en France (moyenne 1995-2005), tiré de Thirel (2009).

Au cours du vingtième siècle, les précipitations semblent avoir augmenté (Moisselin, et al., 2002), particulièrement dans le nord de la France et durant l'hiver ; les seules baisses observées étant situées dans le sud. Globalement, la hausse a été de l'ordre de 0.5 à 1 % par décennie (GIEC, 2001).

Lorsqu'on essaie d'étudier les variations intra-annuelles, on parvient à faire quelques typologies de précipitations mensuelles : avec des zones présentant, par exemple, une vague pluvieuse en mai-juin et une vaguelette en novembre (voir Figure 45).

Mais à nouveau, d'une année sur l'autre, que de différences ! Et même à l'échelle de quelques kilomètres ! Pour les précipitations, on va donc plutôt garder l'œil sur la météorologie que sur le climat.

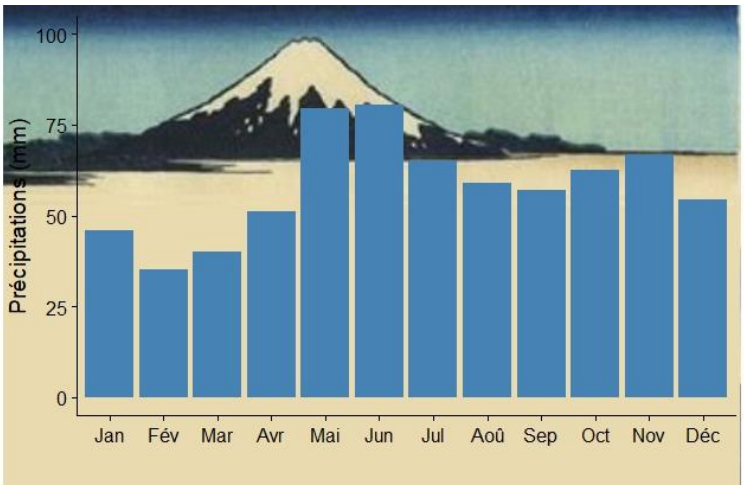


Figure 45 : Précipitations mensuelles dans mon potager (région lyonnaise, en version Hokusai), en moyenne sur 2010-2022.

Du côté de chez Stéphane : Faute de mieux, j'ai tendance à considérer, en termes de climat, les précipitations comme étant uniformément réparties tout au long de l'année. Au contraire, l'évapotranspiration suivra le cycle des températures (*i.e.* des radiations solaires). Je vais donc m'attendre, lors des mois froids, à une différence positive entre les précipitations et l'évapotranspiration, et lors des mois chauds, à une différence négative ; chacune apportant son lot de problèmes de gestion de l'eau.

Mais ce que l'on attend n'arrive pas toujours : considérons par exemple le mois de juillet, et comparons l'année 2021 où il est tombé 150 mm de pluie pour une évapotranspiration de 108 mm, et l'année 2022 où les précipitations étaient de

> 1 mm pour 177 mm d'évapotranspiration (dans mon village).
>
> Dans le premier cas, sans aucune irrigation supplémentaire, mes bettes, mes laitues et mes choux étaient resplendissants, et mes tomates sujettes au mildiou ; alors que, dans le second cas, comment aurais-je pu trouver 176 litres d'eau au mètre carré, même difficilement utilisables, dans mon sol ? La seule stratégie raisonnable est alors de... trafiquer son compteur d'eau[112].

3.3.2 La pluie efficace

Que devient la pluie (ou la neige) qui tombe sur notre potager ? Comme nous l'avons vu, elle peut ruisseler, et dans ce cas, être « perdue » pour notre sol. Elle peut aussi s'y infiltrer, mais il y en a alors une telle quantité que le sol la laisse « filer » vers des horizons inférieurs à la zone racinaire.

La part de la pluie qui va effectivement augmenter le réservoir utilisable, et donc servir aux plantes, est appelée pluie efficace. Cette part dépend de la texture, de la structure, de la profondeur du sol, de son humidité au moment des précipitations, de sa couverture, de la topographie, de l'intensité des précipitations et de la profondeur des racines.

Il existe plusieurs modèles[113] pour quantifier ces pertes (Ali & Mubarak, 2017), le plus souvent estimées par décade ou par mois. Le plus simple, conseillé par la FAO, est de considérer que 80 % de la pluie est efficace. Un peu plus sophistiqué, on met une limite au-dessous de laquelle la pluie ne sert à rien, on ne la prend pas en compte[114], et au-dessus de laquelle on applique la proposition précédente. Enfin, il existe aussi des modèles avec une valeur limite supérieure, où le sol ne peut plus absorber autant d'eau, et la pluie efficace est alors plafonnée.

---

[112] C'est une plaisanterie, je préfère le préciser...

[113] Mais également des mesures directes.

[114] 5 mm dans une journée d'une période sèche pour Damstane (1974).

3.4 Eau dans le sol

Les plantes vont, par leurs racines, aller chercher l'eau dans le sol. Mais quelle quantité d'eau contient-il en fait ? Et les plantes peuvent-elles en disposer facilement ?

3.4.1 Eau contenue dans le sol

Saxton et Rawls (2006) proposent d'estimer plusieurs caractéristiques hydriques du sol, en fonction de sa texture et de son contenu en matière organique[115]. La texture du sol est définie par une répartition en trois catégories de taille de ses particules solides (roches). Le sol contient également de la matière organique qui, entre autres effets, augmente sa capacité de rétention en eau.

Les équations proposées[116] permettent de calculer les teneurs en eau volumiques à saturation (θ_S), à la capacité au champ (θ_{FC}), et au point de flétrissement permanent (θ_{WP}). Si j'utilise, par exemple, la dernière analyse de sol[117] de mon propre potager, avec une texture comprenant 22 % d'argile, 34 % de limon, 44 % de sable et 7.6 % de matière organique[118], nous obtenons θ_S =0.579, θ_{FC}=0.337 et θ_{WP} =0.179.

Pour évaluer le réservoir utilisable sur une profondeur de Zr=0.30 m, nous employons la formule :

$$TAW=1000\times (\theta_{FC} - \theta_{WP}) \times Z_r \quad (\textit{total available water}, \text{ en mm})$$

soit ici TAW=47.4 mm pour l'horizon considéré, ou 47.4 litres d'eau pour une surface de 1 m^2.

Au-delà de mon propre cas, la Figure 46 présente pour trois sols sableux, limoneux et argileux, et deux niveaux de matière organique, ces informations sous une forme différente : en séparant l'eau gravitaire, l'eau capillaire et l'eau liée. Globalement, il y a moins d'eau

---

[115] Le chapitre sur la santé physique du sol précisera ces éléments.

[116] Voir la section « Ctrl-R » et l'article qui est en libre accès ici : https://rashms.com

[117] Voir en annexe cette analyse de sol.

[118] Ce qui est une quantité très importante, je me suis donné du mal depuis quatre ans...

en sol sableux (les parties bleues toutes ensemble) et, surtout, l'eau gravitaire (bleu clair) est très importante en sol sableux. L'eau a donc tendance à filer plus bas, et le réservoir utilisable est le plus faible des trois sols. Ceci signifie qu'en sol sableux, il va falloir irriguer plus souvent, et faire attention à ne pas dépasser la capacité au champ. Le sol limoneux est celui qui a le réservoir utilisable le plus important. Le sol argileux est caractérisé par sa très grande proportion d'eau liée, ce qui rend son réservoir utilisable intermédiaire entre les deux autres sols.

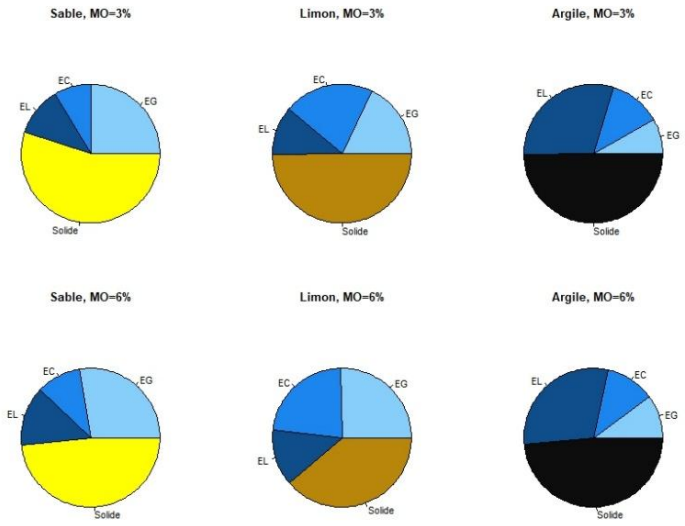


Figure 46 : Répartition de l'eau gravitaire (EG), capillaire (EC qui est le réservoir utilisable) et liée (EL) et de la matière solide pour trois sols (sableux[119] 70/15/15 ; limoneux 15/70/15 et argileux 25/25/50) et deux niveaux de matière organique (MO=3 % et MO=6 %).

On voit également que l'augmentation du taux de matière organique a pour effet en sol sableux et limoneux d'augmenter la quantité d'eau, mais de façon assez modeste pour le réservoir utilisable. Ce ne sont pas Minasny et McBratney (2017) qui vont dire le contraire : « We show that the increase in organic carbon in soil has a small effect on soil water content ». Ce sont des augmentations *considérables* de la matière

[119] 70/15/15 indique que les pourcentages respectifs de sable, limon et argile en granulométrie (voir le chapitre sur la santé physique du sol pour plus de précisions).

organique qui permettent un changement significatif. Ainsi, pour respectivement 3, 4 et 5 % de matière organique dans un sol sableux (15/15/70), nous avons TAW= 26.3, 27.8 (+6 %) et 29.5 mm (+12 %).

3.4.2 Eau disponible pour les plantes

Jusqu'à présent, nous avons considéré que l'ensemble du réservoir utilisable à Z_r=30 cm était à portée de la plante. En réalité, il y a deux restrictions.

La première consiste en l'horizon racinaire de la plante, qui peut être plus ou moins profond : allant de Z_r=5-10 cm pour une petite plantule à Z_r=50 cm pour des plantes adultes de certaines espèces[120]. La profondeur maximale pour une espèce donnée est disponible dans le document FAO 56 (table 22, p. 163). Bien évidemment, au stade de plantule, cette profondeur ne convient pas, et une interpolation est souvent réalisée en considérant que la plantule, au départ, a une profondeur racinaire de l'ordre de 15 cm.

La seconde restriction est basée sur le fait suivant : plus le réservoir utilisable s'épuise, et plus le coût pour « arracher l'eau au sol » est élevé pour la plante. Or, les espèces ne sont pas égales dans cette sensibilité au stress hydrique. Pour en tenir compte, on emploie une fraction d'épuisement p ($0<p<1$) qui peut être retirée du réservoir utilisable sans causer de stress à la culture. Cela permet de définir le réservoir facilement utilisable :

$$\text{RAW} = \text{TAW} \times p, \qquad (\textit{readily avaible water}, \text{ en mm}).$$

Dans FAO 56 (table 22, p. 163), on peut trouver les valeurs du coefficient d'épuisement pour différentes cultures légumières et autres. Le stress commence assez bas avec des valeurs de p=0.20 pour le céleri, jusqu'à p=0.65 pour la patate douce.

Un petit exemple va nous permettre de comprendre les différentes situations qui vont conduire à différentes stratégies d'irrigation. Nous allons comparer une graine très récemment semée de carotte, une laitue

[120] On ne considérera pas ici le problème de la profondeur du sol qui peut aussi être limitante.

en fin de culture, et un plant de tomates en milieu de culture (production). Les profondeurs considérées vont être de 5 cm pour la carotte, 30 cm pour la laitue et 70 cm pour la tomate ; leurs fractions d'épuisement respectives sont de 0.35, 0.3 et 0.4. En reprenant la situation de mon potager, soit θ_{FC}=0.337 et θ_{WP} =0.179, nous obtenons le Tableau 4.

La dernière colonne du tableau fait une hypothèse simpliste, sur laquelle nous reviendrons dans la prochaine section[121] : nous sommes dans un cas où il sort 5 mm d'eau par jour en cette période (estivale). J est alors le nombre de jours nécessaire pour que le réservoir facilement utilisable par la culture soit vidé.

Tenez-vous bien à l'arrosoir, il faut irriguer le semis de carotte deux fois par jour, la laitue tous les trois jours, et la tomate chaque semaine ! Pas avec les mêmes quantités, car nous verrons que nous visons, par chaque irrigation, à reconstituer les pertes.

Tableau 4 : Calcul de la réserve facilement utilisable (RAW) pour trois cultures différentes. La dernière colonne J correspond au nombre de jours pour vider ce réservoir, s'il sort 5 mm par journée du sol.

Culture	Zr (cm)	p	RAW (mm)	J (pour ETP=5mm)
Semis de carotte	5	,35	2,7	0,5
Laitue (fin de culture)	30	,30	14,2	2,8
Tomate (milieu de culture)	70	,40	44,2	8,8

Notons que je n'ai pas un sol sableux, qui aurait réclamé des recharges *deux fois plus rapides* !

Pour finir, j'ai mis de côté un élément de structure de sol problématique pour certains, je n'ai pas pris en considération les graviers et pierres, qui peuvent impacter le réservoir facilement utilisable[122].

---

[121] Nous verrons qu'il ne sort pas, en fait, la même quantité d'eau du sol pour ces trois cultures.

[122] Il s'agit de rajouter un coefficient d'empierrement E pour modifier le réservoir facilement utilisable en RAW×(1-E).

3.5 Évapotranspiration

Il s'agit, à présent, d'avoir une idée de la quantité d'eau qui sort du sol sous forme de vapeur d'eau, soit directement (évaporation), soit indirectement (transpiration des plantes). L'évaluation comprend souvent deux étapes : un premier calcul pour une culture de référence, dite évapotranspiration de référence (ET_0), puis un second calcul pour l'évapotranspiration de la culture considérée (ET_c).

3.5.1 Évapotranspiration de référence

Elle correspond à l'évapotranspiration d'une parcelle d'herbe bien hydratée, afin que les caractéristiques de la culture et du sol n'influencent pas sa valeur, mais que cette dernière soit uniquement une fonction des caractéristiques météorologiques.

Cette évapotranspiration de référence peut être estimée par mesure directe (capteurs dans la parcelle de référence), par mesure indirecte grâce à un bac d'évaporation proche de la parcelle (voir plus loin), ou calculée sur la base de données météorologiques.

C'est cette dernière approche que nous allons présenter, pour bien saisir d'abord quels sont les facteurs qui influencent sa valeur : dans le but de les maîtriser ensuite « au moins mal ». Il existe de très nombreuses formules théoriques permettant d'estimer ET_0, nous utiliserons celle de Penman-Monteith (Allen et al., 1998), qui repose sur de solides bases physiques, et a été adoptée par l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO[123]) :

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma\frac{900}{T+273}u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \qquad \text{(Eq. 3.1)}$$

ET_0 est l'évapotranspiration de référence (mm par jour), R_n l'irradiation nette à la surface (MJ/m^2 par jour), T est la température

[123] Cette organisation fait un travail remarquable d'acquisition et de diffusion de connaissances concernant l'agriculture. Une série de dossiers appelés *Irrigation and drainage papers* est une mine d'informations, en particulier le n°56 (Allen et al., 1998) qui est la base des approches que je présente ici. Beaucoup d'autres thèmes sont très bien traités, et les publications sont librement disponibles ici : https://www.fao.org

moyenne (°C), u_2 la vitesse du vent à deux mètres de haut (m/s), e_s est la pression de vapeur saturante (kPa) et e_a la pression observée (kPa). Je renvoie au texte pour la description de Δ et γ (et G=0, le plus souvent).

Les quatre facteurs météorologiques qui jouent dans cette formule sont : les radiations solaires[124] (R_n), le vent (u_2), l'humidité de l'atmosphère (déficit de vapeur saturante e_s-e_a) et, de façon plus complexe, la température (T qui intervient aussi dans Δ et e_s). L'élévation dans le paramètre γ a un rôle plus secondaire.

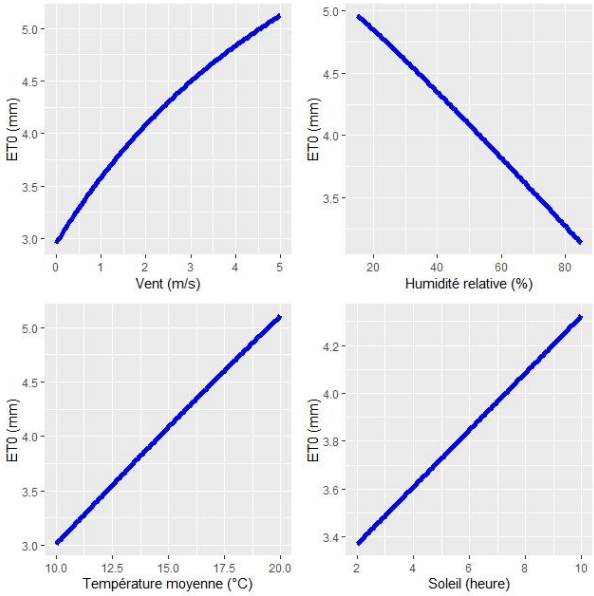


Figure 47 : ET_0 calculée à l'aide de Penman-Monteith pour la journée de référence du 15 mai 2024. Le lieu est situé à 45.8° de latitude et à 250 mètres d'élévation. Les valeurs météorologiques sont une vitesse de vent de 2 m/s, des températures minimum et maximum de 10 °C et 20 °C, une humidité relative de 50 % et 8 heures de soleil dans la journée. On a modifié successivement ces valeurs pour chacun des facteurs météorologiques.

Rien de tel qu'une image pour saisir comment ces quatre facteurs influencent ET_0. La Figure 47 module, tour à tour, chacune de ces

[124] Les radiations solaires sont souvent approximées par une équation incluant le nombre d'heures d'ensoleillement observé, la latitude et le moment de l'année considérée.

variables pour en saisir l'effet, même si, bien entendu, ces facteurs ne sont pas indépendants : une journée d'été, avec plus de soleil, est en général plus chaude. On en déduit que l'évapotranspiration de référence augmente avec les radiations solaires, la température et la vitesse du vent ; et qu'elle baisse avec l'humidité relative. En ce qui concerne la vitesse du vent, les hommes divorcés et les femmes[125] auront remarqué que le linge sèche en effet plus vite par grand vent...

L'évapotranspiration de référence est souvent estimée par les stations météorologiques, et vous pouvez probablement trouver cette information pour un site proche de votre potager, par exemple ici à trois kilomètres du mien, pour le très pluvieux mois de juillet 2021 : https://www.infoclimat.fr/climatologie-mensuelle

> Du côté de chez Stéphane : Les bacs d'évaporation sont des dispositifs gradués (image sur wikipedia) qui évaluent ET_p le nombre de mm envolés chaque jour. L'évapotranspiration de référence peut en être dérivée par la formule $ET_0=K_p \times ET_p$ où K_p est un coefficient propre au bac et à son emplacement par rapport à la culture. Allen et al. (1998) donnent des valeurs souvent proches de $K_p=0.5$ (FAO 56, table 8 p. 33). En considérant la piscine de mes voisins comme un bac d'évaporation, si elle perd 1 cm d'eau dans la journée, c'est environ 5 mm, soit 5 litres d'eau par mètre carré qu'il faudra combler, de l'ordre du demi-arrosoir. Donc la règle, c'est de diviser le nombre de centimètres perdus par la piscine par deux, pour obtenir le nombre d'arrosoirs à vider au mètre carré. Si vous culpabilisez d'irriguer votre potager avec de l'eau potable,

[125] Une allusion, en passant, à la division du travail entre les sexes : Bianchi, S. M., Milkie, M. A., Sayer, L. C., & Robinson, J. P. (2000). Is anyone doing the housework? Trends in the gender division of household labor. *Social forces*, *79*(1), 191-228. Édifiant.

c'est comme si vous rechargiez une piscine de surface deux fois plus petite !

3.5.2 Évapotranspiration de la culture

Les cultures diffèrent entre elles : d'une espèce à l'autre et, au sein d'une même espèce, par le stade de développement. Ces deux éléments vont intervenir pour déterminer, à partir de l'évapotranspiration de référence, l'évapotranspiration d'une culture spécifique ET_c, à travers un coefficient cultural K_c :

$$ET_c = K_c \times ET_0.$$

Remarquons qu'il s'agit d'une évapotranspiration maximale : il se peut, en effet, lorsque le réservoir utilisable du sol est vide, qu'elle ne soit pas atteinte.

On trouve dans FAO 56 (table 12, p. 110) ces coefficients culturaux[126], déclinés selon l'espèce et trois stades de développement (début, milieu et fin de culture).

Si nous reprenons notre exemple du Tableau 4, nous avons pour le semis de carotte K_c= 0.7, pour la laitue en fin de culture K_c=0.95, et pour la tomate en milieu de culture K_c=1.15.

Pour une même évapotranspiration de référence ET_0=5 mm, nous pouvons corriger nos prévisions d'arrosage : plus d'une fois par jour pour le semis de carotte (en tout 3.5 litres/m^2), tous les trois jours pour les laitues (14 litres) et une fois par semaine pour les tomates (40 litres !).

Tableau 5 : Calcul de la réserve facilement utilisable (RAW) pour trois cultures différentes. La dernière colonne J correspond au nombre de jours nécessaires pour épuiser ce réservoir, s'il sort ET_0=5 mm par journée du sol, corrigé en ET_c grâce au coefficient K_c.

Culture	Zr (cm)	p	RAW (mm)	ETc (pour ETP=5mm)	J
Semis de carotte	5	0,35	2,7	3,5	0,8
Laitue (fin de culture)	30	0,3	14,2	4,8	3,0
Tomate (milieu de culture)	70	0,4	44,2	5,8	7,7

[126] Avec une mise à jour dans Pereira et al. (2021).

3.5.3 Part de l'évaporation

L'évapotranspiration est composée, pour une part, de l'évaporation du sol que nous pouvons espérer limiter par une couverture de sol. Klocke et al. (2009) montrent que, pour un mulch de résidus de culture et des situations d'été avec une évapotranspiration de 5 mm, la répartition est de E=1 mm et T=4 mm. Ils distinguent trois situations : (1) si on met plus d'eau que nécessaire, soit plus de R=5, l'utilisation d'un mulch n'a pas d'effet dans le sens où l'eau va s'accumuler dans le sol, et peut-être même être perdue par gravité ; (2) si on irrigue correctement (R=4), on va économiser 20 % d'eau sans porter préjudice à la culture, on voit en passant que l'effet du mulch n'est pas « magique » ; (3) si on ne peut irriguer suffisamment (R<4), l'effet du mulch est de « réorienter » le maximum d'eau vers la culture, donc de préserver le rendement dans la mesure du stress hydrique.

Ceci dit, l'espèce, mais surtout son stade de développement, vont jouer un rôle que nous allons évaluer. Nous savons que, pour une même ET_0, nous avons pour une culture $ET_c=K_c\times ET_0$. Prenons les exemples de (1) la laitue qui, pour ses trois stades de développement, a pour coefficients K_c=0.7/1.05/0.95 et (2) la tomate, qui a K_c=0.6/1.15/0.80 (table 12 dans FAO 56).

Or, il y a aussi une autre équation $ET_c=(K_{cb}+K_e)\times ET_0$, où les effets de la transpiration (K_{cb}) et de l'évaporation (K_e) sont séparés. On en déduit $K_c=K_{cb}+K_e$ et donc $K_e(\%)=(K_c-K_{cb})/K_c$. Les valeurs pour la laitue sont de K_{cb}=0.15/0.95/0.85 et pour la tomate de K_{cb}=0.15/1.10/0.70 (table 17 dans FAO 56). Concernant la laitue en début de culture, cela donnerait (0.7-0.15)/0.7=80 %, et en développement (1.05-0.95)/1.05=10 %. Quant à la tomate, en début de culture, nous avons (0.6-0.15)/0.60=75 %, et en développement, (1.15-1.10)/1.15=5 %. On voit donc que la couverture de sol est très utile sur sol nu en début de culture (mais difficile à mettre en place s'il s'agit d'un paillage, car les plants, ou pire les semis, sont noyés dedans), et moins utile avec de grands plants.

On ne parle même pas du fait que les pluies sont aussi bloquées par la couverture de sol. Que dit, en effet, la sagesse orientale[127] : « Une porte fermée est fermée pour les deux côtés ». Le gain apporté par les couvertures de sol, en termes d'irrigation[128], est sans doute plus limité qu'on ne le pense. Toutefois, il y a une situation incontestablement intéressante : c'est celle de notre semis de carotte. Tant qu'il n'y a pas eu d'émergence, et c'est assez long pour cette culture, nous avons vu que nous étions condamnés à arroser de façon très fréquente pour garder une surface constamment humide. Si nous recouvrons le sol d'une bâche plastique tant que les plantules n'ont pas émergé, nous conservons l'humidité, sans nécessité de recharge. Attention, une fois les plants émergés (et la bâche immédiatement enlevée), il faut à nouveau être vigilant sur l'irrigation des fragiles plantules.

3.6 Besoins en irrigation

Il y a trois grandes méthodes pour régler l'irrigation : la mesure directe du contenu en eau du sol par des capteurs, le bilan hydrique du sol, et les techniques, encore à l'état de recherche, basées sur l'observation directe des plantes (Pardossi & Incrocci, 2011).

3.6.1 Irrigation basée sur des capteurs d'humidité

Un ou plusieurs capteurs doivent être placés à des profondeurs reflétant l'horizon de sol considéré, donc entre 0 et Z_r, profondeur d'enracinement de la culture.

Si la mesure du contenu en eau par les capteurs est basée sur la masse volumique θ, il faut d'une part s'assurer que $\theta < \theta_{FC}$ (ou autrement dit $0 < \theta_{FC} - \theta$), c'est-à-dire que nous ne dépassons pas la capacité au champ avec de l'eau gravitaire qui n'est pas utile aux plantes ; c'est ce qui indique, en outre, la quantité d'eau qu'il faut apporter lors d'une recharge. Pour savoir quand déclencher l'irrigation, il est certain qu'il vaut mieux rester au-dessus du point de flétrissement

[127] Je suis effectivement né dans le Beaujolais, situé dans l'est de la France.

[128] Des chapitres ultérieurs montreront que les paillages et les couvertures de sol apportent bien d'autres gains.

permanent ou, du moins, le dépasser le moins longtemps possible : $\theta > \theta_{WP}$ (qu'on peut écrire : $\theta_{FC}-\theta < \theta_{FC}-\theta_{WP}$). En fait, pour éviter aux plantes tout stress hydrique, il faut plutôt rester dans la région du réservoir facilement utilisable soit $(\theta_{FC}-\theta) < (\theta_{FC}-\theta_{WP}) \times p$. En résumé, on doit vérifier que :

$$0 < (\theta_{FC}-\theta) < (\theta_{FC}-\theta_{WP}) \times p' \quad \text{avec } p<p'<1.$$

Si la mesure du contenu en eau par les capteurs est basée sur le potentiel matriciel ψ_m, alors il convient d'une part de ne pas aller au-dessus de ψ_m =-33 kPa (capacité au champ), et en deçà de ψ_m= -1 500 kPa (point de flétrissement permanent). Pour éviter le stress hydrique, il existe des tables de valeurs de référence du potentiel matriciel, par exemple pour la laitue : -40 kPa $< \psi_m <$ -60 kPa et pour la tomate : -80 kPa $< \psi_m <$ -150 kPa (Haise & Hagan, 1967).

Pour ceux qui aiment l'aventure spatiale, il existe également des méthodes de télédétection satellitaire (Vanino et al., 2018) qui permettent de piloter l'irrigation des tomates...

3.6.2 Irrigation basée sur un bilan hydrique

La technique est plus complexe et, en définitive, difficilement utilisable dans un potager avec de multiples cultures à des stades différents. Là encore, il s'agit plus de s'inspirer du bilan, pour essayer d'améliorer empiriquement ses pratiques d'irrigation. La gestion de l'eau, étudiée dans la prochaine section, reposera sur ce bilan.

Le modèle de bilan provient encore d'Allen et al. (1998). L'idée est de présenter le sol comme un véritable réservoir utilisable, et de suivre son épuisement dans la zone racinaire considérée (D_r en mm). Lorsque le contenu en eau est à la capacité au champ, il n'y a aucun épuisement ($D_r = 0$) ; lorsque le contenu est au point de flétrissement, l'épuisement est complet, toute l'eau utilisable a été employée (D_r = TAW) ; et si l'on souhaite demeurer dans une zone confortable pour les plantes, il faut rester dans le réserve facilement utilisable ($D_r <$ RAW).

L'idée est de partir d'une valeur initiale connue d'épuisement, puis de tenir, au jour le jour, une comptabilité de ce qui entre dans le réservoir (et diminue l'épuisement) et de ce qui en sort (et augmente l'épuisement).

La valeur initiale d'épuisement, à la fin du jour i-1, est donnée par $D_{r,i-1}=1000\times(\theta_{FC}-\theta_{i-1})\times Z_r$, où θ_{i-1} est la teneur en eau volumique connue initiale. On considère souvent que la parcelle a été, au départ, irriguée jusqu'à la capacité au champ et, dans ce cas, $D_{r,i-1}=0$. Il en découle la valeur d'épuisement $D_{r,i}$ (au soir) du lendemain :

$$D_{r,i}= D_{r,i-1}-(P_i-RO_i) -I_i-CR_i+ET_{c,i}+DP_i. \qquad \text{(Eq. 3.2)}$$

Cette formule est tout bonnement le reflet du cycle de l'eau, appliqué au niveau local du réservoir utilisable dans le sol. Il s'agit de prendre à la fois en compte les sorties comme l'évapotranspiration de la parcelle du jour i ($ET_{c,i}$), et la fuite gravitaire dans des horizons inférieurs, voire jusqu'à la nappe phréatique (*deep percolation* : DP_i) ; et les entrées comme les précipitations (P_i) dont on retranche le ruissellement (*run-off* : RO_i), l'irrigation nette, c'est-à-dire qui s'est véritablement infiltrée (I_i), et d'éventuelles remontées capillaires (*capillary rise* : CR_i). L'unité générale est le millimètre.

3.6.3 Irrigation basée sur des simulations informatiques

Malgré les petits exemples, la présentation précédente peut sembler un peu abstraite, et certains peuvent préférer une approche par simulation du bilan hydrique. Pour ce faire, il existe (sous *windows*) deux outils informatiques, mis gracieusement à disposition par la FAO : Climwat 2.0 et Cropwat 8.0. Un mode d'emploi en français est également disponible.

En gros, dans un premier temps, Climwat 2.0 permet d'aller chercher des informations climatiques mensuelles pour un ensemble de sites dans le monde, et on peut généralement en dénicher un « assez proche » de son domicile (celui de Lyon-Bron, pour ma part). Dans un deuxième temps, ces données exportées dans Cropwat 8.0 (mais vous pouvez aussi en employer d'autres, plus personnelles encore) permettent primo de calculer des évapotranspirations mensuelles de référence. Secundo, on entre des précipitations mensuelles de notre choix. Tertio, on choisit la culture et son stade de développement, ce qui génère automatiquement la profondeur racinaire, le coefficient cultural et la fraction d'épuisement correspondants. Quarto, on indique les caractéristiques de notre sol (mais des valeurs préétablies peuvent

être choisies). Quinto, on choisit une date de plantation ou de semis et... un calendrier d'irrigation nous est automatiquement proposé !

3.7 Gestion du peautager

Si nous reprenons les éléments intervenant sur l'épuisement du réservoir utilisable (Eq. 3.2), nous avons : l'évapotranspiration (ET_c), les précipitations (P), le ruissellement (RO), l'infiltration profonde (DP), les remontées capillaires (CR) et l'irrigation (I). Tout ceci est résumé dans la Figure 48. Nous ne considérerons pas, par la suite, les remontées capillaires depuis une nappe phréatique proche de la surface. En effet, elles sont, d'une part, difficiles à estimer précisément, et d'autre part, leur influence peut être considérée comme nulle si la nappe phréatique est située à plus d'un mètre au-dessous de la zone racinaire (Allen et al., 1998).

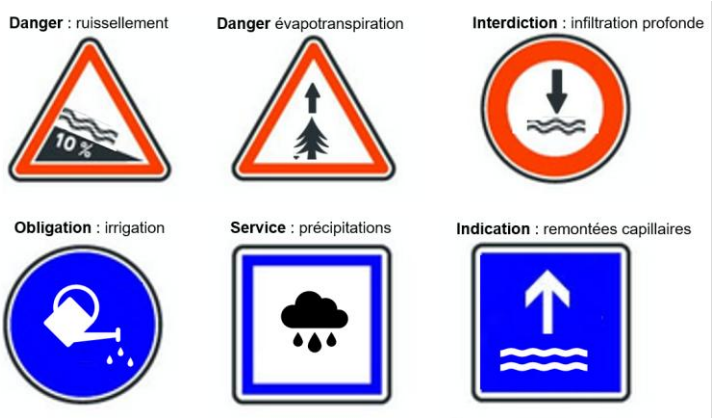


Figure 48 : Le code de l'arrosage.

3.7.1 « Code de l'arrosage » en hiver

En cette saison, l'évapotranspiration est faible, en tout cas par rapport aux précipitations. Ce sont plutôt des problèmes d'engorgement, de ruissellement et d'infiltration profonde qui risquent de se poser. Il faut donc éviter d'implanter son potager d'hiver dans un emplacement à risques comme, par exemple, une cuvette dans le

jardin[129] ; il faut entreprendre des travaux de drainage, si l'ensemble de la zone est concerné par l'engorgement ; il faut améliorer la structure du sol par des amendements de matière organique ; il faut limiter la compaction, par exemple en s'abstenant de marcher sur un sol argileux trempé ; il faut prévenir la création d'une croûte de battance, en couvrant le sol ; et... il ne faut pas sur-irriguer.

Sauf qu'en hiver, une partie des cultures est sous abris, dont certains peuvent être étanches (serre, mini-tunnel en plastique, châssis en polycarbonate, etc.). Dans ces cas, l'évapotranspiration est généralement plus élevée qu'en plein champ[130], et les précipitations sont nulles. Il faut donc soigner l'irrigation, particulièrement pour des plantules avec un faible système racinaire ou bien des semis. Mais ces considérations sont aussi valables pour les cultures d'été sous abris, où l'évapotranspiration est en plus importante !

3.7.2 « Code de l'arrosage » en été

Limiter l'évapotranspiration

L'évapotranspiration de référence (Eq. 3.1) dépend de quatre éléments qui sont : les radiations solaires, la température, l'humidité de l'atmosphère et le vent. Je voudrais ici souligner un point plus général, concernant la combinaison des différents facteurs de production. S'ils sont, dans ces notes de lecture, présentés successivement pour des raisons pédagogiques, il est temps de souligner que, d'une part, ils ne sont pas indépendants entre eux et, d'autre part, ils interagissent dans leurs effets sur la production. En ce qui concerne la dépendance entre ces éléments, il est clair que, lorsque les radiations solaires sont importantes, la température est élevée, et c'est souvent le moment où l'eau vient à manquer, ce qui peut de surcroît causer un problème de minéralisation et donc de nutrition : on en vient donc à affronter un ensemble de stress simultanés. En ce qui concerne l'interaction de ces facteurs de production, cela signifie qu'ils ne

---

[129] C'est par contre un très bon endroit pour installer un petit étang ou un potager d'été !

[130] Et disparaît avec une aération, indispensable par ailleurs à la santé des cultures.

s'ajoutent pas simplement, mais qu'ils peuvent, selon les cas, multiplier leurs effets en situation optimale, ou générer des blocages en situation de facteur limitant. C'est souvent cette dernière situation qui nous intéresse pour améliorer la production, et plusieurs théories existent[131]. La théorie du minimum de von Liebig implique qu'il faut augmenter le facteur le plus limitant, en l'espèce l'eau, pour augmenter la production. D'autres théories estiment qu'il y a une certaine substitution entre les facteurs et que, sans changer la quantité d'eau, on peut par exemple améliorer la fertilisation, ce qui aura quand même un effet (peut-être moins important) sur la production. On peut trouver dans les chapitres sur la lumière, la température et le vent, diverses solutions (ombrage, haie...) pour gérer ces différents éléments qui, par contre-coup, vont limiter le besoin en eau.

Une autre solution consiste à ne pas trop densifier les cultures, ce qui réduit l'évapotranspiration, mais aussi permet à chaque plante de disposer sans compétition d'un plus grand espace dans le sol, et donc de plus d'eau et de nutriments. Dans la même veine, les mauvaises herbes sont des compétitrices, particulièrement redoutables pour de jeunes plantules, un désherbage régulier réserve les ressources aux cultures. Plus radical, on peut en venir à tailler la plante ou à supprimer des feuilles.

Il reste aussi la solution des couvertures de sol. L'impressionnante revue de littérature de Kader et al. (2017) ne laisse aucun doute sur l'intérêt de ces techniques pour contrôler la température du sol, limiter l'enherbement et, lorsqu'il s'agit de matières organiques, améliorer la structure du sol et sa nutrition. Pour ce qui est de l'humidité, les choses s'avèrent plus compliquées. La battance du sol par les pluies est clairement limitée, ainsi que le ruissellement (surtout pour les paillages) et l'érosion hydrique. La structure du sol est donc protégée, voire améliorée, et sa capacité de rétention en eau aussi. La conservation de l'eau est généralement meilleure avec les couvertures plastiques, un peu moins bonne avec les couvertures organiques, et encore moins bonne avec un sol nu. C'est dû à l'évaporation qui est

[131] Elles seront développées plus largement dans le chapitre sur la « Santé chimique du sol ».

réduite ; mais, pour les matières organiques, il en faut une quantité importante, l'optimum étant de l'ordre de 0.8 kg/m^2 (Li et al., 2021). La technique des couvertures plastique n'est pas si simple et les résultats sont parfois surprenants (Schonbeck & Evanylo, 1998) car, en cas de précipitations, la recharge hydrique se fait mal et, au long de la saison, les bilans peuvent s'inverser. Ainsi, si une bâche plastique peut effectivement retenir l'eau, elle a également tendance à faire ruisseler les précipitations (2/3 dans les allées !) et l'irrigation, sauf si celle-ci est réalisée, sous la bâche, au goutte-à-goutte.

Certaines pratiques de travail du sol nu visent à casser la capillarité, et par conséquent, à limiter l'évaporation (Mariani & Ferrante, 2017), c'est ce qui est derrière l'adage : « Un binage vaut deux arrosages ».

Utiliser au mieux les précipitations

Nous avons vu auparavant qu'une pluie, c'est bien, mais qu'une pluie efficace, c'est mieux. Ce sera le sujet des deux prochaines sections qui visent à limiter le ruissellement et les infiltrations profondes.

L'autre problème est que la pluie ne tombe ni où on le veut, ni quand on le veut... En ce qui concerne l'espace, il est possible de la collecter assez facilement avec un toit, avec des fossés ou avec des petits bassins (ce qui a aussi des aspects esthétiques et de biodiversité intéressants). En ce qui concerne le temps, il est possible de semer plus tôt en saison, lorsque l'eau est encore assez abondante dans le sol, pour laisser aux plantes le temps de se créer un bon système racinaire. Il est aussi envisageable, non pas de regarder la lune pour semer, mais la pluie probable : autant semer ou planter lorsque des précipitations sont prévues par les bulletins météorologiques.

Limiter le ruissellement

Il existe des techniques physiques et des techniques agronomiques pour limiter le ruissellement (Adimassu et al., 2017). Comme techniques physiques, on peut citer les digues et les fossés, et même les organiser pour récupérer l'eau ; ou à plus petite échelle, utiliser des billons et des sillons. Ces techniques ont cependant l'inconvénient de réduire l'espace cultivable. De façon générale, plus le terrain est en pente, plus le ruissellement va être important ; et donc autant choisir une zone relativement plate, et même sur celle-ci, se débrouiller pour avoir un lit de semences uniformément plat. Pour les techniques

agronomiques, l'apport de matière organique structure le sol et augmente (un peu) le réservoir utilisable ; un labour approprié est conseillé (labour sur 20 cm pour Lipiec et al., 2006) ; mais aussi un mulch végétal qui ralentit l'eau, ou des bandes de végétation.

Limiter l'infiltration profonde

Les amendements avec des matières organiques, permettant d'obtenir un sol mieux structuré, donc avec un plus grand réservoir, sont sans doute à long terme la meilleure solution.

Parfois, il est envisagé de changer également la texture du sol, en apportant de l'argile, mais c'est là un travail herculéen, qui réclame des quantités dont on ne se doute pas. Toutefois, en présence de plusieurs couches de sol, un travail de labour peut aboutir à un meilleur équilibre (Mariani & Ferrante, 2017). Enfin, il faut surtout régler correctement son irrigation, pour ne pas dépasser la capacité au champ comme nous allons le voir à présent.

Irriguer efficacement

Il existe de nombreux concepts pour estimer si l'eau est bien utilisée. Une nouvelle fois, il ne s'agit pas pour le jardinier amateur de les employer directement, mais de voir les questions qu'ils soulèvent, et d'essayer empiriquement d'y répondre.

Le premier concept est l'efficience d'irrigation. Il s'agit d'un rapport entre l'eau « utilisée avantageusement » et l'eau effectivement employée. On s'intéresse particulièrement aux déperditions d'eau pendant le transport (efficience de transport qui est le rapport entre l'eau libérée à la source et l'eau appliquée au champ ; déperditions provenant de tuyaux percés, de mauvais joints) et les déperditions au champ (efficience d'application qui est le rapport entre l'eau consommée par les plantes et l'eau apportée jusqu'à elle).

En ce qui concerne l'efficience d'application, la règle la plus importante est *de ne pas aller au-dessus de la capacité au champ*, pour ne pas en perdre en ruissellement ou en infiltration profonde. L'autre règle la plus importante[132], vaut pour les cultures à enracinement profond et pourvues d'une tolérance acceptable au stress hydrique (des

[132] Et oui... il y en a deux !

tomates déjà bien développées, par exemple) : il va falloir *séparer au maximum les arrosages, jusqu'à la limite du réservoir facilement utilisable, mais remplir à chaque fois jusqu'à la capacité au champ*. En effet, cela permettra à l'eau de remplir toute la profondeur, et pas seulement de rester en surface, et donc d'une part la plante pourra être « encouragée » à créer de nouvelles racines sur toute la profondeur et, d'autre part, l'eau sera moins exposée à l'évaporation de surface.

L'efficience d'application dépend, en outre, du mode d'application. On distingue l'irrigation de surface (par planche, submersion, à la raie) qui est la plus ancienne et toujours la plus utilisée dans le monde, l'irrigation sous pression (aspersion et goutte-à-goutte) et l'irrigation souterraine ou subirrigation. L'irrigation de surface a une efficience hydraulique faible (30-40 %), qui peut être améliorée jusqu'à 80 % (Kambou et al., 2014), mais reste inférieure aux autres méthodes. Elle demande une pente et souvent des travaux de mise en place. L'irrigation sous pression par aspersion reproduit la pluie et présente une efficience de l'ordre de 60-70 %. Enfin, la micro-irrigation est clairement supérieure, avec une efficience hydraulique de 80 à 90 %. Elle nécessite néanmoins un équipement important.

> Du côté de chez Stéphane : Pour ce qui est de la production de plants par semis indirect, j'utilise plutôt la subirrigation, en bassinant les plaques alvéolées, godets ou terrines. La méthode ne *splash* pas la surface, et ne perturbe pas l'emplacement des graines ou le début de l'enracinement. Il est également conseillé de couvrir les plaques jusqu'à l'émergence, cela semble diminuer la quantité d'eau requise de 35 % (Argo & Biernbaum, 1994).

L'idée de productivité de l'eau conduit à s'interroger sur le rapport entre la quantité de biomasse produite et l'eau consommée (qui est *stricto sensu* l'évapotranspiration réelle de la plante) ; la biomasse est parfois remplacée par le revenu monétaire pour réaliser un calcul économique. Il y a une proximité avec la notion d'efficience d'utilisation de l'eau, où le dénominateur peut devenir l'eau appliquée, voire l'eau libérée à la source, éventuellement majorée des eaux de pluie.

> Du côté de chez Stéphane : C'est une idée assez importante, car arroser chichement une grande surface de plants de tomates peut conduire à un moindre résultat qu'employer la même quantité d'eau pour une surface plus réduite. Il ne sert à rien en été de cultiver un grand jardin, si nous n'avons pas « les moyens » de l'irriguer correctement. Même si la quantité d'eau en jeu est limitée pour la pomme de terre par exemple, cette considération s'applique à d'autres facteurs de production. Autant produire des pommes de terre primeur pouvant atteindre 10 € le kilo a du sens dans un petit jardin, autant des pommes de terre de conservation à un prix d'achat très abordable... Celui qui cultive une petite surface peut se consoler avec la formule : « Plus petit est le jardin, plus grand est le jardinier. »

Un dernier élément de réflexion est l'uniformité de distribution de l'eau. Est-ce que le système d'irrigation parvient à délivrer la même quantité d'eau sur toute la surface (lorsque c'est souhaité, bien entendu) ?

Pour les personnes qui se lèvent tôt[133], il reste la question : « Faut-il plutôt arroser le soir ou le matin ? ». Là, j'avoue que je ne sais que penser, car les deux seuls articles que j'ai consultés se contredisent : Ismail et al. (2008), avec la tomate, penchent pour le soir ; et Kanton et al. (2003), avec l'oignon, pour le matin. Est-ce propre à l'espèce ?

Il semble plus important, en termes de *timing*, de ne pas rater les stades de développement où l'irrigation sera efficace : germination, établissement des plantes, floraison et mise à fruit.

Méthodes biologiques

Il existe clairement des espèces qui sont plus adaptées aux situations de stress hydrique. Elles présentent une forte masse racinaire et une photosynthèse de type C4 ou CAM : elles sont naturellement destinées à être les cultures d'été. Nous les avons évoquées dans les chapitres précédents : l'amaranthe, le pourpier, la ficoïde glaciale, la tétragone et... le maïs.

---

[133] Et probablement, comme le jeune Proust, se couchent de bonne heure.

Cependant, au sein d'une même espèce, il y a également une variabilité génétique. Or, Boyer (1982) constate que le potentiel génétique des cultures est loin d'être réalisé : 3 à 7 fois moins ! Son bilan indique comme causes de cet énorme écart, d'une part le climat, et plus particulièrement l'eau, et d'autre le sol (qui ne retient pas assez l'eau et n'a pas assez de nutriments). On peut choisir d'améliorer la gestion de l'eau, comme cela a été largement évoqué jusqu'à présent, et celle des nutriments, mais aussi constater *qu'ils sont limités, et que le coût économique et environnemental va rendre difficile leur optimisation*. Dès lors, pourquoi ne pas diriger, en partie, la sélection variétale vers des plantes qui seraient capables de mieux s'adapter à cette diminution des intrants, plutôt que de tout miser sur des plantes très performantes en conditions idéales, conditions qu'on ne parvient pas à réunir ?

Mais les légumes ne sont pas seuls dans le sol. Ils sont en interaction avec d'autres organismes vivants, en particulier les champignons. Grâce à des mycorhizes arbusculaires, ces champignons leur permettent, en échange d'une part de leur photosynthèse, de collecter un peu plus d'eau, peut-être ? Au terme d'un article-fleuve, Augé (2001) conclut que « les effets des mycorhizes sur les relations plante-eau ne sont pas aussi dramatiques et consistants que ceux concernant l'acquisition de phosphore et la croissance de la plante ». Plus loin, l'auteur qualifie ces effets de « subtils, dépendant des circonstances et spécifiques à chaque symbiose ». Plus encourageant, à la lecture de la littérature dans son ensemble sur le sujet, il précise qu'ils peuvent finalement être substantiels (bien qu'occasionnels), nous allons donc les détailler rapidement.

Il est établi que les plantes mycorhizées ont une croissance plus importante, même lors d'une sécheresse, et cela, en grande partie grâce au phosphore supplémentaire dont elles disposent. Or, la taille, elle-même, induit des effets : il peut passer plus d'eau par une grande plante, son taux de transpiration est plus élevé et elle peut produire plus de photosynthèse (plus de surface foliaire) ; elle peut, avec un système racinaire plus développé, accéder à un plus grand réservoir utilisable. Lors de sécheresses, les plantes mycorhizées semblent pouvoir retarder la déshydratation des feuilles et récupérer plus rapidement ensuite. Elles sont capables, *à taille racinaire égale*, de

mieux vider le contenu en eau du sol ; en effet, les hyphes des champignons modifient l'architecture des racines et la partie hors des racines permet une exploration plus complète du sol. Il est possible qu'ils permettent d'exploiter une partie de l'eau liée inaccessible aux autres plantes. Les plantes mycorhizées ont, en outre, une meilleure productivité de l'eau. Enfin, indirectement, les hyphes améliorent la structure du sol et sa capacité à retenir l'eau : le réservoir utilisable est donc d'autant plus grand. On comprendra donc que diverses approches, dites de sol vivant, essaient de tirer parti de telles symbioses[134].

Le sol est aussi habité par de multiples autres organismes qui améliorent sa structure par des « colles » et des déplacements, et donc augmentent le réservoir utilisable. Certains minéralisent la matière organique. Il faut se souvenir que nous irriguons non seulement pour les plantes, mais pour entretenir cette rhizosphère... qui nourrit les plantes.

3.7.3 « Coût » de l'irrigation

Petite estimation

Une des limites de l'irrigation est, bien sûr, son coût. D'une part, le matériel nécessaire, mais parfois aussi le prix de l'eau elle-même. Lorsque mes faibles réserves collectées sont épuisées, j'en suis réduit à employer l'eau municipale[135]. Avec un ET_0=4.5 mm en été, il faut fournir, au bout de la semaine, s'il ne pleut pas : 31.5 litres par mètre carré pour combler la perte. En se basant sur un prix moyen 2022 en Rhône-Alpes de 4 €/m^3, cela donne, toujours par mètre carré et par semaine, une dépense de 31.5/1000×400= 12.6 centimes, autrement dit 1 € pour 8 m^2 chaque semaine ! Mais le temps, c'est aussi de l'argent, avec un débit standard de 12 litres par minute, un tel arrosage au tuyau prend donc environ 2'30 par mètre carré...

---

[134] Voir les chapitres sur la santé du sol.

[135] Dans la mesure où elle n'est pas rationnée et que je juge éthique d'employer cette eau pour... me nourrir.

C'est pas sourcier !

Si, comme c'est mon cas, il vous manque de l'eau à bon marché pour irriguer, le mieux est encore de trouver une source... On m'a souvent suggéré de faire appel à un sourcier ; comme beaucoup de scientifiques, je dois avouer que je suis *a priori* un peu décontenancé par une telle proposition. Alors, qu'en dit la littérature scientifique ? D'abord, qu'aucune explication physique ou physiologique sérieuse n'a jamais été avancée pour expliquer le talent particulier de ces individus. Mais si cela s'avérait fonctionner, nombre de scientifiques se pencheraient sérieusement sur le sujet, car c'est le prix Nobel assuré pour qui fournirait cette explication.

Et pour au moins savoir si cela fonctionne, il faut mettre en place une expérience. La plus conséquente de ce genre s'appelle l'expérience de Scheunen (Enright, 1995) ; elle a bénéficié d'un financement généreux du gouvernement allemand, qui a permis la participation de 500 sourciers et la mise en place d'un dispositif expérimental très rigoureux. Grosso modo, il y a, au premier étage d'une maison, celui où sont les sourciers, une ligne de 10 mètres avec des graduations ; et au rez-de-chaussée, il y a la même ligne, avec une sorte de rail qui porte perpendiculairement un tuyau où passe de l'eau courante. Ce tuyau est déplaçable aléatoirement le long de la ligne, et le but du jeu est donc de deviner son emplacement depuis le premier étage. C'est un dispositif que *tous* les participants ont entériné... Autre fait important, la direction de l'étude a été confiée à des chercheurs *franchement* empathiques. Ces derniers concluent que les sourciers, dans leur ensemble, ne font pas mieux que le hasard, sauf quelques individus exceptionnels. Les données étant publiques, leur travail statistique a été repris, car les techniques employées étaient, pour le moins, idiosyncrasiques ; et la nouvelle conclusion, basée cette fois sur des techniques plus classiques, est que : même ces individus, *exceptionnels sur une partie de leurs tentatives*, ne font pas mieux que le hasard dans la totalité de leurs essais ! Pire que cela, il existe une stratégie très simple et meilleure que toutes leurs performances : il s'agit de choisir le point du milieu de la ligne, on est ainsi assuré de ne jamais être trop loin de la « source » (et, de surcroît, cela va simplifier l'utilisation de l'eau si on se place au milieu de notre terrain). En fait, c'est la notion même de « source », qui est peut-être déjà fortement discutable ; parce

qu'en général, il y a assez rarement de véritable filet d'eau souterrain, mais plutôt une roche poreuse contenant localement de faibles quantités d'eau qui s'écoule très doucement. Enright souligne que, sur 500 personnes pensant posséder ce don, seules 50 ont été gardées par les investigateurs comme étant suffisamment performantes et, au final, les six individus ayant réalisé une série exceptionnelle, dans un bon jour en quelque sorte, n'arrivent pas à la reproduire. Il conclut, non sans malice, que le problème n'est pas seulement de savoir si ce don existe, mais semble-t-il aussi de trouver la personne qui le possède ! Il nous apprend, enfin, qu'il y a déjà eu un point réalisé en 1917 par le département américain de géologie, point qui était basé sur plus de 500 études. Il en cite la conclusion : « it is doubtful whether so much investigation and discussion have been bestowed on any other subject with such absolute lack of positive results. It is difficult to see how for practical purposes the entire matter could be more thouroughly discredited, and it should be obvious to everyone that further tests by the United States Geological Survey on this so-called 'witching' of water, oil or others minerals would be a misuse of public fonds » On arrête les frais ?

3.7.4 Qualité de l'eau

Bis repetita, l'eau n'est jamais pure. Et il n'y a pas de miracles, même l'eau bénite peut contenir une trentaine de bactéries pathogènes pour l'être humain catholique (Jurado et al., 2002).

Depuis qu'on connaît l'existence des pluies acides et leurs dégâts sur les forêts et les cultures (Singh & Agrawal, 2007), on s'est intéressé à la composition des pluies : et elles contiennent bien des choses, en particulier des pesticides à des doses dont « les conséquences écotoxicologiques n'ont pas encore été complètement explorées » (Dubus et al., 2000) ; puisque les gouttelettes d'eau se condensent autour d'aérosols, on ne doit guère en être surpris...

On sait que l'agriculture a une forte responsabilité dans la pollution des rivières par ruissellement, et des aquifères par infiltration profonde (Shortle et al., 2001) ; mais beaucoup d'autres sources y contribuent, par exemple les autoroutes (Opher & Friedler, 2010). On sera, par conséquent, bien inspiré de faire réaliser une petite analyse de l'eau

que nous allons utiliser, qu'elle provienne d'une source ou d'une eau de surface.

L'eau municipale, quant à elle, est régulièrement analysée. Elle contient du chlore afin de neutraliser divers pathogènes. Et on peut se demander si elle ne va pas aussi neutraliser la vie du sol ou poser des problèmes aux plantes ? En ce qui concerne la production de plants, il est nécessaire, pour recycler l'eau, d'employer des techniques de désinfection afin d'éviter la prolifération de pathogènes ; la chloration étant l'une de ces techniques. Cayanan et al. (2008) montrent, et cela recoupe d'autres études, qu'une concentration inférieure à 2.5 mg/L ne cause pas de problèmes. Dans la commune de mon potager[136], elle est à 0.35 mg/L en février 2024. En ce qui concerne la santé du sol, Song et al. (2019) recyclent également de l'eau en utilisant du chlore (au total 43 mg/m^2, donc l'équivalent du contenu de 120 litres d'eau de ma commune), mais dans l'objectif de ne pas boucher une micro-irrigation. Ils constatent une baisse de la biodiversité microbienne et de la minéralisation, mais la production de maïs reste stable. De tels problèmes ne sont donc pas exclus avec une irrigation à l'eau municipale.

Nous utilisons également beaucoup d'eau à usage domestique, et concernant sa réutilisation pour irriguer[137], je propose d'écouter des voix africaines (Inyinbor et al., 2019). Dans le sub-Sahara, la plus grande partie de l'agriculture repose sur l'eau de pluie (*rain-fed agriculture*) ; les auteurs indiquent que cela ne suffira pas comme solution aux problèmes de malnutrition et de croissance de la population, et qu'il faut adopter l'irrigation. L'eau est, dans cette zone, une ressource particulièrement précieuse, aussi le recyclage a été identifié comme une des voies pour une agriculture durable. Il ne faut pas toutefois que les légumes produits avec de l'eau recyclée ne causent plus de dommages que de bienfaits ! Si la consommation de légumes est recommandée pour la santé, 5 072 morts par an lui sont imputés aux États-Unis, à cause de contaminations par des applications inappropriées de fumiers ou fertilisants, d'intrusion d'animaux dans le

---

[136] Vous pouvez vérifier pour la vôtre : https://orobnat.sante.gouv.fr

[137] On reprendra ce thème dans la section 11.7.5

champ (déjections), et... d'irrigation avec une eau insalubre. L'eau domestique est catégorisée en eau noire (en contact avec des fèces humaines), eau grise où des éléments ont été ajoutés (produit d'entretien, savon, lessive...) et eau blanche, par exemple celle du lavage de légumes et parfois l'eau de cuisson. L'eau noire est bien évidemment une collection de pathogènes, et à éviter absolument. L'eau grise peut contenir des métaux lourds, des produits pharmaceutiques (provenant de l'urine), des produits ménagers et de soin, voire de l'huile (eau de cuisson) ou des cheveux et des fragments de peau. Il s'avère que, même avec les traitements municipaux ou les traitements individuels par filtres plantés (phytotraitement), on ne parvient pas à éliminer l'ensemble de ces éléments, qui peuvent dès lors se bioaccumuler dans le sol et dans les plantes. Le mode d'irrigation a également une importance : l'irrigation par aspersion étant plus problématique. En conclusion, les auteurs disent que les dangers de l'irrigation *directe* avec de l'eau domestique doivent être rendus publics, qu'elle doit être interdite, et que des réglementations pour son traitement avant usage doivent être mises en place.

Ceci dit, nous nous sommes jusqu'ici focalisés sur les composants à problèmes, mais il est courant d'ajouter volontairement à l'eau des éléments utiles, comme des fertilisants : on parle alors de fertigation (Sandal & Kapoor, 2015). Elle présente, particulièrement en micro-irrigation, l'avantage d'utiliser plus efficacement les nutriments et l'eau : ainsi, 90 % des nutriments peuvent être absorbés, alors que c'est seulement 10-40 % sous forme de granulés. Il y a donc meilleure utilisation et, par conséquent, une moindre perte sous forme de lixiviation, spécialement dans les sols sableux qui y sont sujet. L'application est uniforme et peut être faite aux moments les plus opportuns, selon le stade de développement de la culture. C'est toutefois une technique délicate, surtout employée par les professionnels ; pour des amateurs, c'est peut-être lors de la production de plants qu'elle devient intéressante, car le substrat n'est pas toujours assez riche pour combler les besoins en nutriments de la plantule sur plusieurs semaines.

Le dernier point à aborder concerne la température de l'eau d'irrigation. Il arrive, en effet, que celle-ci soit nettement plus basse que la température de l'air ambiant. Or, on sait que, dans la zone 0-

12 °C, il est possible pour des plantes fragiles de subir des dommages. Est-ce que ceci peut arriver par l'intermédiaire d'une eau d'irrigation froide en contact avec les racines ? Dans une expérience en serre à 27 °C, Brockwell et Gault (1976) ont montré que, pour des fabacées sensibles au froid (soja, lablab), la température de l'eau avait un effet dès qu'elle passait au-dessous de 15 °C ; mais pas pour des espèces plus rustiques (lupin, haricot qui est pourtant assez sensible). Worral (1977) complète cela avec des informations, fort intéressantes pour les semis indirects, concernant la germination. Avec une température ambiante de 25 °C/20 °C (jour/nuit), il montre que les vitesses de germination de la laitue et du chou sont peu affectées par une température d'eau fraîche, alors que c'est nettement le cas pour le haricot (ah quand même !) et la tomate. Il me semble que la conclusion a en tirer soit de laisser l'eau d'irrigation atteindre la température ambiante avant de l'employer.

3.8 Changement climatique et eau

La hausse des températures semble à présent incontestée sur le plan scientifique. La base du raisonnement concernant l'eau tient alors dans la formule de Clausius-Clapeyron, qui dit que l'humidité spécifique va augmenter avec la température (Figure 49). Dès lors, on s'attend à une augmentation de l'évapotranspiration et des précipitations, et donc à une intensification du cycle hydrologique.

Dans sa revue sur le sujet, Huttington (2006) relève plusieurs indices confirmant cette prédiction. Au niveau global, les précipitations ont augmenté de 2 % au vingtième siècle, et nettement plus à nos latitudes (7 à 12 %). Le ruissellement a augmenté de 3 % (estimé par une augmentation du flux dans les rivières). La nébulosité devrait avoir augmenté, car elle est clairement négativement reliée à l'amplitude de température jour/nuit, dont on sait qu'elle a diminué. De même, pour ce qui est des glaciers, on a enregistré une amplitude plus grande des variations entre leur enneigement et leur fonte. En ce qui concerne l'évapotranspiration, le problème est qu'il n'existe pas d'aussi longues séries temporelles pour des mesures directes, mais plusieurs mesures indirectes (différence entre précipitations et ruissellement, relation avec la longueur de la saison poussante) en rendent l'augmentation très

probable. Des pluies plus extrêmes ont été observées, mais l'article ne relève pas une augmentation significative des crues ou des cyclones *à cette date* (2006). Cependant, l'auteur précise (longuement) que leur augmentation risque d'être détectée sur un plus long terme, et *a fortiori* si le climat se réchauffe encore.

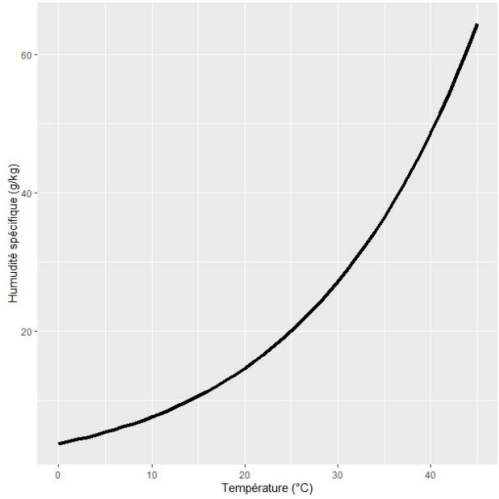


Figure 49 : Visualisation de l'équation de Clausius-Clapeyron, reliant l'humidité spécifique à la température.

Globalement, si les flux entre ces réservoirs augmentent, la conclusion est que le cycle hydrologique s'est intensifié. Il faut aussi insister sur le fait qu'il y a de fortes disparités régionales concernant ces tendances. Au-delà du réchauffement climatique, l'être humain joue un rôle direct sur le cycle hydrologique : en gérant les rivières, en modifiant le paysage par l'artificialisation et la déforestation, et en consommant pour divers usages une partie des eaux de surface et souterraines.

Le rapport du GIEC (2021) permet d'actualiser ces observations : « Il est davantage prouvé[138] que ces épisodes extrêmes (tels que des canicules, de fortes précipitations, des sécheresses et des cyclones tropicaux) sont plus fréquents et plus intenses et qu'ils sont attribuables aux activités anthropiques ». Et pour le futur : « La poursuite du réchauffement climatique devrait intensifier davantage le

[138] En référence au rapport précédent.

cycle de l'eau à l'échelle de la planète, y compris sa variabilité, les précipitations des moussons et la sévérité des épisodes de précipitations et des sécheresses ». Et les conséquences pour le sujet qui nous intéresse sont soulignées : « Il est projeté que les seuils de chaleur extrême critiques pour l'agriculture et la santé seront dépassés plus fréquemment pour les niveaux de réchauffement planétaire les plus élevés (degré de confiance élevé) ».

Pour être complet, au cycle naturel de l'eau, s'ajoute un cycle incluant l'eau virtuelle. Cette dernière correspond aux importations par les régions arides de biens demandant beaucoup d'eau pour leur production. Le cycle hydrologique est très vulnérable aux impacts humains : en plus du risque de sécheresse agricole, qui réclame donc de plus irriguer, il faut compter avec une croissance de la population et de la demande d'eau par habitant (Oki et al., 2004). Cela rend donc cette ressource encore plus précieuse et disputée.

Aussi, à côté des nombreuses économies envisagées (recyclage, récupération, ombrage), nous pouvons participer d'une dernière façon pour notre potager d'été : en envisageant la méthode de l'irrigation déficitaire. Dans une méta-analyse, Singh et al. (2021) rappellent la relation positive entre eau disponible (en partie par irrigation) et production : par rapport à une irrigation complète, une irrigation supérieure à 80 % conduit à une réduction de 7 % de la production ; et une irrigation inférieure à 35 % amène à 50 %. Toutefois, lorsqu'elle est *un peu* plus rare, l'eau est mieux utilisée par les plantes, d'où leur conclusion : « La réduction de récolte en cas de déficit faible à modéré (>65 %), qui est accompagnée par des gains de productivité de l'eau, peut se justifier à la lumière des rationnements d'eau prévisibles ».

Une petite note finale concernant le potager lors des autres saisons. Nous avons déjà souligné que le réchauffement climatique offrait aussi des opportunités, avec une plus longue saison poussante (et même en hiver !), sachant de plus que le rapport précipitations sur évapotranspiration est alors favorable. Cependant, les précipitations qui semblent augmenter, particulièrement en hiver dans le nord de la France, pourraient aussi y apporter des phénomènes d'engorgement plus fréquents, voire des inondations.

De mal en pis, la Figure 50 qui est une adaptation de Porter et Semenov (2005) montre en quoi une augmentation de la moyenne *et*

de la variance des précipitations (anticipée par le GIEC) vont créer plus de problèmes que la seule augmentation de moyenne.

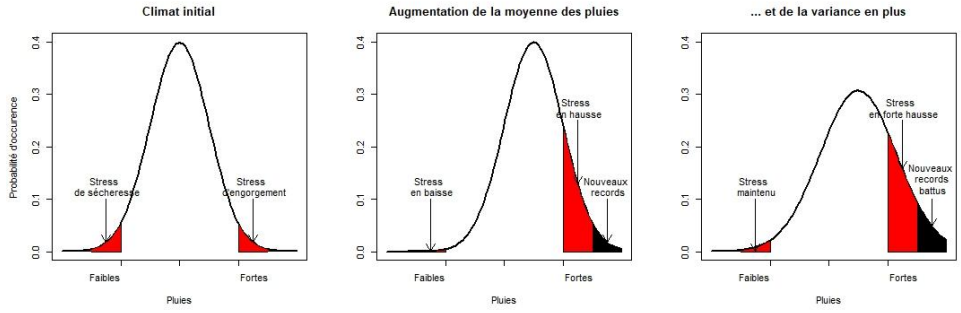


Figure 50 : Comparaison du stress occasionnés par un climat initial (à gauche) avec une augmentation de la moyenne des pluies (au centre), puis avec une augmentation de la moyenne et de la variance (à droite).

3.9 Références

Adimassu, Z., Langan, S., Johnston, R., Mekuria, W., & Amede, T. (2017). Impacts of soil and water conservation practices on crop yield, run-off, soil loss and nutrient loss in Ethiopia: review and synthesis. *Environmental Management, 59*(1), 87-101.

Ali, M. H., & Mubarak, S. (2017). Effective rainfall calculation methods for field crops: an overview, analysis and new formulation. Asian Research *Journal of Agriculture, 7*(1), 1-12.

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements* - FAO Irrigation and drainage paper 56. Fao, Rome, 300(9), D05109.

Alvarado, V., & Bradford, K. J. (2002). A hydrothermal time model explains the cardinal temperatures for seed germination. *Plant, Cell & Environment, 25*(8), 1061-1069.

Augé, R. M. (2001). Water relations, drought and vesicular-arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Mycorrhiza, 11*(1), 3-42.

Bierhuizen, J. F., & De Vos, N. M. (1959). *The effect of soil moisture on the growth and yield of vegetable crops (No. 11)*. Institute for Land and Water Management Research, 10 pages.

den Besten, N., Steele-Dunne, S., de Jeu, R., & van der Zaag, P. (2021). Towards monitoring waterlogging with remote sensing for sustainable irrigated agriculture. *Remote Sensing, 13*(15), 2929.

Boyer, J. S. (1982). Plant productivity and environment. *Science*, *218*(4571), 443-448.

Bradford, K. J. (1990). A water relations analysis of seed germination rates. *Plant Physiology, 94*(2), 840-849.

Brockwell, J., & Gault, R. R. (1976). Effects of irrigation water temperature on growth of some legume species in glasshouses. Australian *Journal of Experimental Agriculture, 16*(81), 500-505.

Brouwer, C., Heibloem, M., & Land, (1992). *Irrigation water needs. Irrigation Water Management / Training manual no.3* (FAO), 59p.

Cayanan, D. F., Zheng, Y., Zhang, P., Graham, T., Dixon, M., Chong, C., & Llewellyn, J. (2008). Sensitivity of five container-grown nursery species to chlorine in overhead irrigation water. *HortScience, 43*(6), 1882-1887.

Datta, S., Taghvaeian, S., & Stivers, J. (2017). Understanding soil water content and thresholds for irrigation management. Oklahoma Cooperative Extension Service. [un document issu de la littérature grise très bien réalisé].

Dastane, N. G. 1974). *Effective rainfall in irrigated agriculture. F.A.O. Irrigation and Drainage Paper 25*. Rome, Italy, 62 p.

Dubus, I. G., Hollis, J. M., & Brown, C. D. (2000). Pesticides in rainfall in Europe. *Environmental Pollution, 110*(2), 331-344.

Enright, J. T. (1995). Water dowsing: the Scheunen experiments. *The Science of Nature*, *8*(82), 360-369.

Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D., Basra, S.M.A. (2009). Plant Drought Stress: Effects, Mechanisms and Management. In E. Lichtfouse, M. Navarrete, P. Debaeke, S. Véronique, and C. Alberola (Eds.), *Sustainable Agriculture* (p. 209-227). Springer, Dordrecht.

GIEC, 2021 : Résumé à l'intention des décideurs. In: Changement climatique 2021: les bases scientifiques physiques. Contribution

du Groupe de travail I au sixième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [publiésous la direction de Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, et B. Zhou]. Cambridge University Press.

Gummerson, R. J. (1986). The effect of constant temperatures and osmotic potentials on the germination of sugar beet. *Journal of Experimental Botany, 37*(6), 729-741.

Haise, H. R., & Hagan, R. M. (1967). Soil, plant, and evaporative measurements as criteria for scheduling irrigation. *Irrigation of Agricultural Lands, 11*, 575-604.

Huntington, T. G. (2006). Evidence for intensification of the global water cycle: Review and synthesis. *Journal of Hydrology, 319*(1-4), 83-95.

Inyinbor, A. A., Bello, O. S., Oluyori, A. P., Inyinbor, H. E., & Fadiji, A. E. (2019). Wastewater conservation and reuse in quality vegetable cultivation: Overview, challenges and future prospects. *Food Control, 98*, 489-500.

Ismail, S. M., Ozawa, K., & Khondaker, N. A. (2008). Influence of single and multiple water application timings on yield and water use efficiency in tomato (var. First power). *Agricultural Water Management, 95*(2), 116-122.

Jurado, V., Ortiz-Martinez, A., Gonzalez-delValle, M., Hermosín, B., & Saiz-Jimenez, C. (2002). Holy water fonts are reservoirs of pathogenic bacteria. *Environmental Microbiology, 4*(10), 617-620.

Kader, M. A., Senge, M., Mojid, M. A., & Ito, K. (2017). Recent advances in mulching materials and methods for modifying soil environment. *Soil and Tillage Research, 168*, 155-166.

Kambou, D., Xanthoulis, D., Ouattara, K., & Degré, A. (2014). Concepts d'efficience et de productivité de l'eau (synthèse bibliographique). *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement, 18*(1), 108-120.

Kanton, R. A. L., Abbey, L., & Gbene, R. H. (2003). Irrigation schedule affects onion (Allium cepa L.) growth, development, and yield. *Journal of Vegetable Crop Production, 9*(1), 3-11.

Klocke, N. L., Currie, R. S., & Aiken, R. M. (2009). Soil water evaporation and crop residues. *Transactions of the ASABE, 52*(1), 103-110.

Li, R., Li, Q., & Pan, L. (2021). Review of organic mulching effects on soil and water loss. *Archives of Agronomy and Soil Science*, *67*(1), 136-151.

Lipiec, J., Kuś, J., Słowińska-Jurkiewicz, A., & Nosalewicz, A. (2006). Soil porosity and water infiltration as influenced by tillage methods. *Soil and Tillage research*, *89*(2), 210-220.

Mariani, L., & Ferrante, A. (2017). Agronomic management for enhancing plant tolerance to abiotic stresses—drought, salinity, hypoxia, and lodging. *Horticulturae, 3*(4), 52.

Minasny, B., & McBratney, A. B. (2018). Limited effect of organic matter on soil available water capacity. *European Journal of Soil Science, 69*(1), 39-47.

Moisselin, J. M., Schneider, M., Canellas, C., & Mestre, O. (2002). Les changements climatiques en France au XXe siècle-Etude des longues séries homogénéisées de données de température et de précipitations. *La Météorologie, 38*, 45-56.

Oki, T., Entekhabi, D., & Harrold, T. I. (2004). The global water cycle. In R. S. J. Sparks and C. J. Hawkesworth (Eds.), *The state of the planet: Frontiers and challenges in geophysics*, IUGG, (Vol. v. 19, p. 225–237). Washington, DC: American Geophysical Union.

Opher, T., & Friedler, E. (2010). Factors affecting highway runoff quality. *Urban Water Journal, 7*(3), 155-172.

Pardossi, A., & Incrocci, L. (2011). Traditional and new approaches to irrigation scheduling in vegetable crops. *HortTechnology, 21*(3), 309-313.

Pereira, L. S., Paredes, P., López-Urrea, R., Hunsaker, D. J., Mota, M., & Shad, Z. M. (2021). Standard single and basal crop coefficients for vegetable crops, an update of FAO56 crop water requirements approach. *Agricultural Water Management, 243*, 106196.

Porter, J. R., & Semenov, M. A. (2005). Crop responses to climatic variation. Philosophical *Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 360*, 2021-2035.

Raven, P. H., Ervert, R. F., & Eichhorn, S. E. (2014). *Biologie végétale*. De Boeck, Bruxelles.

Sandal, S. K., & Kapoor, R. (2015). Fertigation technology for enhancing nutrient use and crop productivity: An overview. *Himachal Journal of Agricultural Research, 41*(2), 114-121.

Saxton, K. E., & Rawls, W. J. (2006). Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil science society of America Journal*, *70*(5), 1569-1578.

Schonbeck, M. W., & Evanylo, G. K. (1998). Effects of mulches on soil properties and tomato production I. Soil temperature, soil moisture and marketable yield. *Journal of Sustainable Agriculture, 13*(1), 55-81.

Shortle, J. S., Abler, D. G., & Ribaudo, M. (2001). Agriculture and water quality: the issues. In J.S. Shortle and D.G. Abler (Eds.), *Environmental policies for agricultural pollution control*, CAB International, Wallingford, UK.

Sinclair, T. R., & Park, W. I. (1993). Inadequacy of the Liebig limiting-factor paradigm for explaining varying crop yields. *Agronomy Journal, 85*(3), 742-746.

Singh, A., & Agrawal, M. (2007). Acid rain and its ecological consequences. Journal of *Environmental Biology, 29*(1), 15.

Singh, M., Singh, P., Singh, S., Saini, R. K., & Angadi, S. V. (2021). A global meta-analysis of yield and water productivity responses of vegetables to deficit irrigation. *Scientific Reports, 11*(1), 22095.

Song, P., Feng, G., Brooks, J., Zhou, B., Zhou, H., Zhao, Z., & Li, Y. (2019). Environmental risk of chlorine-controlled clogging in drip irrigation system using reclaimed water: the perspective of soil health. *Journal of Cleaner Production, 232*, 1452-1464.

Thirel, G. (2009). *Amélioration des prévisions d'ensemble des débits sur la France de SAFRAN-ISBA-MODCOU* (Doctoral dissertation, Université Paul Sabatier-Toulouse III).

Vanino, S., Nino, P., De Michele, C., Bolognesi, S. F., D'Urso, G., Di Bene, C., ... & Napoli, R. (2018). Capability of Sentinel-2 data for estimating maximum evapotranspiration and irrigation

requirements for tomato crop in Central Italy. Remote *Sensing of Environment, 215*, 452-470.

Worrall, R. J. (1977, September). The Effect Of Irrigation Water Temperature On The Germination And Growth Of Plants. In *Symposium on Propagation and Raising of Nursery Stock 79* (pp. 145-152).

Zhao, W., Liu, L., Shen, Q., Yang, J., Han, X., Tian, F., & Wu, J. (2020). Effects of water stress on photosynthesis, yield, and water use efficiency in winter wheat. *Water, 12*(8), 2127.

3.10 Ctrl-R

```
##################################################
########### GRAPHIQUE DES PRECIPITATIONS MENSUELLES
##################################################

require(nasapower)
daily_data <- get_power(
 community = "ag",
 lonlat = c(4.6633554,45.8179161),
 pars = c("PRECTOTCORR"),
 dates = c("2010-01-01", "2022-12-31"),
 temporal_api = "daily")

daily_data<-as.data.frame(daily_data)
jours<-c(31,28.25,31,30,31,30,31, 31,30,31,30,31)
y<- tapply(daily_data[,8],daily_data[,4],mean)*jours

plot(1:12,y, axes=FALSE, xlab="",ylab="Précipitations (mm)",
type="l",ylim=c(0,max(y)))
box()
axis(side=2)
axis(side=1,at=1:12,label=c("Jan","Fév","Mar","Avr","Mai","Ju
i","Jul","Aoû","Sep","Oct","Nov","Déc"))


##############################################
########### EVAPOTRANSPIRATION DE REFERENCE ETP0
##############################################

require(FAO56)
require(geosphere)

# Entrées pour vent, températures, humidité, soleil
u2<-2
Tmax<-20
Tmin<-10
rh=0.5
```

```
date<-'2024-05-15'
n<-8

# Entrées pour latitude et élévation
elev<-250
lat<-45.8

es<-MSVP(Tmax,Tmin)
ea<-rh*SatVP((Tmax+Tmin)/2)
N<-daylength(lat=lat, doy=date)

ETo_FPM(u_2 = u2, e_a = ea, T_min = Tmin, T_max = Tmax, phi_deg
= lat,
elev = elev, date =date , n = n, N = N)


#####################################
########## CALCULS D HUMIDITE DE L AIR
#####################################

require(humidity)

# transformation de Celdius en Kelvin (ici pour 20°C)
TC<-20
C2K(TC)
# pression de vapeur saturante en Pa à cette température
100*SVP.ClaCla(C2K(TC))
# Humidité spécifique saturante correspondante en kg/k puis en
g/kg
SH(100*SVP.ClaCla(C2K(TC)))
1000*SH(100*SVP.ClaCla(C2K(TC)))

# pression de vapeur partielle : 1000 Pa
e<-1000
# Humidité spécifique correspondante en kg/kg
SH(e, p = 101325)
# Humidité relative correspondante (en %)
SH2RH(q=SH(e, p = 101325), t=C2K(20), p = 101325, isK = TRUE)
# Température au point de rosée correspondante en °C
f<-function(t,e){e-100*SVP.ClaCla(C2K(t))}
uniroot(f,e=1000,lower=-20,upper=50)


######################################
########## GRAPHE DE CLAUSIUS-CLAPEYRON
######################################
# pour la vapeur saturante

TC<-0:45
HS<-1000*SH(100*SVP.ClaCla(C2K(TC)))
D<-data.frame(TC,HS)
require(ggplot2)
```

```
ggplot(data=D)+aes(x=TC,y=HS)+geom_line(linewidth=1.5)+theme_
gray()+xlab("Température    (°C)")+ylab("Humudité    spécifique
(g/kg)")


##########################################
########## CALCUL DU RESERVOIR UTILISABLE
##########################################
# selon la textute et MO du sol

soil<-function(S,C,OM){
### Attention S (sable) et C (argile) en décimales
### et OM en pourcentages
WC1500t <- -0.024*S+ 0.487*C +0.006*OM+0.005*S*OM-0.013*C*OM
+0.068*S*C+0.031
WC1500<-WC1500t + (0.14*WC1500t - 0.02)

WC33t      <-      -      0.251*S+0.195*C+0.011*OM+0.006*S*OM-
0.027*C*OM+0.452*S*C+0.299
WC33 <- WC33t+(1.283*WC33t^2-0.374*WC33t-0.015)

AWC <- WC33 - WC1500

WCs33t<-0.278*S+0.034*C+0.022*OM-0.018*S*OM-0.027*C*OM-
0.584*S*C+0.078
WCs33<- WCs33t+ (0.636*WCs33t-0.107)
WCs<- WC33 + WCs33 -0.097*S + 0.043

BD <- (1-WCs)*2.65

list(WCs=WCs,WC33=WC33,WC1500=WC1500,AWC=AWC,BD=BD)
}

### avec mes mesures 44/34/22 (Sable/Limon/Argile) et MO=7.6%
soil(0.44,0.22,7.6)
```

4 Vent

« Cela qui ne peut être peint. » (*Pline l'Ancien*)

4.1 Mesure du vent

Le vent est un déplacement d'air. Sa vitesse et sa direction sont évaluées dans leur composante horizontale. La vitesse est mesurée grâce à différents types d'anémomètres, et est parfois rapportée à l'échelle de Beaufort qui permet de qualifier ce vent (de brise, coup de vent, tempête...). La vitesse moyenne du vent est relevée sur quelques minutes, mais aussi ses possibles accélérations soudaines, appelées rafales. Savoir à quelle hauteur cette mesure de vitesse est effectuée (souvent 2 m, 10 m ou 50 m) est important, puisque cela se traduit par des vitesses au sol fort différentes (voir plus loin, Figure 52). La direction du vent se mesure, elle, avec une girouette car, comme le disait Edgar Faure : « Ce n'est pas la girouette qui tourne, c'est le vent ». La durée d'un vent « constant » s'avère également intéressante.

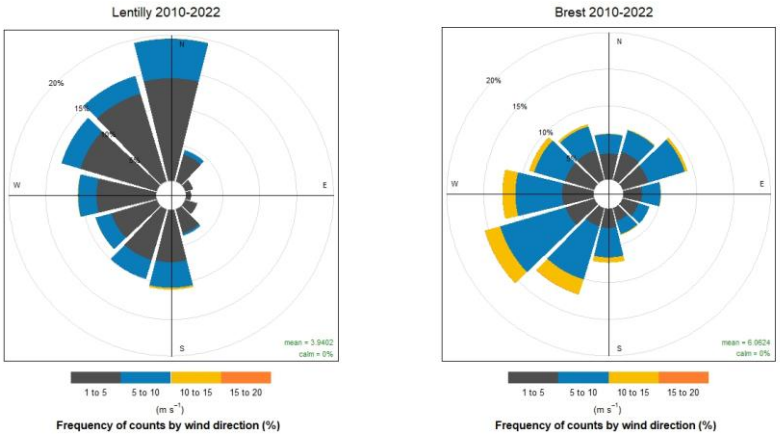


Figure 51 : Roses des vents (à 10 mètres) sur la période 2010-2022 comparant un village proche de Lyon et la ville de Brest. L'élongation des segments montre la direction d'origine du vent, en l'espèce essentiellement le sud-ouest ; et la couleur leur vitesse, nettement plus élevée à Brest, ville côtière.

Les vents dominants, en un lieu et une période, peuvent être représentés sur une rose des vents (Figure 51). Ce qu'on voit assez peu

sur la représentation, ici donnée sur une longue période, est la présence des événements sévères qui sont de faible fréquence, mais peuvent s'avérer catastrophiques. De plus, l'évolution temporelle du vent est perdue : en Europe, un rythme diurne est observé, avec un vent qui commence à souffler le matin, pour se calmer le soir (Holttinen, 2005). Pour ce qui est du rythme saisonnier, selon les lieux, soit le vent s'avère plus fort les mois d'hiver (ce qui est le cas dans la région lyonnaise, par exemple), soit les moyennes mensuelles sont plus ou moins stables[139].

4.2 Réponse des plantes au vent

4.2.1 Croissance

Un abri du vent permet de gagner un à trois degrés de température, ce qui a un effet bénéfique sur la croissance des végétaux en conditions froides ; mais *peut être*, à l'inverse, dommageable en conditions chaudes. En effet, si le modèle FAO Penman-Monteith (équation 3.1) indique que le vent augmente le taux de transpiration (Allen et al., 1998 ; fig. 10, p. 30), le bilan sur les plantes abritées est complexe, vu l'élévation concomitante de température et leur croissance supérieure. Dès lors, il n'est pas clair que le stress hydrique soit réduit à l'abri (Grace, 1988).

4.2.2 Anémorphose

La plante répond par des adaptations morphologiques au vent (anémorphose) : ses feuilles vont être plus petites et plus épaisses ; elle va produire moins de fleurs, de fruits et de graines ; elle va développer une tige plus courte et plus large ; et un système racinaire plus important (Gardiner et al., 2016). Il est même possible d'observer des transformations de la forme générale de la plante qui peut devenir rabougrie et asymétrique (forme dite Krummholtz) en situation très ventée, comme en montagne ou sur le littoral.

---

[139] Voir la partie « Ctrl-R » pour construire des séries temporelles montrant ces rythmes.

4.2.3 Thigmomorphogénèse

Par son effet sur la température et les relations plante-eau, le vent modifie indirectement la forme des végétaux ; mais un effet direct de stress *purement mécanique* a aussi été isolé, qui décrit la réponse de la plante au toucher, à des brossages, à des secouements ou à des vibrations. Cette thigmomorphogénèse – *thigmo* faisant référence à toucher en grec - conduit à des plantes plus petites, souvent à tige/tronc plus large, à des rameaux/branches plus courts, à des feuilles et pétioles plus petits, bref à des végétaux plus trapus (Jaffe & Forbes, 1993). On évoque parfois une hypothèse de thigmotropisme négatif dans les formes Krummholz. Ces modifications morphologiques pourraient être une réponse évolutive chez des êtres immobiles, et qui ne peuvent par conséquent pas fuir le stress, en l'occurrence celui causé par le vent. Sur le modèle végétal classique *Arabidopsis thaliana*, il a en outre été montré que les perturbations mécaniques peuvent renforcer la plante contre des stress biotiques, comme les insectes herbivores ou les champignons (Chehab et al., 2012). Sur *Phaseolus vulgaris* (le haricot), une plus grande résistance à la sécheresse et au gel a également été relevée (Jaffe & Forbes, 1993). L'article de Biddington (1986, tableau p. 105 en particulier) énumère encore d'autres effets, comme une réduction du nombre de fleurs, de fruits ou de graines. Dans sa revue de littérature, il note toutefois que les résultats de résistance au stress hydrique, de température ou biotique, ne sont pas toujours consistants d'une étude à l'autre.

Bref, les plantes détectent le toucher et y répondent, et pas seulement *Mimosa pudica* : alors, doucement avec les caresses d'une main verte ? En fait, le phénomène peut être utilisé à notre avantage, avec la technique du conditionnement mécanique.

4.2.4 Conditionnement mécanique

Empiriquement découvert depuis longtemps au Japon, le *FumiGumi* consiste à piétiner des jeunes pousses de blé ou d'orge (Iida, 2014). Latimer et Beverly (1993) développent l'utilisation du conditionnement mécanique pour la production de plants, et soulignent qu'il les aide à supporter le stress de plantation et les débuts dans un environnement plus difficile ; et qu'il permet de retarder de façon

écologique l'implantation, si les conditions météorologiques ne s'y prêtent guère. Il existe diverses techniques, comme le secouement ou le brossage[140]. Bien entendu, le détail technique importe et, pour des tomates[141], elles doivent être brossées 80 fois, deux fois par jour. De même, il vaut mieux commencer dès l'émergence des cotylédons. La réduction de hauteur peut aller de 20 % à 50 %, et les photos de Biddington (*op. cit.*) sont réellement impressionnantes. La couleur, également, semble améliorée. Latimer et Beverly concluent que ce conditionnement ne semble pas donner de différences significatives en termes de production.

Le conditionnement mécanique est aussi employé dans les cultures en serre, particulièrement sous éclairage artificiel, afin de donner des conditions de croissance plus réalistes aux plantes et de leur conférer une forme plus « naturelle ». Le conditionnement mécanique est également utilisé pour produire des plantes florales plus esthétiques, car moins allongées.

Une autre approche pour résister au vent est employée avec les jeunes arbustes : il s'agit de la stabilisation, c'est-à-dire la mise en place de tuteurs, de haubans... Les résultats montrent que l'utilisation à l'implantation de techniques de stabilisation ne doit pas être prolongée : l'endurcissement naturellement provoqué par les perturbations mécaniques (du vent) les garantissant aussi contre les ruptures. Ceci dit, pour cette courte période de stabilisation, les classiques supports aériens - tuteurs ou haubans - gagnent à être remplacés par des techniques d'ancrage des mottes (Appleton et al, 2008, en libre accès).

4.3 Érosion éolienne

L'érosion éolienne est le détachement, le transport et le dépôt de sédiments par le vent (Zobeck & Van Pelt, 2011). L'épisode le plus mémorable en est, sans aucun doute, le *Dust Bowl* des années 30 aux

---

[140] D'où l'acronyme TPTBM, que j'aime bien donner au conditionnement mécanique. (« Tu peux te brosser, Martine. »)

[141] Une espèce pour laquelle la tige a tendance à diminuer de diamètre, contrairement aux autres, mais à être cependant résistante.

États-Unis (où le phénomène est loin d'avoir disparu, et il s'évère catastrophique dans nombre de régions arides). L'érosion éolienne est un processus qui dégrade le sol, en diminuant sa couche arable, sa fertilité et sa capacité de rétention en eau.

Pour que le détachement se produise, le vent doit dépasser un seuil de vitesse (érodante), qui est d'environ 6 m/s, soit 20 km/h, à 0.3 m du sol. Les particules sont alors transportées, selon leur diamètre, par traction, par saltation ou par suspension. La saltation, en particulier, peut entraîner une abrasion ou un déchirement des feuilles, qui causent de sévères dommages aux cultures. Dans certains cas, les particules en suspension font de longs déplacements, comme les nuages de poussière du sirocco, qui atteignent régulièrement la France.

Le profil de vitesse du vent, en fonction de la hauteur z, peut être modélisée par :

$$U(z)=(u^*/0.4)\times\ln(z/z_0)$$

avec z_0 la hauteur de rugosité et u^* la vitesse de frottement. Cette dernière est proportionnelle à la force du vent incident. La hauteur de rugosité, qui décrit la hauteur à laquelle la vitesse du vent devient nulle, dépend du « paysage », et on trouvera des valeurs typiques dans Wieringua (1980). La Figure 52 montre le ralentissement du vent près de la surface. Si la force du vent incident nous est imposée, il est en revanche possible, par un aménagement du paysage, de modifier la hauteur de rugosité.

Tous les sols ne sont pas aussi susceptibles au détachement. La texture joue un rôle : les plus sableuses et les sols plus calcaires y sont les plus sensibles. La structure du sol, en cas d'agrégats ou de croûte, diminue l'érosion éolienne. L'humidité joue également un rôle cohésif.

Le pourcentage de couverture du sol est probablement l'élément fondamental de protection. Fryrear (1985) montre que les pertes de sol[142] en dépendent directement, et qu'un paillage de résidus de culture couvrant 50 % du sol assure une diminution de l'érosion éolienne de 95 %. Cependant, une végétation de résidus en pied comme des

[142] Voir la section « Ctrl-R ».

chaumes, vent debout, ou des cultures de couverture comme une végétation native (une friche par exemple), ou une interculture, se révèlent encore plus efficaces. Les brise-vent (voir plus loin) constituent une autre voie de protection. Enfin, même un labour, s'il est pratiqué perpendiculairement aux vents dominants, a un effet.

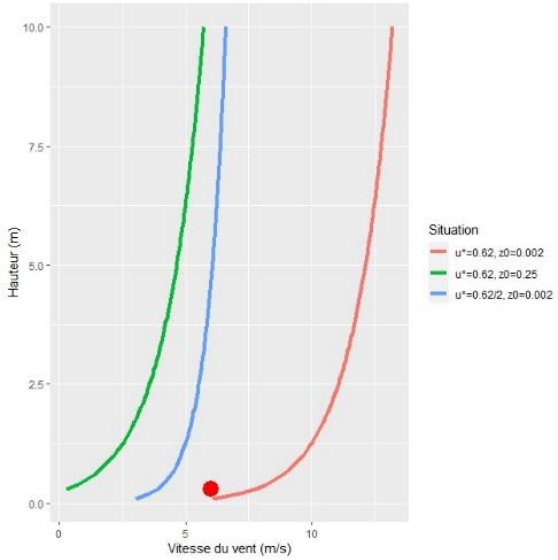


Figure 52 : Profils de vent selon divers paramétrages de u* (vitesse de frottement) et z_0 (hauteur de rugosité). Le point rouge représente le seuil de vitesse (érodante).

4.4 Autres effets du vent

De nombreuses maladies des plantes d'origine virale, bactérienne ou fongique, et des pollutions, sont amenées par le vent. Il peut également faciliter le transport d'insectes ravageurs. Enfin, quand il apporte le calendrier, demandez au pompier ce qui se passe en cas d'incendie de forêt...

Ceci dit, tous les effets du vent ne sont pas négatifs. Un vent faible, de 0,3 m/s, peut même permettre une croissance optimale (Wadsworth, 1959) ! Le vent procure une aération qui est favorable à la croissance des plantes (Kitava et al., 2003, qui s'intéressent à des plantes cultivées... dans l'espace), car il améliore les échanges gazeux entre les feuilles et l'extérieur, donc la photosynthèse et la transpiration. L'aération permet aussi d'éviter des stratifications de la température, du dioxyde de carbone ou de l'humidité. Cette dernière

est, en outre, diminuée sur les feuilles, limitant par conséquent les maladies.

Le vent joue aussi un rôle dans la reproduction de certains végétaux, en dispersant leurs pollens (anémophilie) ou leurs graines (anémochorie). Enfin, le vent peut servir à produire de l'énergie mécanique ou électrique, ce qui peut être utile au jardinier.

4.5 Bilan du vent

Les feuilles peuvent facilement être abîmées, surtout en cas d'abrasion, par des particules du sol. L'abrasion peut aussi se faire par le sel (de mer, qui est de plus toxique) ou bien la glace (surtout en montagne). L'effet, généralement microscopique, de ces blessures semble souvent sous-estimé par les jardiniers, car il est, par définition, peu visible (Grace, 1988). En situation de fort stress, la plante peut perdre des feuilles, des fruits, des branches, avant de casser ou d'être déracinée.

Au final, le vent entraîne bien souvent une perte de production, en quantité, en qualité ou en précocité. Baldwin (1988), résumant plusieurs études, montre ainsi que l'usage de brise-vent augmente la production de légumes de 5 % à 50 %. Ce qui ne va pas nous étonner, c'est que la multiplication des stress, comme un stress hydrique couplé au stress éolien, aggrave les problèmes (Grace, 1988).

4.6 Facteurs de variation du vent

L'air se déplace sous l'effet de quatre forces : gravitationnelle, de pression, de Coriolis et de frottement.

Un premier type de facteurs joue à l'échelle planétaire. À l'équateur, les températures élevées entraînent une expansion de l'air chaud vers le haut, et au sol une pression basse. Du fait de cette faible pression, de l'air latéral provenant des tropiques prend sa place[143]. L'air chaud arrivant à la tropopause (limite entre la troposphère et la stratosphère) cesse de monter, du fait de la cessation du gradient de température, et

[143] Lorsque l'équateur est au plus chaud, sinon le phénomène se déplace vers les tropiques.

se dirige vers les deux tropiques, où il se met à refroidir et à redescendre. Ce mouvement circulaire constitue la cellule de Hadley. Un mouvement exactement inverse se produit aux pôles avec la cellule polaire. Une troisième cellule, dite de Ferrel, s'en déduit entre 30° et 60° de latitude, qui va donc nous concerner directement, avec des vents de surface remontant au nord. Du fait de la force de Coriolis, dans l'hémisphère nord, les vents se dirigeant au nord seront déviés vers l'est. À nos latitudes, les vents dominants vont par conséquent provenir du sud-ouest. Le courant-jet polaire a un effet plus aléatoire, avec des successions d'anticyclones, où le vent tourne dans le sens des aiguilles d'une montre, et de dépressions, où il tourne en sens inverse ; c'est ce courant qui règle notre météorologie.

Un deuxième type de facteurs s'ajoute à une échelle régionale. Ce sont les différences de température entre surface d'eau et surface terrestre, et entre vallée et montagne. On observe alors sur les côtes des brises de littoral – ce que l'on constate sur la rose des vents de Brest en Figure 51 - et dans les régions montagneuses, différents types de brises de montagne.

Le troisième type de facteurs apparaît lorsque nous nous rapprochons de la surface de la Terre. À moins de 100 mètres, pour ce qu'on appelle alors les vents de surface, les frictions avec la surface prennent de l'importance. Au niveau du potager, ce sont alors l'orographie du paysage (collines, vallées) et sa rugosité qui sont déterminantes pour comprendre l'écoulement du vent. La rugosité molle est celle de la végétation et la rugosité dure celle des éléments solides, comme les roches et les bâtiments. Toutes deux contribuent à freiner la vitesse du vent et à en modifier la direction : c'est essentiellement sur ce paramètre qu'il faut jouer pour parvenir à mieux gérer le vent.

4.7 Brise-vent

Un brise-vent est un dispositif, naturel ou artificiel, installé ponctuellement ou durablement, visant à protéger des vents

dominants[144]. On distingue alors un côté exposé au vent et un côté « sous le vent » (Figure 53).

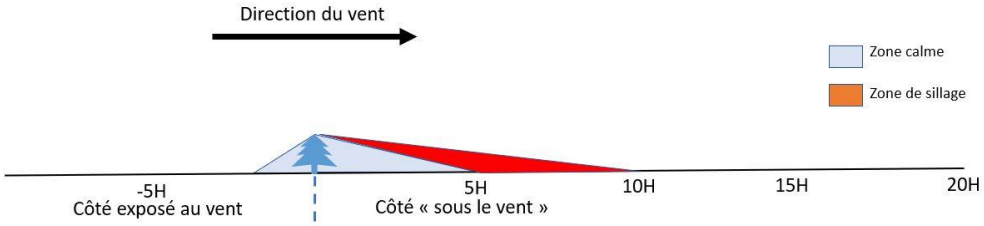


Figure 53 : Brise-vent constitué d'une haie de conifères de hauteur H. On distingue une zone calme bien abritée (de 0 H à 5 H/8 H) et une zone de sillage (de 5 H/8 H à 10 H/20 H) pas complètement à l'abri des perturbations. Une petite zone avant le brise-vent (de -5 H/-3 H à 0 H) est aussi à l'abri.

4.7.1 Facteurs d'efficacité du brise-vent

Brandle et al. (2021) en comptent sept. Le premier est la hauteur. He et al. (2017) proposent une modélisation satisfaisante de l'effet d'un brise-vent, représentée sur la Figure 54. Elle montre la réduction de vitesse obtenue sous un vent perpendiculaire. L'effet de réduction sous le vent s'étale jusqu'à 10 à 20 fois la hauteur (H). Toutefois, on distingue jusqu'à 5-8 H une zone calme (*quiet zone*) où il n'y pas de turbulences et, au-delà, une zone de sillage (*wake zone*) où les turbulences reprennent, même si la vitesse y est encore réduite. De façon plus étonnante, sur 2-5 H du côté exposé au vent, il existe également une atténuation. La hauteur du brise-vent règle, en définitive, l'étendue de la zone protégée.

Le deuxième facteur est la porosité du brise-vent. Elle règle la réduction du vent. Comme la Figure 54 le montre, une faible porosité génère un fort effet de réduction, mais il cesse plus rapidement, faisant

[144] Les couvertures thermiques sont également intéressantes pour leurs multiples effets, dont la protection contre le vent. Voir le chapitre sur l'effet de serre dans les serres.

alors place aux turbulences. Un compromis de 40-60 % permet de combiner étendue de la zone protégée et réduction du vent.

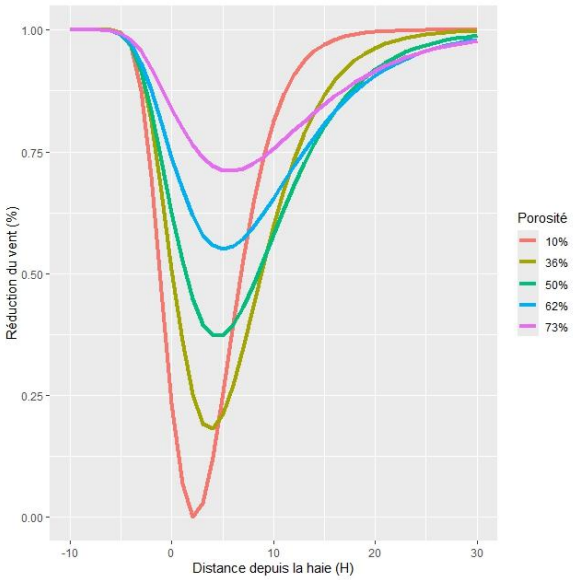


Figure 54 : Réduction de la vitesse du vent (en %) obtenue à une certaine distance du brise-vent, distance définie en multiples de sa hauteur H. La hauteur de mesure est inférieure à 0.5 H. L'effet de la porosité du brise-vent se décline en plusieurs courbes.

L'orientation du brise-vent est essentielle : l'efficacité maximale est obtenue quand la barrière est perpendiculaire au vent. On choisira donc de l'orienter par rapport aux vents dominants. La longueur du brise-vent doit être supérieure à 10 H, la vitesse du vent augmentant sur les deux côtés, il faut par conséquent « dépasser » le potager sur ses bords. La largeur du brise-vent a pour effet de diminuer la porosité, mais l'ajout de lignes est peu efficace tant qu'on ne dépasse pas une largeur de 5 H. La continuité du brise-vent ferme les « portes » par lesquelles le vent, en s'engouffrant, va en fait accélérer. La forme du brise-vent a un rôle mineur (Wang & Takle, 1997a).

Il est possible de multiplier les brise-vent espacés de 20-30 H pour prolonger leur effet, ou de créer une ceinture en cas de vents variables dans la région. On n'est pas obligé de mettre un brise-vent en bord de culture puisque nous avons constaté une efficacité sur une distance de 2-5 H avant... Afin d'obtenir des informations précises sur le *design*

d'un brise-vent, l'article de Finch (1988) est incontournable. Et en libre accès.

4.7.2 Effet du brise-vent sur le microclimat

Il y a un effet sur les radiations, qui dépend de la hauteur H et de l'orientation du brise-vent, mais aussi de la date et de l'heure ; et comme nous l'avons vu dans le chapitre consacré à la lumière, il peut être sévère ! La température de l'air est plus élevée de 1 à 3 °C, il y a donc plus d'unités de chaleur (GDD), ce qui va ordinairement avoir un effet bénéfique sur la croissance des végétaux. Les précipitations ne sont pas modifiées, sauf à proximité du brise-vent ; en revanche, l'humidité est en général plus grande, car l'air est moins mixé. Le CO_2 est altéré (moins le jour et plus la nuit), mais dans des proportions telles que cela n'a pas d'impact.

Lorsque l'on entre dans la zone de sillage, les turbulences créent des situations moins favorables.

4.7.3 Effet du brise-vent sur les plantes

La hausse de température permet une meilleure croissance et une précocité de floraison, de fructification et de maturité... sauf si les conditions sont déjà chaudes, et, dans ce cas, un stress de chaleur peut apparaître. L'évaporation étant plus limitée, les conditions de germination sont, par conséquent, bien supérieures. Nous avons au-dessus évoqué les conséquences complexes sur les relations plante-eau, et le bilan mitigé sur le stress hydrique. Le brise-vent ne dispense pas d'une attention constante à la réserve d'eau dans le sol.

Le moindre stress mécanique aide aussi directement à la croissance et limite les dommages (abrasion ou déchirure des feuilles, verse ou déracinement), permettant un gain sur la production peut-être aussi important que l'effet microclimat, mais aussi une qualité supérieure.

Un des soucis en cas de brise-vent vivant est que l'on crée à proximité une zone de compétition avec la culture ; cependant, au final, nous verrons que les gains de production sont positifs, mais avec une forte variabilité (Grace, 1988) ; de mauvaises surprises restent donc possibles. Les gains sont maximisés dans la zone de 3 H à 10 H.

4.7.4 Retombées économiques des brise-vent

Les gains de production sont substantiels, mais le brise-vent occupe de la place, et il a un coût d'installation et de maintenance. Un premier type de calcul économique estime que la surface occupée par le brise-vent ne doit pas dépasser 5 % de la surface cultivable.

Mais on peut envisager le problème de façon plus large (L). Un avantage incontesté du brise-vent est sa faculté de réduire l'érosion. Or, à long terme, elle entraîne une dégradation des sols, en particulier une perte de fertilité qu'il va falloir combler. Le brise-vent, s'il est naturel, peut aussi fournir une production de bois et de fruits, et nous nous plaçons alors dans un cadre de conception agroforestière (évoqué dans le chapitre sur les interactions végétales).

4.7.5 Retombées écosystémiques

En envisageant enfin le problème de façon encore plus large (XL), le brise-vent peut rendre des services écosystémiques[145]. Nous avons déjà évoqué la conservation du sol, mais des haies constituent des habitats, habitats profitant aux bioagresseurs, à leurs ennemis naturels et aux auxiliaires. Des impacts négatifs et positifs ont été observés sur les cultures, mais l'effet s'avère, en tout cas, positif pour la biodiversité. Une séquestration de carbone est de surcroît assurée par une haie d'arbres.

Une ceinture de brise-vent, autour de la maison (et du potager), permet de travailler plus en sécurité et avec un environnement plus agréable. De plus, des économies substantielles d'énergie ont été relevées. Enfin, en termes de services culturels, les brise-vent permettent de structurer le paysage et de le rendre plus inscrit dans le patrimoine local, comme peuvent l'être les bocages en Normandie ou les murets en pierres dorées dans le Beaujolais.

Dans un contexte de changement climatique, les brise-vent semblent donc constituer une pratique raisonnable (Mume & Workalemahu, 2021).

---

[145] Pour en savoir plus sur les services écosystémiques et le potager, il y a un chapitre consacré à ce sujet.

4.8 Global stilling ?

Est-ce que la vitesse du vent pourrait être modifiée sur le long terme ? Pour ce qui est du récent passé, il semble y avoir eu, depuis les années 1960, une baisse générale de la vitesse moyenne des vents, phénomène qui a été appelé *global stilling*. (Greene et al., 2010). Un sujet qui préoccupe d'abord le marché de la production d'électricité éolienne, d'autant que la puissance électrique délivrée est proportionnelle au cube de la vitesse du vent. Plusieurs explications ont été données, comme une augmentation de la rugosité du paysage et un affaiblissement de facteurs responsables de la circulation atmosphérique globale. Cependant, le phénomène s'est possiblement inversé dans les années 2010, pour revenir au niveau précédent (Yang et al., 2021), mais avec des disparités régionales. Un retournement qui n'est toutefois pas certain, vu des sous-estimations des moments calmes, dues à des modifications de codage des bases de données (Dunn et al. 2022). Euh...

Un autre problème est celui des phénomènes extrêmes, comme les tempêtes, qui font souffler un vent de panique chez les compagnies d'assurance. L'étude de Dawkins et al. (2016) s'intéresse à la période 1974-2014, et à l'étendue des surfaces en Europe où des vents supérieurs à 20 m/s ont été observés[146], étendue appelée empreinte de la tempête ; cet indicateur est bien relié aux dommages constatés[147]. Les auteurs, sur les vingt dernières années, trouvent que cette empreinte – et donc les dommages – ont baissé, et ce, particulièrement en Europe du Nord. Cela s'explique en partie par des différences plus faibles observées sur cette même période entre les pressions basses de l'Islande et hautes des Açores, un élément fondamental de la météorologie de l'Europe de l'Ouest.

On ne va pas être très surpris de voir l'incertitude grandir encore en ce qui concerne le futur... Le vent, c'était mieux avant ! Selon les projections, on observe des augmentations ou des diminutions de

---

[146] Une vitesse à partir de laquelle les compagnies allemandes commencent à dédommager.

[147] D'ailleurs, on retrouve une fonction cubique de la vitesse comme étant proportionnelle aux dommages.

vitesse du vent (Greene et al, 2010). Une étude portant sur la France (Najac et a. 2009) prédit une baisse générale des vitesses de vent en été, mais une opposition en hiver entre le sud, où les vents diminueraient, et le nord, où ils augmenteraient.

En fait, ces modélisations sont très complexes, et les données sont échantillonnées à des échelles, tant spatiales que temporelles, trop grandes, particulièrement en ce qui concerne les vents extrêmes ; les essais les plus récents sont toutefois plus précis. À l'aide des meilleures résolutions et modélisations actuelles, Outten et Sobolowski (2021) concluent que : (1) les phénomènes de vent extrême sont très localisés, ce qui rendait les précédentes modélisations globales peu adaptées, les côtes de l'Atlantique semblent être les plus menacées ainsi, à l'intérieur des terres, que des configurations locales dues à l'orographie, comme des couloirs de vent ; (2) dans ce qu'ils appellent, un *essai* de prédiction pour l'ensemble de l'Europe, une augmentation générale des vents extrêmes[148], d'autant plus importante que nous avançons dans le vingt et unième siècle, est projetée.

Bref, si les conséquences des gaz à effet de serre sur le réchauffement et les précipitations sont bien établies et méritent d'être prises en compte pour adapter notre vie quotidienne, y compris notre vie au potager ; c'est moins le cas en ce qui concerne le vent[149], qui se caractérise encore comme *cela qui ne peut être dépeint*.

4.9 Références

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirement*s - FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, Rome, 300(9), D05109.

[148] En termes de taux de retour, c'est-à-dire la vitesse à laquelle un événement extrême se produit de nouveau.

[149] Toutefois, les jardiniers exerçant dans des zones à risque ont tout intérêt à suivre de près les futurs progrès de collecte de données et de modélisation dans le domaine.

Appleton, B. L., Cannella, C. M., Wiseman, P. E., & Alvey, A. A. (2008). Tree stabilization: current products and practices. *Arboriculture & Urban Forestry (AUF)*, *34*(1), 54-58.

Baldwin, C. S. (1988). 10. The influence of field windbreaks on vegetable and specialty crops. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *22*, 191-203.

Biddington, N. L. (1986). The effects of mechanically-induced stress in plants—a review. *Plant Growth Regulation*, *4*, 103-123.

Brandle, J. R., Takle, E., & Zhou, X. (2021). Windbreak practices. *North American Agroforestry*, 89-126.

Chehab, E. W., Yao, C., Henderson, Z., Kim, S., & Braam, J. (2012). Arabidopsis touch-induced morphogenesis is jasmonate mediated and protects against pests. *Current Biology*, *22*(8), 701-706.

Cleugh, H. A. (1998). Effects of windbreaks on airflow, microclimates and crop yields. *Agroforestry Systems*, *41*, 55-84.

Dawkins, L. C., Stephenson, D. B., Lockwood, J. F., & Maisey, P. E. (2016). The 21st century decline in damaging European windstorms. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *16*(8), 1999-2007.

Dunn, R. J., Azorin-Molina, C., Menne, M. J., Zeng, Z., Casey, N. W., & Shen, C. (2022). Reduction in reversal of global stilling arising from correction to encoding of calm periods. *Environmental Research Communications*, *4*(6), 061003.

Finch, S. J. (1988). Field windbreaks: Design criteria. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *22*, 215-228.

Fryrear, D. W. (1985). Soil cover and wind erosion. *Transactions of the ASAE*, *28*(3), 781-784.

Gardiner, B., Berry, P., & Moulia, B. (2016). Wind impacts on plant growth, mechanics and damage. *Plant Science*, *245*, 94-118.

Grace, J. (1988). Plant response to wind. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *22*, 71-88.

Greene, S., Morrissey, M., & Johnson, S. E. (2010). Wind climatology, climate change, and wind energy. *Geography Compass*, *4*(11), 1592-1605.

He, Y., Jones, P. J., & Rayment, M. (2017). A simple parameterisation of windbreak effects on wind speed reduction and resulting

thermal benefits to sheep. *Agricultural and Forest Meteorology*, *239*, 96-107.

Holttinen, H. (2005). Hourly wind power variations in the Nordic countries. *Wind Energy: An International Journal for Progress and Applications in Wind Power Conversion Technology, 8*(2), 173-195.

Iida, H. (2014). Mugifumi, a beneficial farm work of adding mechanical stress by treading to wheat and barley seedlings. *Frontiers in Plant Science*, *5*, 453.

Jaffe, M. J., & Forbes, S. (1993). Thigmomorphogenesis: the effect of mechanical perturbation on plants. *Plant Growth Regulation*, *12*, 313-324.

Kitaya, Y., Tsuruyama, J., Shibuya, T., Yoshida, M., & Kiyota, M. (2003). Effects of air current speed on gas exchange in plant leaves and plant canopies. *Advances in Space Research*, *31*(1), 177-182.

Latimer, J. G., & Beverly, R. B. (1993). Mechanical conditioning of greenhouse-grown transplants. *HortTechnology*, *3*(4), 412-414.

Mume, I. D., & Workalemahu, S. (2021). Review on windbreaks agroforestry as a climate smart agriculture practices. *American Journal of Agriculture and Forestry*, *9*(6), 342-347.

Najac, J., Boé, J., & Terray, L. (2009). A multi-model ensemble approach for assessment of climate change impact on surface winds in France. *Climate Dynamics*, *32*(5), 615-634.

Outten, S., & Sobolowski, S. (2021). Extreme wind projections over Europe from the Euro-CORDEX regional climate models. *Weather and Climate Extremes, 33*, 100363.

Wadsworth, R. M. (1959). An optimum wind speed for plant growth. *Annals of Botany*, *23*(1), 195-199.

Wang, H., & Takle, E. S. (1997a). Model-simulated influences of shelterbelt shape on wind-sheltering efficiency. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, *36*(6), 695-704.

Wang, H., & Takle, E.S. (1997b). Momentum budget and shelter mechanism of boundary-layer flow near a shelterbelt. Bound. *Layer Meteorolology. 82*, 417–435.

Yang, Q., Li, M., Zu, Z., & Ma, Z. (2021). Has the stilling of the surface wind speed ended in China?. *Science China Earth Sciences*, *64*(7), 1036-1049.

Zobeck, T. M., & Van Pelt, R. S. (2011). Wind erosion. In J.L. Hatfield & T.J. Sauer (Eds.), *Soil management: Building a Stable Base for Agriculture* (p. 209-227). Wiley.

4.10 Ctrl-R

```
#########################
########## ROSE DES VENTS
#########################
# Code repris de
# https://github.com/madpk/Windrose-in-R-for-any-location

require(openair)
require(nasapower)

# Données de vent depuis nasapower
# Changer latidue, longitude et dates selon convenance
windrose_data <- get_power(
 community = "ag",
 lonlat = c(4.66667,45.816669),
 pars = c("WS10M", "WD10M"),
 dates = c("2010-01-01", "2022-12-31"),
 temporal_api = "daily")

Wind_rose_final<-windrose_data[,8:9]
colnames(Wind_rose_final)<-c("ws","wd")

# Réaliser le graphique Rose des vents
windRose(Wind_rose_final,paddle      =      FALSE,breaks      =
c(1,5,10,15,20),
 col=c("#4f4f4f", "#0a7cb9", "#f9be00", "#ff7f2f"),
main="Lentilly 2010-2022",max.freq=20)


#################################################
########## RYTHMES SAISONNIER ET DIURNAL DU VENT
#################################################

require(nasapower)
hourly_data <- get_power(
 community = "ag",
 lonlat = c(4.66667,45.816669),
 pars = c("WS2M", "WD2M"),
 dates = c("2010-01-01", "2022-12-31"),
 temporal_api = "hourly")
```

```
hourly_data<-as.data.frame(hourly_data)

scatter.smooth(1:12,tapply(hourly_data[,7],hourly_data[,4],me
an),axes=FALSE, span = 1/3,xlab="",ylab="Vitesse du vent (m/s
à 2 mètres)", lpars=list(lwd=3), pch=1,cex=1.5)
box()
axis(side=2)
axis(side=1,at=1:12,label=c("Jan","Fév","Mar","Avr","Mai","Ju
i","Jul","Aoû","Sep","Oct","Nov","Déc"))

scatter.smooth(0 :23,tapply(hourly_data[,7],hourly_data[,6],m
ean),axes=FALSE,    span    =    1/4,xlab="Heure    de    la
journée",ylab="Vitesse   du   vent   (m/s   à   2   mètres)",
lpars=list(lwd=3), pch=1,cex=1.5)
box()
axis(side=2)
axis(side=1,at=c(0,6,12,18,24),label=c("00 :00","06:00","12:0
0","18:00","24:00"))


##########################
########## PROFILS DE VENT
##########################

wind.profile<-function(z,z0,ustar){
 (ustar/0.4)*log(z/z0)}

# Données de Zobeck & van Pelt (2014) p. 214
ustar1<-0.62
z01<-0.002

# vitesse de friction divisée par 2
ustar2<-0.31
z02<-0.002

# hauteur de rugosité d une culture haute selon Wieringa (1980)
ustar3<-0.62
z03<-0.25

z<-seq(0,10,by=0.1)
z1<-z[z>z01]
z2<-z[z>z02]
z3<-z[z>z03]

plot(wind.profile(z1,z01,ustar1),z1,type="l",xlim=c(0,15),
xlab="Vitesse du vent (m/s)",ylab="Hauteur (m)")
lines(wind.profile(z2,z02,ustar2),z2,lty=2)
lines(wind.profile(z3,z03,ustar3),z3,lty=3)
legend(x="topleft",lty=1:3,legend=c("u*=0.62,
z0=0.002","u*=0.62/2, z0=0.002","u*=0.62, z0=0.25"),cex=0.75)
points(6,0.3,pch=16,col=2,cex=2)
```

```
##################################################
########## REDUCTION D EROSION ET PAILLAGE DU SOL
##################################################
# Fryrear (1985, équation 5).

pc<-10:100
plot(pc,181*exp(-0.072*pc),xlab="% de couverture du
sol",ylab="% de réduction de l'érosion
éolienne",lwd=2,type="l",xlim=c(0,100))


#################################
########## EFFET D UN BRISE-VENT
#################################
# Modèle de He et al. (2017)

wind.reduction<-function(xh,a,b,c){
1-a*exp(-b*(log(xh+10)-c)^2)
}

# Paramètres estimés à partir des données de Wang &
Takle(1997b)
a<-c(1.00,0.82,0.63,0.45,0.29)
b<-c(6.81,5.07,3.84,3.27,2.92)
c<-c(2.50,2.62,2.67,2.71,2.75)
Porosité<-c(10,36,50,62,73)
xh<-seq(-10,30,by=1)

# Graphique
plot(xh,
wind.reduction(xh=xh,a=a[1],b=b[1],c=c[1]),col=1,type="l",
ylab="Réduction du vent (%)",xlab="Distance depuis la haie
(H)")
lines(xh, wind.reduction(xh=xh,a=a[2],b=b[2],c=c[2]),lty=2)
lines(xh, wind.reduction(xh=xh,a=a[3],b=b[3],c=c[3]),lty=3)
lines(xh, wind.reduction(xh=xh,a=a[4],b=b[4],c=c[4]),lty=4)
lines(xh, wind.reduction(xh=xh,a=a[5],b=b[5],c=c[5]),lty=5)
legend("bottomright", legend = Porosité,lty=1:5,
title="Porosité (%)")
```

5 Santé physique du sol

5.1 Qu'est-ce que le sol ?

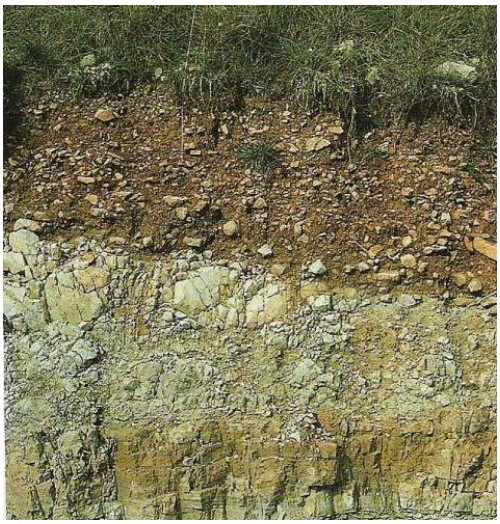


Figure 55 : C'est ça !

Le sol n'est-il composé que de roches ? Non, pas seulement : le sol optimal contient 50 % de matière solide, 25 % d'air et 25 % d'eau (Mariani & Ferrante, 2017). Le sol est donc inerte ? Non, la matière solide comprend, il est vrai, surtout des minéraux, mais aussi de la matière organique (SOM, *soil organic matter*) : matière organique morte et matière organique encore vivante, mais jamais très longtemps. Le vivant du sol, ce sont les vers de terre ? Non, bien qu'ils soient importants pour son fonctionnement, le sol présente une biodiversité prodigieuse, plus importante que celle que nous « connaissons » à la surface ; et elle s'avère surtout constituée d'êtres microscopiques[150]. Ce sont en grande partie ces microbes qui font un sol, et un sol en bonne santé ! Nous allons comprendre comment ce vivant procède et essayer de nous en servir. La santé du sol, c'est par conséquent la santé de ses habitants ? Non, pas seulement : cela, c'est la santé biologique du sol,

[150] Bactéries et champignons forment 84 % de la matière vivante hors racines du sol en masse (Gobat et al., 2010).

cependant, on s'intéresse également à sa santé chimique, qui rend disponible les nutriments pour nos légumes. Toutefois, dans ce premier chapitre consacré au sol, nous nous focaliserons sur sa santé physique, qui lui permet d'accueillir correctement l'eau, l'air et les racines (et les autres êtres vivants du sol). On a vraiment besoin du sol pour produire des légumes ? Non, l'hydroponie démontre le contraire, mais, outre les services d'approvisionnement (*e.g.* en légumes), les sols rendent des services de régulation (thermique, cycle de l'eau, cycle du carbone, cycle de l'azote, biodiversité...) et également des services socio-culturels comme l'indique la notion de *terroir* (Douguet & O'Connor, 2003). Le sol n'est donc pas partout le même ? Et non, un petit tour près d'une rivière en zone inondable, dans une forêt ou dans les terres rouges des Pyrénées donne à voir, sentir et toucher bien des différences. Au sein même de notre jardin, le sol peut changer fortement de nature ; et c'est ce que nous allons accentuer, en prenant particulièrement soin de celui de notre potager. Il existe un sol idéal ? Non, la culture de l'asperge ne demande pas le même type de sol que celle de la mâche. Le sol est-il éternel ? Non, pour construire un sol d'un à deux mètres en zone tempérée, il suffit de moins de... 10 000 ans (Gobat et al., 2010). Il est d'ailleurs intéressant de connaître l'historique de son jardin, car il est possible d'avoir récupéré un sol en mauvaise état, épuisé par des pratiques culturales mal adaptées, ou bien pire, un passé industriel. Tout est alors perdu ? Non, un sol cela se « reconstruit » : je ne pense pas ici à des techniques express, comme les *lasagnes*, mais à une amélioration progressive, qui peut le rendre parfaitement apte à la pousse des légumes et plus vivant. Progressive ? Et oui, rendez-vous dans dix ans place des grands SOM... mais voyons à présent comment nous y prendre.

5.2 Déconstruction du sol

Un sol est constitué de trois phases : gazeuse, liquide et solide. Même si nous reparlerons de la composition de l'air et de l'eau, c'est la matière solide qui demande certainement le plus d'explications, afin de bien saisir son rôle dans l'état physique de notre sol. Cette matière solide est faite, pour une grande part (90-99 % en masse, Calvet et al., 2015), de matière minérale, mais aussi d'une part plus petite (1-10 %), et

cependant fondamentale dans le fonctionnement du sol, de matière organique.

5.2.1 Matière minérale

Texture

La terre fine est d'abord séparée des éléments grossiers comme les graviers et les cailloux (>2000 µm) ; puis les éléments organiques sont éliminés, ainsi que l'eau. On cherche alors à étudier la taille de ces particules de terre fine : on peut, avec des techniques modernes, en obtenir une distribution continue, mais, le plus souvent, elles sont réparties en classes.

On distingue généralement trois[151] fractions granulométriques portant le nom d'argiles, limons et sables. Après séparation, on définit la proportion qu'elles représentent en termes de masse sèche (en kg par kg de terre fine sèche). Il est alors possible de situer ces proportions dans un triangle rectangle ou équilatéral, appelé triangle des textures (de sol). Divers tests qualitatifs permettent de distinguer des classes texturales qui sont usuellement ajoutées à ce graphique.

De nombreuses propositions de tels triangles existent, dont on peut trouver un panorama dans Richer de Forges et al. (2008) ; cela donne une idée des diversités des fractions granulométriques choisies (Tableau 6). Il existe une norme internationale, où la limite des limons et sables, qui est celle qui varie le plus, est fixée à 20 µm, mais beaucoup de pays, la France en particulier, utilisent 50 µm.

Tableau 6 : Fractions granulométriques pour constituer une texture : norme internationale (peu suivie), variabilité observée d'un pays à l'autre, et norme classique utilisée en France.

Fraction	Norme ISSS	Variations observées	France
Argile	T<2µm	T<1-5µm	T<2µm
Limon	2µm<T<20µm	1-5µm<T<20-63µm	2µm<T<50µm
Sable	20µm<T<2000µm	20-63µm<T<1000-3000µm	50µm<T<2000µm

[151] Parfois cinq (argiles, limons fins et grossiers, et sables fins et grossiers).

J'ai choisi le triangle du GEPPA[152] simplifié à 6 classes (Figure 56). Les classes texturales étaient initialement au nombre de 17, définies par des tests tactiles menés par des experts. La lecture est, à mon sens, plus facile sur un triangle rectangle...

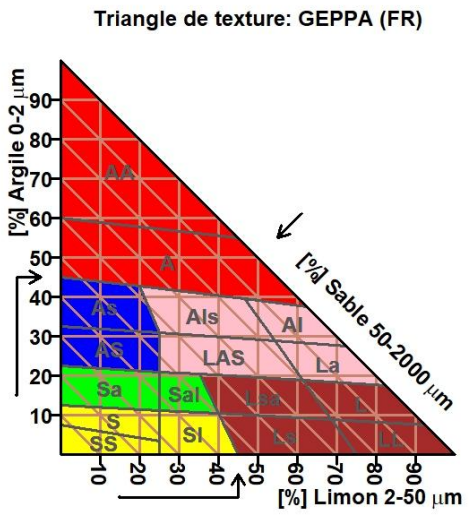


Figure 56 : Triangle des textures du GEPPA avec, en couleurs, la version en six classes (argileux=rouge, argilo-sableux=bleu, argilo-limoneux=rose, sablo-limoneux=vert, sableux=jaune, limoneux=marron).

Si je m'en réfère à mon analyse de sol, j'ai donc 22 % d'argiles, 34 % de limons, 44 % de sables, je suis donc à la limite des zones verte, rose et marron, disons sablo-limoneux-argileux. Je vous encourage vivement à réaliser une analyse de sol, qui vous apportera bien d'autres renseignements[153] ; mais vous pouvez, en attendant, vous reporter à la carte (Figure 57) qui vous aidera à définir votre situation.

---

[152] Groupe d'Études des Problèmes de Pédologie Appliquée.

[153] Batey (2009) souligne que les sols sont souvent testés pour vérifier que des nutriments sont disponibles, mais que l'état physique mérite aussi un suivi.

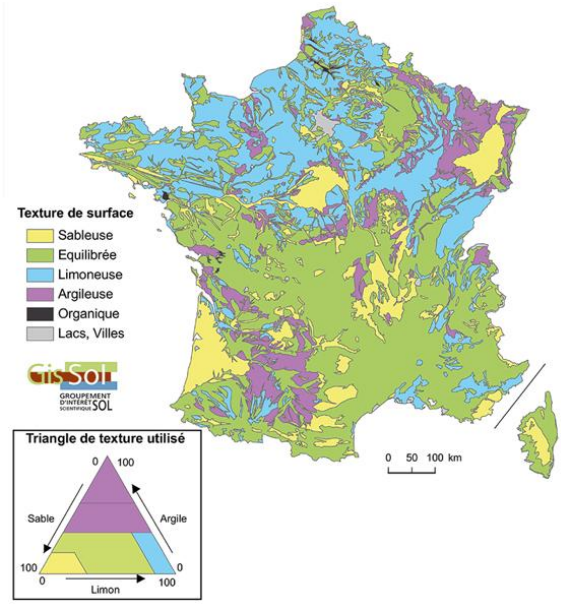


Figure 57 : Carte de France des textures de sol. Tirée de INRA (GIS SOL : https://www.gissol.fr)

Minéralogie

La taille des particules est une information fort utile, mais elle ne dit rien de leur nature et de leurs éventuelles propriétés : c'est le rôle de la minéralogie. En ce qui concerne l'état physique des sols, deux types de roches méritent une attention particulière, les argiles minéralogiques et le calcaire.

Les argiles proviennent de roches à base de silicates, et sont des particules fines (d'où, aussi, le nom d'argiles en termes granulométriques). Suivant leur constitution en feuillets superposés, trois types sont distingués : ces types sont plus ou moins chargés négativement et plus ou moins hydrophiles. Ainsi, le type 2:1 qui comprend la smectite et la vermiculite a des capacités de gonflement étonnantes à l'hydratation.

Des particules de petite taille et de charge négative sont des colloïdes, qui ont la propriété de pouvoir rester en suspension dans la solution du sol, car leurs charges négatives les tiennent éloignées les unes des autres. Les argiles minéralogiques forment la part la plus importante de ces colloïdes. Lorsque de nombreux cations (atomes positifs) ou ions positifs sont présents dans la solution, se produisent des liaisons avec les colloïdes, qui deviennent plus neutres, se

rapprochent et s'associent en formant des flocs. Ces flocs alourdis ne restent pas en suspension, mais « tombent », produisant la sédimentation. Le phénomène inverse de la floculation s'appelle la dispersion.

Les calcaires, quant à eux, sont des roches sédimentaires plutôt blanches, formées essentiellement de carbonate de calcium ($CaCO_3$) et de carbonate de magnésium ($MgCO_3$). Ces deux composés sont facilement solubles et génèrent des cations calcium et magnésium à deux charges positives, qui vont permettre des liaisons particulièrement efficaces lors de la floculation.

À partir du calcaire, il est possible, par calcination, d'obtenir de la chaux vive (CaO) très concentrée. Cette dernière peut être éteinte par hydratation, ce qui donne $Ca(OH)_2$. En contact avec le dioxyde de carbone, il y a carbonatation de cette chaux éteinte, et génération de carbonate de calcium qui peut, lui, être dissous en solution.

5.2.2 Matière organique (morte)

Il s'agit de la matière des êtres vivants. Elle est constituée de glucides (surtout hémicellulose, cellulose, lignine pour les végétaux), de protéines ou de lipides. Ce sont des chaînes carbonées et, d'ailleurs, ce qui est véritablement mesuré, c'est le contenu du sol en carbone organique (SOC, *soil organic carbon*). Cela représente une petite moitié de la matière organique (SOM, *soil organic matter*) et il était conventionnel d'employer la conversion : $SOM=1.724\times SOC$; toutefois, il semble à présent qu'il vaut mieux utiliser un facteur de conversion de 2 (Pribyl, 2010). Dans le doute, il convient peut-être de raisonner directement à partir du carbone...

La quantité de carbone dans le sol est considérable : deux fois plus élevée que celle présente dans l'atmosphère sous forme de dioxyde de carbone. Nous allons d'abord nous concentrer sur la partie morte, qui prédomine : c'est-à-dire les parties mortes de végétaux (feuilles...), les excrétions, mais aussi les cadavres ; il sera plus loin question de la partie vivante.

La matière organique fraîche, que j'aime appeler *zombie*, car elle est presque vivante, va subir une évolution dans le sol (Figure 58). Elle va d'abord être réduite en plus petits morceaux, puis a lieu une

décomposition qui résulte en la matière organique transitoire (disons morte cette fois). L'opération est faite par les organismes du sol qui, au passage, en prélèvent une partie (immobilisation) pour leurs besoins vitaux. La partie transitoire va être, selon sa nature, transformée par deux processus différents. D'une part, un processus lent, dit d'humification, plutôt géré par les champignons, et portant essentiellement sur certains glucides (la lignine en particulier) et lipides, et qui va donner une matière organique stable très morte : l'humus. D'autre part, un processus plus rapide de minéralisation primaire, mené en premier lieu par les bactéries, et concernant les protéines, la cellulose et l'hémicellulose. Les molécules en résultant, comme les nitrates par exemple, seront alors potentiellement disponibles pour les plantes. Une autre voie d'approvisionnement pour elles, est la minéralisation secondaire, qui provient du relâchement très progressif d'éléments nutritifs depuis l'humus.

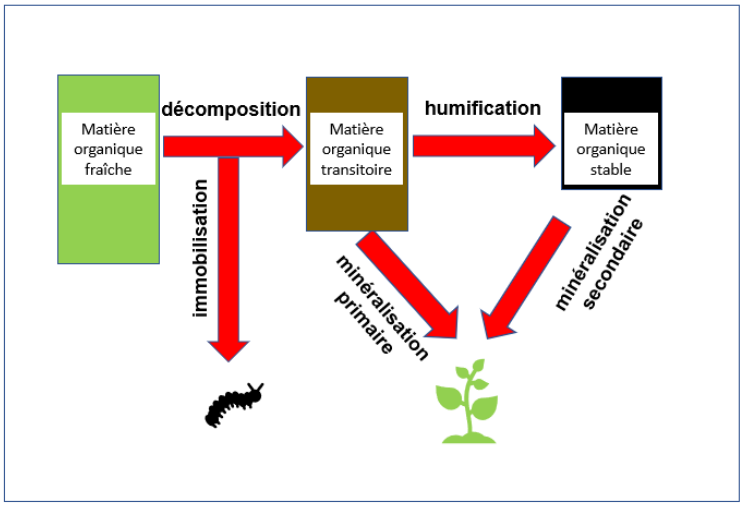


Figure 58 : Évolution de la matière organique dans le sol.

Si la minéralisation induit la santé chimique du sol, c'est l'humification qui nous intéresse pour sa santé physique. Pour la quantifier, et comprendre l'évolution du stock d'humus, plusieurs modèles sophistiqués ont été échafaudés ; mais ce sont des ordres de grandeur qui nous intéressent au potager, et le classique modèle de Hénin-Dupuis (1945) y suffira. En raisonnant sur une année, à partir de la matière organique fraîche (MOZ en *masse sèche*), seule une partie

va être humifiée, ce qui est quantifié par le coefficient isohumique k_1. En revanche, une partie de la masse d'humus (MOS) va sortir par minéralisation secondaire, ce qui est évalué par le coefficient de minéralisation secondaire k_2. Au final, nous pouvons réaliser un bilan humique :

$$\Delta MOS = k_1 \times MOZ - k_2 \times MOS.$$

Si nous apportons, chaque année, la même quantité de matière organique fraîche, que va devenir notre stock d'humus initial MOS(0) au bout de t années ? Par intégration, on arrive à l'équation suivante :

$$MOS(t) = MOS(0) \times e^{-k_2 t} + k_1 \times MOZ \times (1 - e^{-k_2 t})/k_2.$$

Imaginons que nous apportions du foin chaque année, de 0 à 3 kilos par mètre carré pour nourrir le sol[154]. On convertit sa masse fraîche en masse sèche par un coefficient de h=0.85, et pour cet apport nous avons k_1=0.15. Si on suppose une valeur de k_2=0.02 (moyenne), la Figure 59 montre ce que nous pouvons observer si nous devenons doyen des français.

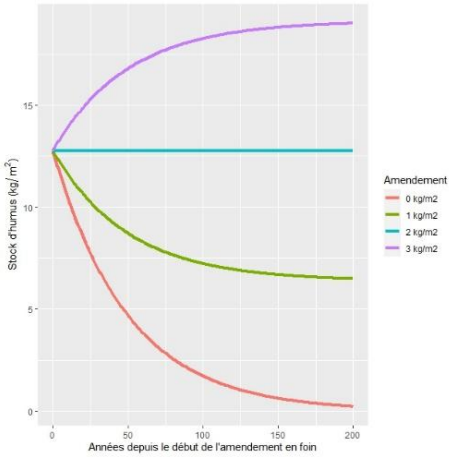


Figure 59 : Évolution du stock d'humus selon différents amendements annuels en foin

[154] Nous verrons comment cela se passe avec d'autres apports plus loin. Nous partons ici sur une base d'un sol avec une masse volumique sèche (voir plus loin la définition) de ρ_D =1.42, un pourcentage de MO à 3 % et nous nous limitons aux 30 cm supérieurs du sol. Le stock initial d'humus est alors MOS(0)=1.42×1000×0.03×0.30=12.78 kg.

C'est la loi de la restitution au sol, on peut ou non appauvrir notre capital selon ce que nous lui laissons.

5.3 (re-)Construction du sol

Le sol n'est pas un tas de minéraux et de matières organiques empilés. Il se constitue à partir de plusieurs niveaux d'arrangements qui laissent entre eux des vides appelés pores.

5.3.1 Complexe argilo-humique

Il y a dans la solution du sol des colloïdes en suspension. Nous avons déjà parlé des plus nombreux : les argiles minéralogiques, mais il y a également de fines particules de matières organiques, et même des microbes, chargés négativement. Dès qu'il y a suffisamment d'ions positifs dans la solution du sol, il peut donc y avoir floculation. La présence de cations Ca^{2+}, en particulier[155], permet d'établir des ponts calciques entre les colloïdes argileux et organiques, et de générer ce qui est appelé le complexe argilo-humique (CAH, les matières organiques en question étant humiques). Ce complexe a la capacité de retenir fortement les argiles (qui ne se dispersent pas), les matières organiques (qui ne se dispersent pas non plus) et des ions positifs qui ne seront pas emmenés par la solution. Il est même possible, avec un pont calcique, de piéger des molécules chargées négativement, et en particulier, les phosphates. La solidité du complexe argilo-humique est renforcée par diverses colles biologiques[156], généralement des polysaccharides.

5.3.2 Agrégats

Le complexe argilo-humique, fortifié par des polysaccharides, parvient à piéger des limons, voire même des sables fins et des particules organiques, plus grosses : le tout forme un microagrégat. Ce

---

[155] En « manque » de calcium Ca^{2+}, ce sont alors des liaisons avec le fer Fe^{2+} qui ont lieu, mais elles sont moins solides.

[156] Produites par la flore et la faune du sol.

sont des arrangements de petite taille (entre 2 µm et 250 µm de diamètre). Ils sont plus ou moins poreux selon la nature des argiles associées, mais leurs pores sont de très petite taille (micropores), et contiennent une eau essentiellement liée.

À un niveau supérieur, les microagrégats sont tenus ensemble par les hyphes des champignons, les radicelles des plantes, et encore des colles biologiques. On parle alors de macroagrégats (entre 250 µm et 2000 µm), présentant des pores de plus grande taille (mésopores) dans lesquels peut circuler une eau capillaire.

Entre les macroagrégats, les macropores permettent la circulation aisée de l'air, de l'eau par gravité, et la pénétration des racines.

Il existe des études de la distribution statistique des tailles d'agrégats d'un sol, qui permettent le calcul du diamètre moyen pondéré des agrégats (MWD en mm), qui est considéré comme un bon indicateur de la structure du sol. L'étude de Chenu et al. (2000) montre que ce diamètre moyen est relié positivement à la présence de matière organique (carbone organique : SOC en g/100g) :

$$\text{MWD}=0.514\times\text{SOC} + 0.0697 \qquad (R^2=66\ \%).$$

Un autre caractère important des agrégats est leur stabilité : sont-ils en particulier capables de résister à l'effet de l'eau et de l'air[157] ?

5.3.3 Matière organique vivante

Le sol contient en définitive peu de matière organique vivante (15 % contre 85 % pour la matière organique morte d'après Calvet et al., 2015), mais celle-ci joue un rôle primordial dans la construction des agrégats. Outre le fait de décomposer la matière organique morte afin de pouvoir l'intégrer au CAH, elle est, elle-même, de la matière organique qui finira par se décomposer. Les bactéries et champignons produisent des colles biologiques, ainsi que les vers de terre[158]. Les hyphes des champignons maintiennent mécaniquement le sol en place.

---

[157] Nous ne parlerons pas des tests mis en place pour mesurer cette caractéristique.

[158] En fait, la faune du sol a aussi un rôle mécanique sur le sol en se « déplaçant », on parle de bioturbation : les vers de terre étant emblématiques de ce travail de mineurs de fond.

Les racines font de même et produisent du mucilage (autre colle) qui facilite la pénétration du sol, et elles fournissent aux organismes de la rhizosphère des sucres (rhizodéposition[159]) qui leur permettront d'être en activité. Les végétaux ont d'ailleurs une autre façon de participer, en réalisant une couverture de sol qui le protège des impacts de la pluie.

Tout ceci explique pourquoi l'on prend de plus en plus en considération la vie du sol pour gérer son état physique, ce qui signifie offrir à ces habitants : de l'eau, de l'air, des nutriments et un habitat pas trop perturbé (par le travail du sol).

5.3.4 Structure du sol

La structure du sol est le résultat en trois dimensions des différents niveaux d'arrangement précédents. Elle peut être vue, de façon complémentaire, soit comme l'assemblage des agrégats soit comme l'organisation des vides situés entre eux. Cette structure est le résultat de la combinaison d'argiles minéralogiques, de la matière organique, des calcaires et du travail des êtres vivants.

La structure du sol est modifiée par le climat : la température joue, par des effets de gel et dégel et par son influence sur l'activité biologique ; les précipitations et les cycles d'assèchement/dessèchement peuvent avoir un rôle destructif.

Au niveau micro, l'eau peut en effet dégrader la structure, soit par le phénomène de battance, soit par éclatement à cause de l'air compressé par une infiltration soudaine, soit en imbibant de façon différenciée des argiles plus ou moins hydrophiles, soit encore en dispersant les flocs. On peut alors se retrouver avec des matières en suspension qui, sur des pentes, conduisent à des érosions ; ou qui, sur du plat, après assèchement, peuvent créer une mince croûte de battance en surface, voire un durcissement du sol sur un horizon plus profond (Calvet, 2013).

Au niveau macro, ce sont des effets mécaniques de compaction qui influent, particulièrement sur les macroporosités et les mésoporosités,

---

[159] Il semble d'ailleurs que cet apport de carbone organique soit fondamental, plus important que celui résultant des résidus, d'après Sokol et al. (2019).

et proviennent du passage d'engins mécaniques ou du piétinement d'animaux.

Mais la structure du sol peut aussi se dégrader sur un plus long terme : en perdant des macroagrégats à cause du manque de racines (sol nu) et de champignons (sol trop travaillé) ; ou en perdant des microagrégats, par épuisement de la matière organique.

5.4 Mesures du sol

5.4.1 Masse volumique du sol

Définitions

Il est possible de décomposer les trois phases du sol (S=solide, L=liquide et G=gazeuse), soit en fonction de leur volume : $V=V_S+V_L+V_G$, soit en fonction de leur masse : $m=m_S+m_L$ ($+m_G$ est négligeable).

La masse volumique humide du sol est alors définie comme $\rho=m/V=(m_S+m_L)/V$. Or, le contenu en eau du sol est un paramètre éminemment variable, c'est pourquoi on lui préfère la masse volumique sèche (*dry*) du sol :

$$\rho_D=m_S/V.$$

Nous utiliserons le plus souvent l'unité : Mg/m^3 ($= g/cm^3$). Les valeurs classiques sont de l'ordre de 1.42 ± 0.19 pour des terres arables (Ruehlmann & Körschens, 2009).

Modélisation à partir de la texture et des matières organiques

La masse volumique sèche du sol (MVS) reflète la construction du sol, et doit pouvoir être modélisée en fonction de données sur ses constituants minéraux et organiques. Parmi les nombreuses approches, nous allons employer le modèle modifié d'Adams-Stewart, proposé par Tranter et al. (2007), qui présente un bon ajustement aux données :

$$\rho_D = \frac{100}{\frac{SOM}{\rho_{OM}} + \frac{100 - SOM}{\rho_m}} \qquad (Eq.\ 5.1)$$

avec *SOM* le pourcentage de matières organiques, ρ_{OM} la masse volumique de ces matières organiques, fixée à $\rho_{OM}=0.224$, et ρ_m la

masse volumique de la partie minérale, qui est donnée par la fonction de pédotransfert :

$$\rho_m = 1.35 + 0.0045 \times sable - 6 \times 10^{-5} \times (44.7 - sable)^2 \\ +0.060 \times \log(profondeur) \qquad (Eq. 5.2)$$

où « sable » est le pourcentage de sable, et la « profondeur » est en cm.

On voit, d'une part, que c'est le seul pourcentage de sable[160] qui représente la texture, et d'autre part, qu'il est possible de calculer pour différentes profondeurs la MVS ; et qu'elle augmente avec la profondeur. La Figure 60 montre que la relation est négative entre la matière organique et la MVS, mais positive en ce qui concerne le pourcentage de sable. Comme nous le verrons plus loin, il est compliqué de modifier la texture, mais il est aisé, en revanche, d'apporter de la matière organique.

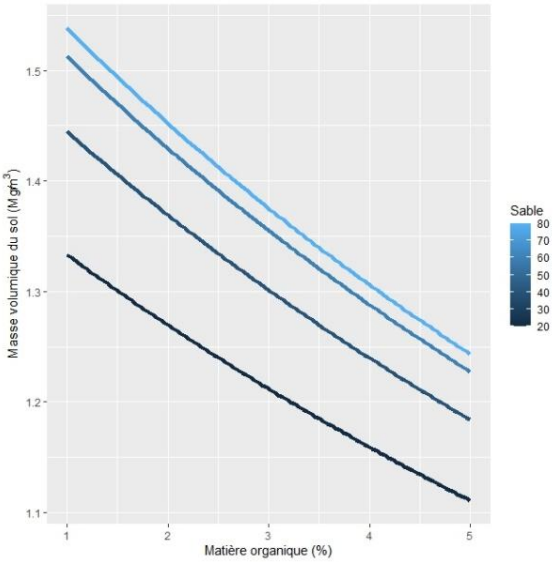


Figure 60 : Modélisation de la masse volumique du sol (Mg/m^3) en fonction du pourcentage de matière organique et du pourcentage de sable. Tiré de Tranter et al. (2007).

[160] Un petit détail, la fraction de sable ici considérée est entre 20 et 2000 µm, ce qui est la norme internationale, mais pas forcément la pratique la plus courante !

On peut aller un peu plus loin et se demander s'il y a un taux de matière organique qui permettrait d'assurer une masse volumique satisfaisante ? La Figure 61 nous montre, par des lignes de contour, comment le contenu du sol en carbone organique (*SOC*) et le contenu en argile (*Cl*) permettent de modéliser la masse volumique sèche grâce à une fonction de pédotransfert proposée par Kay et al. (1997) :

$$\rho_D = 1.5726 - 0.125 \times SOC - 0.0032 \times Cl + 0.0021 \times SOC \times Cl \; (Eq. 5.3)$$

On voit aussi une limite proposée par Johannes et al. (2017), basée sur de plus nombreux paramètres de l'état physique du sol, qui recoupe bien les meilleures valeurs de masse volumique : il s'agit de viser un amendement en matière organique pour que le rapport SOC/Argile > 1/8. On doit donc s'inquiéter de la texture du sol, afin de mieux « régler » la matière organique.

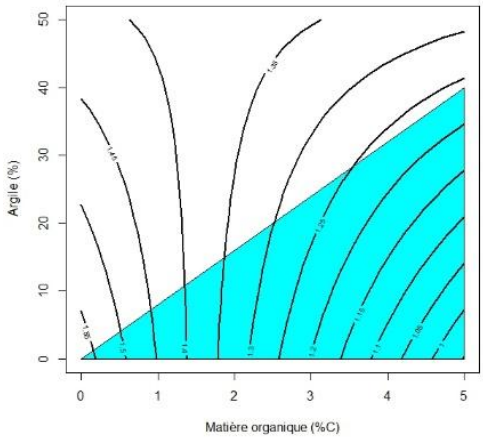


Figure 61 : En lignes de contour, la masse volumique prédite selon le contenu du sol en carbone organique et en argile. La surface en bleue est la limite de SOC/Argile>1/8 proposée dans Johannes et al. (2017).

5.4.2 Porosité

Définition

La phase solide n'occupe pas tout le volume, il reste des « vides », appelés pores, dans lesquels on trouve les phases liquide et gazeuse. La teneur volumique de ces vides est appelée porosité totale :

$$n=(V_L+V_G)/V.$$

Relation à la masse volumique sèche

On a la relation suivante :

$$n = \frac{d - \rho_D}{d} \qquad (Eq. 5.4)$$

avec d densité réelle[161] de la matière solide, souvent approximée par d=2.65, qui montre pourquoi la masse volumique sèche du sol est souvent utilisée comme indicateur de compaction du sol : lorsqu'elle est élevée, les vides se font rares...

Teneur volumique en air

Nous avions défini dans le chapitre sur l'eau la teneur volumique en eau θ, il est possible de faire de même avec la teneur volumique en air (*air-filled porosity*) :

$$AFP = V_G/V.$$

Au sein des vides, il y a une complémentarité du volume occupé par la phase liquide et la phase gazeuse : n=AFP+ θ. Ainsi, si nous irriguons trop généreusement (au-dessus de la capacité au champ), AFP devient petit, et s'annule à saturation. Comme nous le verrons, il est nécessaire qu'il y ait des échanges gazeux entre les racines des plantes et l'atmosphère, autrement dit une aération. Pour ce faire, on considère souvent comme nécessaire que AFP>10 % (Grable & Siemer, 1968).

5.4.3 Profondeur du sol

Il y a souvent une sorte de continuité dans le profil du sol, entre la surface, où la matière organique est très mêlée aux minéraux (c'est-à-dire que nous avons affaire à du véritable sol), et ce qu'il y a plus bas, qui ne peut plus véritablement être exploité par les racines des légumes. Il peut s'agir : soit de la roche-mère, soit d'une nappe phréatique proche, soit d'un sol trop compact comme c'est le cas avec l'existence

[161] Il s'agit du rapport entre la masse volumique réelle de la matière solide et la masse volumique de l'eau. La masse volumique réelle de la matière solide est le rapport de la masse sèche au volume du solide sans les porosités.

d'une semelle de labour. Nous avions d'ailleurs vu, au travers de la formule (équation 5.2), que la MVS augmentait avec la profondeur, et rendait dès lors l'utilisation de ce sous-sol plus problématique. Il est donc bon d'avoir une idée de la profondeur du sol, car cela va conditionner, en particulier, le réservoir utilisable.

Notons qu'il arrive, parfois, qu'il n'y ait pas véritablement de continuité, et que nous ayons alors affaire à des horizons de sol très différents.

5.5 Réponse des plantes à l'état physique du sol

Chez la plante, les premières averties de l'état du sol sont les racines. Aussi est-il bon de connaître deux ou trois petites choses à leur sujet.

5.5.1 Racines des plantes

Nous avons un biais de perception avec les plantes : nous nous représentons mal leur partie souterraine qui est formée des racines, mais aussi parfois de sortes de tiges. Nous ne nous rendons compte ni de la profondeur qu'elles peuvent atteindre (pour des arbres en forêt : une profondeur identique à la hauteur déployée au-dessus du sol), ni de la surface qu'elles peuvent couvrir (qui dépasse celle de la canopée). À part chez les arbres, le rapport de la masse des racines aux parties aériennes des végétaux va de 1 à 7 (Jackson et al., 2007) !

Architecture des racines

Il y a une différence fondamentale dans les systèmes racinaires des monocotylédones (maïs, poireau...) et des dicotylédones (qui forment la majorité des plantes du potager). Chez les secondes, on parle de système racinaire pivotant : à la germination, une radicule émerge, et devient une racine pivot qui va s'enfoncer dans le sol pour une exploration verticale ; depuis cette racine pivot, se développent des racines latérales qui permettent une exploration horizontale, développement qui peut se réitérer à plusieurs niveaux avec, au bout du compte, des radicelles ; il y a parfois une tubérisation de la racine, qui l'élargit comme chez la carotte.

Chez les monocotylédones, la même racine pivot issue de la radicule, émet un faisceau de racines latérales, aussi grandes que ce pivot, ce dernier pouvant même parfois disparaître. On parle de système racinaire fasciculé. Il enserre beaucoup mieux le sol, mais sur une plus faible profondeur que le système racinaire pivotant. Pour certaines monocotylédones, des racines adventives peuvent également être émises depuis le bas de la tige, et sont parfois aériennes, comme chez le maïs par exemple.

Les racines poussent accompagnées, surtout à leur extrémité, de poils absorbants qui doublent leur capacité d'exploration du sol.

Pour finir, il existe chez les plantes pérennes, une croissance secondaire des racines qui les rendent ligneuses.

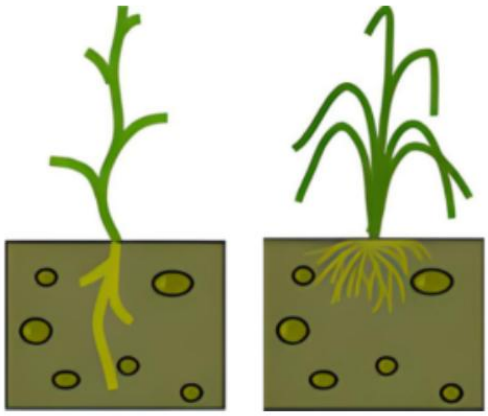


Figure 62 : Système racinaire pivotant à gauche, et système fasciculé à droite. Image tirée du passionnant site des botanistes francophones : https://www.tela-botanica.org

Fonctionnement des racines

Le système racinaire assure plusieurs fonctions pour le compte de la plante. L'ancrage permet de se protéger de l'arrachement par le vent, l'eau, ou les herbivores ; ainsi que du piétinement.

Complémentairement aux feuilles qui collectent le carbone et l'énergie solaire, les racines recueillent l'eau et les nutriments. Cette capacité est, en général, proportionnelle à la taille du système racinaire, de là vient la difficulté d'entrer en compétition avec un arbre... Le système racinaire de la plante est plastique : il est capable de se développer préférentiellement vers les zones les plus riches en eau et

en nutriments. Les racines ont en effet une perception de l'environnement, et elles envoient des informations, sous forme d'hormones, à l'ensemble de la plante... qui y répond.

Les plantes vont, bien entendu, répondre si les racines ont du mal à fournir l'eau et les nutriments nécessaires à leur croissance. Cependant, avant qu'une telle situation ne se produise, les racines, qui ont perçu que le sol devenait inhospitalier, ont déjà envoyé des signaux d'alerte à la plante : elle peut alors répondre, en quelque sorte, en avance (Passioura, 2002). Ainsi, en cas de manque d'eau, elle peut répondre en fermant ces stomates comme nous le savons bien, mais aussi en limitant la taille ou le nombre de cellules sur les feuilles, ou bien le nombre de feuilles lui-même. Les conditions inhospitalières sont la résistance du sol, la sécheresse, l'hypoxie, mais aussi la salinité ou des attaques de pathogènes.

Les racines ont également une fonction de stockage de réserves. Elle est très importante pour des plantes pérennes qui doivent se régénérer complétement (ciboulette, rhubarbe), mais aussi pour des plantes bisannuelles, auxquelles elles permettent de passer l'hiver. La carotte n'est pas carotte pour être mangée, mais d'abord pour avoir un moyen de passer l'hiver, avant de se reproduire l'année suivante. Ceci dit, tous les organes de réserve dans le sol ne sont pas, à proprement parler, des racines (mais peuvent être des rhizome, hypocotyle, bulbe...). Le carbone y est généralement stocké sous forme d'amidon. La formation de réserves a un coût pour la plante, au dépens de sa croissance et de sa survie ; elle ne doit donc pas manquer de ressources à ce moment-là ! Pour la culture de ce type de légumes, il est par conséquent crucial de savoir quand ce stockage se produira, afin de s'assurer que la disponibilité en eau et en nutriments sera bonne...

Les racines ont également une fonction de modification de leur environnement. D'une part, les racines secrètent des exsudats, qui sont des colles organiques nous intéressant directement dans cette partie sur l'état physique du sol. Ces exsudats lubrifient les racines pour aider à leur pénétration dans le sol, pour qu'elles entretiennent un bon contact avec lui, pour qu'elles les protègent un peu de la dessiccation en cas de manque d'eau, et pour qu'elles participent au maintien des microagrégats. D'autre part, les exsudats ont un rôle dans la santé biologique du sol, et plus précisément dans la rhizosphère ; ils

permettent à la plante de réguler ses interactions avec ses auxiliaires, ses compétiteurs, ses parasites et ses prédateurs. Elle n'est donc pas entièrement à la merci de ses ennemis, elle possède des capacités de défense chimiques. L'autre modification de l'environnement occasionnée par les racines concerne la disponibilité en eau avec l'ascenseur hydraulique. Les racines parviennent, dans une certaine mesure et dans certaines conditions, à redistribuer l'eau du sol entre des parties humides et d'autres plus sèches. Ce phénomène se déroule surtout de nuit car, de jour, l'eau recueillie est plutôt distribuée aux feuilles.

Enfin, les racines ont également pour fonction d'établir des alliances, en utilisant comme monnaie d'échange les produits carbonés issus de la photosynthèse. Les deux alliances les plus importantes sont les mycorhizes avec les champignons et les symbioses avec les bactéries.

La plupart des plantes sont mycorhizées au potager, avec comme exceptions : les brassicacées et les amaranthacées. Le champignon apporte d'abord du phosphore (80 % des besoins), dans une moindre mesure de l'azote (25 % des besoins), et de l'eau. Cela tient à la grande efficacité avec laquelle les champignons, dont les hyphes sont plus petites que les racines, explorent le sol.

Chez les fabacées en particulier, des symbioses ont lieu avec des bactéries du genre *Rhizobium*, qui leur permettent de fixer l'azote atmosphérique.

À présent, voyons successivement comment les racines, puis l'ensemble de la plante, répondent à la compaction du sol, à sa sécheresse, à son manque d'aération et à sa résistance (dureté).

5.5.2 Réponse des plantes à la compaction

La compaction est une mesure de la compression d'un sol, dont le spectre va de trop meuble jusqu'à trop tassé, en passant par un optimum. Mais c'est, sauf mention contraire, à un sol trop tassé auquel nous ferons référence lorsque nous allons, à présent, parler de problème de compaction.

En Angleterre, la compaction a été désignée comme l'un des trois problèmes majeurs menaçant la productivité des sols, avec l'érosion et la perte de matières organiques (Batey, 2009). Il s'avère que c'est une

situation très répandue (37 % des surfaces agricoles en Europe de l'Est). Elle est causée par le passage des engins mécaniques et des troupeaux d'animaux. Rappelons, en passant, que le jardinier est aussi un mammifère, capable de fouler aux pieds son propre potager.

Pour mesurer la compaction, on peut utiliser des méthodes qualitatives ou quantitatives. Les méthodes qualitatives sont basées sur l'observation de flaques à la surface du sol, sur la facilité de creuser et sur l'étude du profil de sol (en réalisant une tranchée). Dans un tel profil, on peut alors voir la distribution des couleurs de sol, des racines, de l'eau ; ou bien en toucher du doigt la dureté. Les méthodes quantitatives sont basées soit sur la résistance du sol, mesurée avec un pénétromètre, dont nous parlerons plus loin, soit le plus souvent sur sa masse volumique sèche ρ_D.

Pour un sol donné, ρ_D est un bon indicateur de la compaction : on se rappellera qu'il est inversement relié à la porosité totale. On peut voir dans la Figure 63 l'effet négatif de ce paramètre ρ_D sur la croissance des racines et le poids des parties aériennes de plants de tomate.

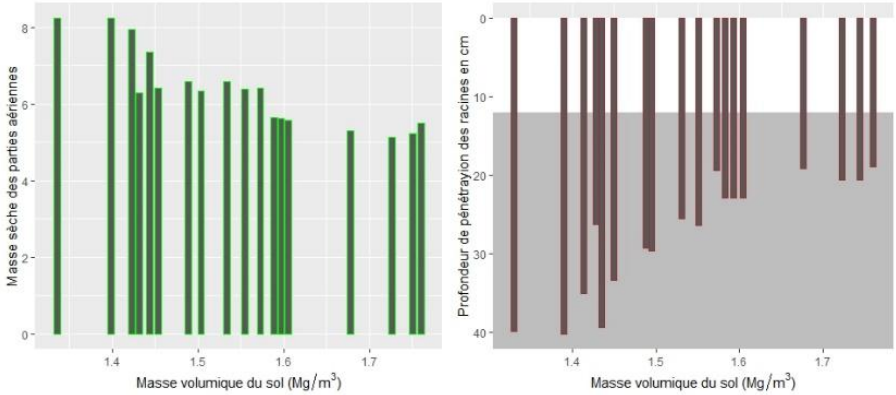


Figure 63 : À gauche, effet de la compaction (en fait de ρ_D) sur la masse sèche aérienne de plants de tomates. À droite effet de la compaction sur la pénétration des racines des mêmes plants (la zone plus sombre est celle qui a été compactée). Tiré de Letey (1985).

On a quantifié, pour différentes cultures, l'effet de compaction (*cf.* Tableau 7), dont je vous laisse apprécier l'importance. Outre les effets sur la quantité de production, la compaction a aussi une influence sur sa qualité et, sur l'érosion des sols, particulièrement pour les terrains en pente.

Tableau 7 : Production de divers légumes (en kilogramme sur un rang de 10 mètres) en sol compacté (3.2 MPa) et en sol non compacté (1.5 MPa). Tiré de Orzolek (1991).

Culture	Sol compacté	Sol non compacté
Haricot vert	2,9	11,6
Concombre	25,0	73,8
Chou	39,5	114,8
Aubergine	3,2	9,9
Poivron	36,2	55,5
Courgette	37,2	125,1
Maïs	7,1	16,0
Tomate	47,3	108,3
Pastèque	139,2	159,2

Le paramètre ρ_D présente toutefois un inconvénient lorsque l'on souhaite comparer des sols de nature différente. Une même valeur peut, en effet, indiquer une compaction dans un sol avec beaucoup de matière organique, et pas dans un autre.

C'est pourquoi Håkansson (1990) a proposé de calculer une valeur de référence $\rho_{réf}$ pour un sol donné, en le compressant toujours par le même protocole, puis d'utiliser comme indicateur de compaction la masse volumique relative du sol : $\rho_{rel} = \rho_D / \rho_{réf}$. En employant des fonctions de pédotransfert (da Silva et al., 1997), on obtient pour 2 % (resp. 2 % puis 4 %) de carbone organique et 20 % (resp. 40 % puis 20 %) d'argile, les valeurs « normales » d'un tel sol : $\rho_D = 1.34$ (resp. 1.36 et 1.18 par l'équation 5.3), puis $\rho_{réf} = 1.55$ (resp. 1.55 et 1.37 par l'équation 5.5), et finalement $\rho_{rel} = 0.86$ (resp. 0.86 et 0.86). On peut donc voir que la masse volumique relative, quel que soient les paramètres du sol, est bien stable.

$$\rho_{réf} = 1.810 - 0.129 \times SOC - 0.004 \times Cl + 0.002 \times Cl \times SOC \ (Eq.\ 5.5)$$

Mais, en fait, ce qu'il faut bien saisir, c'est que la compaction a un effet sur la production qui est *indirect*. Comme nous allons le voir à présent, la compaction réduit l'air disponible pour les plantes, diminue en partie l'eau disponible, mais aussi modifie la résistance du sol qui permet la pénétration des racines. Et ce sont ces trois variables qui ont, elles, un effet *direct* sur la production.

Une expérience rapportée par Letey (1985) montre en effet que, lorsqu'on fournit artificiellement assez d'oxygène aux racines, deux sols, l'un compacté et l'autre non, conduisent à la même production. C'est donc bien l'aération réduite qui est le nœud du problème, et pas la compaction en elle-même.

5.5.3 Réponse des plantes à la sécheresse du sol

Le premier effet négatif de la sécheresse du sol a été largement évoqué dans le chapitre sur l'eau : la courbe de réponse décroît à partir de la capacité au champ, et plus encore lorsque l'on s'approche du point de flétrissement permanent.

Le deuxième effet négatif est un effet indirect : la sécheresse du sol a tendance à le rendre plus résistant, ce qui a, par contre-coup, un effet sur la production comme nous le verrons (Figure 64 à droite). da Silva et Kay (1997, équations 9 à 12) montrent que la résistance du sol dépend de sa masse volumique sèche, de son contenu en matière organique et en argile (ou sable) et... en eau.

Un dernier effet négatif de la sécheresse est que le déplacement de la solution dans le sol se fait plus difficilement : lorsque le sol sèche, il retient plus l'eau et les nutriments dissous.

Le seul point positif de la sécheresse, c'est que les racines des plantes ne vont en revanche pas manquer d'air, ce qui est important comme nous allons le découvrir tout de suite.

5.5.4 Réponse des plantes au manque d'aération

La porosité du sol est donc inversement emplie d'eau ou d'air. Une situation d'engorgement conduit immanquablement à un manque d'aération pour les racines. Or, si les racines ne font pas de photosynthèse, donc ne produisent pas d'oxygène, en revanche elles respirent, et génèrent par conséquent du dioxyde de carbone. Sans renouvellement, l'air en devient saturé et l'alarme du détecteur de CO_2 se déclenche, comme dans nos maisons !

Nous avons vu, dans le chapitre sur l'eau, les pertes majeures qui s'opéraient rapidement, pour des plants de tomates, en cas

d'engorgement ; mais la Figure 64 (à gauche) nous indique que le manque d'oxygène ne réussit pas mieux au maïs[162].

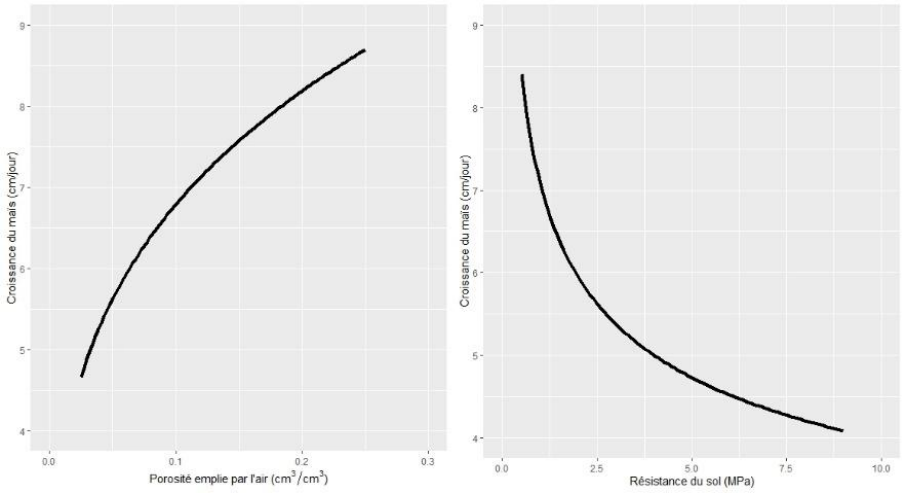


Figure 64 : Relations entre la croissance de plants de maïs (cm/jour) et (à gauche) la porosité emplie d'air en cm^3/cm^3 et (à droite) la résistance du sol en MPa. Tiré de da Silva et al. (2004).

Mais pouvons-nous améliorer cette situation en mieux gérant l'état physique du sol ? Kay et al. (1997) proposent des fonctions de pédotransfert pour modéliser le contenu volumique en eau θ correspondant à une succion donnée ψ, en fonction de la masse volumique sèche du sol, de son contenu en argile et en carbone organique :

$$\theta = a|\psi|^b \qquad (Eq.\ 5.6)$$

avec

$$\ln(a) = -4.15 + 0.402 \times \ln(SOC) + 0.685 \times \ln(Cl) + 0.273 \ln(\rho_D) \quad (Eq.\ 5.7)$$

et

$$b = -0.546 + 0.022 \times \ln(SOC) + 0.113 \times \ln(Cl) + 0.101 \ln(\rho_D) \quad (Eq.\ 5.8)$$

La Figure 65 montre ce qui se passe pour un sol donné (carbone organique à 1.5 % et taux d'argile à 30 %), si nous modifions sa masse volumique sèche ρ_D, c'est-à-dire sa compaction. Le contenu d'eau à la

[162] Notons que da Silva et al. (2004) indiquent que l'usuelle limite des 10 %, au-dessous de laquelle il est considéré que la porosité emplie d'air est dommageable, ne semble pas constituer un seuil spécialement remarquable.

capacité au champ et au point de flétrissement, donc le réservoir utilisable, sont finalement peu modifiés. Par contre, pour un sol arrosé à la capacité au champ, c'est la quantité d'air disponible (hauteur entre la droite rouge et la droite verte) qui pâtit de la compaction.

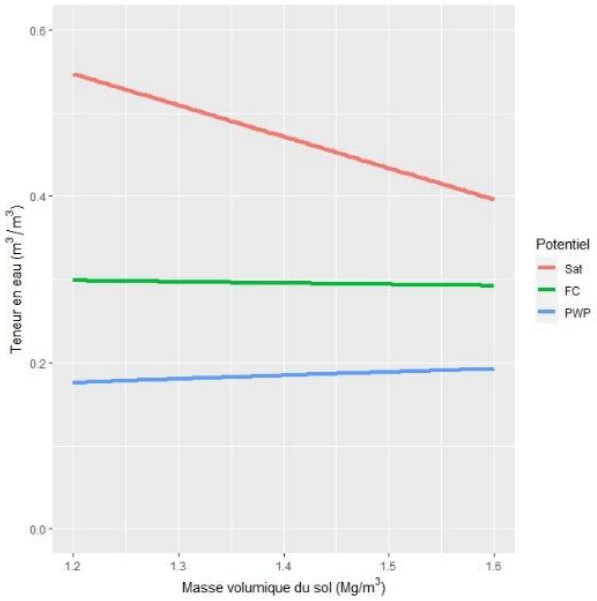


Figure 65 : Effet de la masse volumique sèche du sol (Mg/m^3) sur la teneur en eau du sol (m^3/m^3) pour un potentiel matriciel à saturation, à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent. La porosité emplie d'air lorsque l'irrigation est à la capacité au champ se déduit de la différence entre la teneur à saturation et la teneur à capacité au champ.

Maintenant, outre limiter la compaction par des techniques ponctuelles, comme un travail de sol ou une protection par une couverture de sol, on peut envisager un effet à long terme en augmentant le contenu du sol en matière organique. En combinant le modèle ci-dessus avec la fonction de pédotransfert utilisée pour la masse volumique sèche (équation 5.3), on peut estimer sur la Figure 66 l'effet de la matière organique sur le contenu en eau du sol. Cette fois, les choses sont un peu différentes : on voit que le réservoir utilisable (hauteur entre la courbe bleue et la courbe verte) augmente, ce qui est une bonne nouvelle. En revanche, si on se situe encore par rapport à la capacité au champ, il n'en va pas de même pour la porosité emplie d'air (hauteur entre la courbe verte et la courbe rouge).

Toutefois, cet effet est moins drastique que précédemment avec la compaction. Ne faudrait-il pas, en définitive, jouer simultanément sur les deux paramètres ?

D'aucuns ne croient pas complètement à un effet miracle de la matière organique sur le réservoir utilisable (Marphy, 2015), car elle est le plus souvent concentrée dans l'horizon supérieur du sol, au mieux ses trente premiers centimètres. Or, les plantes ont souvent bien besoin d'utiliser l'eau d'horizons inférieurs.

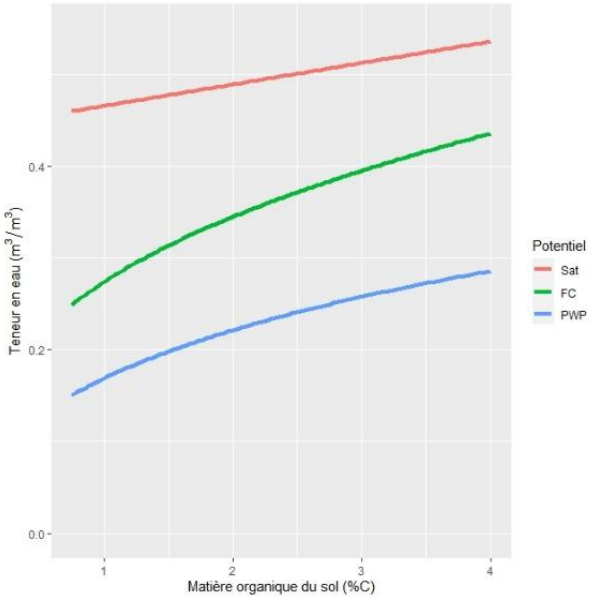


Figure 66 : Effet du pourcentage en matière organique (carbone) sur la teneur en eau du sol (m^3/m^3) pour un potentiel matriciel à saturation, à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent.

5.5.5 Réponse des plantes à la résistance du sol

Pour imiter les racines, il suffit d'enfoncer quelque chose de pointu dans le sol, et de voir si c'est facile ou pas. C'est le principe du pénétromètre qui donne des mesures de la pression qu'il convient d'exercer (en Mpa) pour y parvenir.

Effet sur la pénétration des racines

La Figure 67 montre la forte relation entre la pénétration des racines dans le sol et la mesure de sa résistance ; cela valide clairement son emploi. De ces essais menés par Taylor et Gardner (1963), on peut

tirer la conclusion suivante : au-delà d'une résistance de 3 MPa, les racines ne progressent plus dans le sol. Quelques années plus tard, Taylor et al. (1966) suggèrent que la limite à ne pas dépasser serait d'environ 2 MPa. D'autres évoquent la possibilité d'aller jusqu'à 5 MPa (da Silva et al., 1994). Mais qu'une telle limite absolue existe ou non, a finalement peu d'importance : la corrélation est toujours forte et négative.

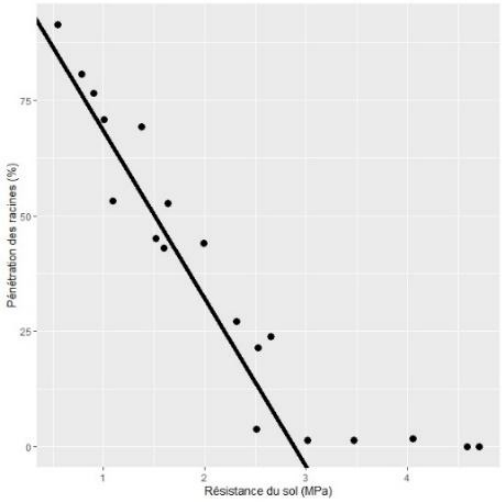


Figure 67 Effet de la résistance du sol sur la pénétration des racines.
Tiré de Taylor & Gardner (1963).

Effet sur la production aérienne

Toutes les cultures ne sont pas des légumes-racines, pour lesquels il est clair que la longueur des racines nous importe au premier chef : qu'en est-il de l'effet de la résistance du sol sur la croissance aérienne ? La Figure 64 (à droite) montre nettement que cet effet est négatif (et statistiquement significatif ;-)

Bien entendu, cela vient en partie du fait que les racines, pénétrant moins le sol, ont plus de mal à collecter l'eau et les nutriments. Mais, au-delà de cet effet, des plantes qui poussent dans des contenants, même correctement irriguées et fertilisées, sont de taille plus petite[163],

[163] Parce que les feuilles contiennent moins de cellules, et non pas comme les plantes qui ont des problèmes d'eau et de nutrition parce qu'elles ont des cellules plus petites (mais aussi nombreuses).

c'est ce qu'on appelle l'effet bonsaï. Cet effet peut aussi se produire au champ, soit à cause d'une semelle de labour, soit dans des situations où le sol n'est pas travaillé, mais un simple trou est creusé pour y déposer une graine (voire une plantule) : les parois du trou sont alors parfois lisses et colmatées par le creusement du plantoir et finalement forment une sorte de contenant.

À l'inverse, la croissance des plantes peut être impactée négativement par l'existence de nombreux macropores dans le sol, où les racines vont pouvoir se faufiler ; elle est aussi diminuée si le sol est trop peu résistant. L'une des explications est qu'il y a dans ces cas un faible contact entre le sol et la graine, qui entraîne une mauvaise installation des plantules. C'est d'ailleurs pourquoi on plombe *légèrement* le sol après un semis. Ce qu'on observe est que les racines ne sont pas impactées par cette faible résistance, mais en revanche les parties aériennes le sont. Une possible explication est que cela diminue le risque de déracinement. Ce que je trouve intéressant, en l'espèce, c'est le phénomène que l'on repère dans la plupart des courbes de réponse à un indicateur : il y a stress quand cet indicateur est élevé ou quand il est bas, et c'est toujours une zone intermédiaire qui est optimale.

Résistance du sol, compaction et matière organique (et eau)

Dès lors, comme précédemment avec l'aération, on va se demander si, en modifiant la structure du sol, on pourrait changer sa résistance, et *indirectement* la production ?

Là encore, Kay et al. (1997) proposent une fonction de pédotransfert qui montre comment la résistance du sol SR dépend de sa masse volumique sèche, de son contenu en carbone organique et en argile et, ce qui va être très important, de l'eau qu'il contient :

$$SR = c\theta^d \rho_D^e \qquad (Eq.\ 5.9)$$

et

$$\ln(c) = -3.67 + 0.765 \times SOC - 0.145 \times Cl \qquad (Eq.\ 5.10)$$

$$d = -0.481 + 0.208 \times SOC - 0.124 \times Cl \qquad (Eq.\ 5.11)$$

$$e = 3.85 + 0.0963 \times Cl \qquad (Eq. 5.12)$$

On peut saisir sur la Figure 68 que la résistance du sol dépend très clairement, sur un sol donné, de la compaction. Cependant, il apparaît que cette résistance diminue avec le contenu en eau du sol. Il est donc possible d'assouplir un sol compacté avec de l'eau (mais aussi, à l'inverse, comme nous le verrons par la suite, de le compacter plus encore en marchant dessus lorsqu'il est mouillé). Il est possible d'en déduire que l'influence de la compaction se fera plus sentir dans les régions ou dans les saisons les plus sèches.

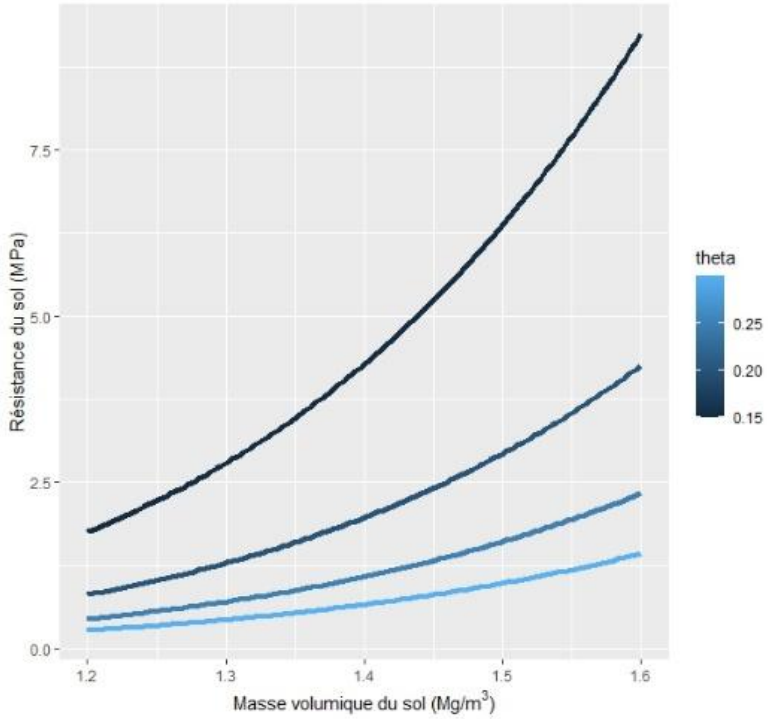


Figure 68 : Résistance du sol (MPa) en fonction de la teneur en eau volumique et de la masse volumique sèche (avec 2.5 % de matière organique et 20 % d'argile). Modèle tiré de da Silva & Kay (1997).

Enfin, si nous modifions le sol à long terme en y ajoutant de la matière organique, la Figure 69 montre l'amélioration nette de la résistance avec une succion au point de flétrissement, c'est-à-dire quand l'eau devient vitale, et que les racines pourront dès lors mieux dénicher.

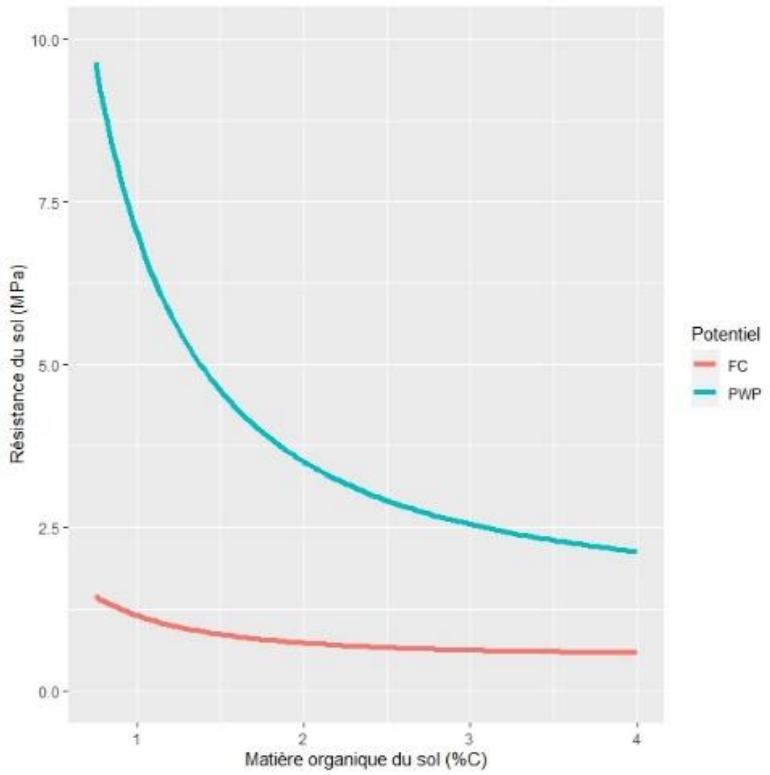


Figure 69 : Résistance du sol (MPa) en fonction du pourcentage de matière organique (C) selon un potentiel hydrique à la capacité au champ (FC) ou au point de flétrissement permanent (PWP) avec 20 % d'argile. Modèle tiré de da Silva & Kay (1997).

5.6 Concerto en sol

Il ne reste qu'à mettre l'ensemble de ce qui précède en musique pour obtenir un *concerto en sol*. Il s'agit d'une proposition personnelle, un cadre conceptuel qui résume : premièrement, les effets directs de trois conditions du sol (eau, air et résistance) sur la production ; deuxièmement, l'effet indirect de la construction du sol (texture, matière organique et état de compaction grâce à la masse volumique sèche) ; et troisièmement, les relations internes entre les éléments de la construction, mais aussi entre les conditions du sol. Nous pourrons alors, dans la section suivante, trouver des *clefs de sol*, pour prévenir, limiter ou remédier aux problèmes de santé physique du sol.

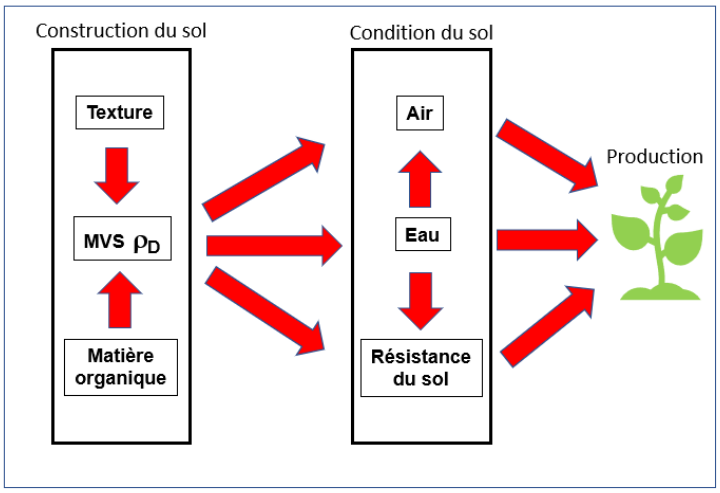


Figure 70 : Concerto en sol, un cadre d'analyse des conditions du sol (air, eau et résistance) qui influencent la production de légumes ; et de leurs relations avec les mesures de construction du sol (de son état physique) que sont la texture, le pourcentage de matière organique et l'état de compaction.

Il sera toutefois difficile de donner des valeurs pour les paramètres de structure qui soient globalement optimales, car cela dépend de l'espèce, du stade de développement de la culture et du climat (il a été montré que, dans un climat chaud, cela cause plus de problèmes aux plantes si l'eau et l'oxygène deviennent limités : Letey 1985). Enfin, il y a des oppositions entre les optima : une aération meilleure signifie moins d'eau et une résistance meilleure signifie plus d'eau...

5.7 Clefs du sol

Enlever les pierres et les graviers

Les pierres, voire même les graviers, sont un obstacle à contourner pour les racines et n'apportent pas grand-chose au sol, sauf à très long terme avec leur altération. On va donc procéder à un épierrage ; mais est-il possible de faire quelque chose de constructif ensuite ? Sans parler de réaliser un nouveau palais du Facteur Cheval, un jardinet sec zen ? Un cairn ? Ou en versions plus utilitaires : un petit muret, un tas de pierres pour accueillir la biodiversité, voire un système de drainage pour des terres hydromorphes ?

Amendement minéral

D'aucuns se disent parfois qu'ils aimeraient changer la texture de leur sol ; quel effort cela pourrait-il bien représenter ? On part d'une masse volumique sèche de sol à 1.42, soit sur 30 cm de la couche supérieure : 1420×0.3=426 kg de terre. Avec, disons, 10 % de sable initialement, donc 42.6 kg, si nous souhaitons passer à 20 % : il faut par conséquent que (42.6+X)/(426+X)=0.2, ce qui donne X=53 kg par m^2... Pour un potager de 100 m^2, cela signifie plus de cinq tonnes de sable... Il faudra trouver un marchand de sable, ensuite amener ce dernier avec un véhicule adapté et finalement l'incorporer.

Mais, en général, lorsque l'on parle d'apports minéraux pour améliorer l'état physique du sol, on pense plutôt à des amendements calciques ou calco-magnésiens : ce qu'on appelle un chaulage. Au-delà de son rôle dans la nutrition des plantes, le calcium est le cation essentiel du complexe argilo-humique. Sa présence est indispensable, et s'il vient à manquer, d'une part, il y a un risque de dispersion des flocs, et d'autre part, il est souvent remplacé par des ions hydrogène : ce qui va entraîner une acidification[164] concomitante ; notons, en outre, que l'activité bactérienne est inexorablement acidifiante. La déficience en calcium peut provenir de la roche-mère, qui n'en contient pas, ou être la conséquence d'une décalcification, par exportation ou lixiviation importantes.

Pour régler simultanément le problème du calcium et du pH, le principe est celui de la dissolution du carbonate de calcium qui produit, à la fois, le cation désiré et une base (OH^- qui neutralise les H^+) :

$$CaCO_3 + H_2O \text{ -> } Ca_2^+ + 2OH^- + CO_2.$$

Les quantités à apporter dépendent du niveau de redressement souhaité du pH, et de la capacité d'échange cationique du sol (CEC, donnée dans les analyses de sol : en gros, il s'agit du nombre de places disponibles pour des cations dans le CAH). Le Tableau 8 décrit, pour un potager de 100 m^2, les kilos à apporter, soit de chaux, soit de roche

[164] Nous y reviendrons, mais un faible pH va générer des soucis de disponibilité des nutriments pour les plantes, voire de toxicité, et n'est guère apprécié par les organismes du sol.

calcaire, ces dernières devant être broyées plus ou moins finement selon la vitesse d'action voulue.

Tableau 8 : Apports calciques à réaliser en kilogrammes pour 100 m^2 de potager selon différentes valeurs de la CEC. Ces apports permettent d'élever le pH de 0.5 (s'il est situé entre 5 et 6). Pour élever le pH de 1, il convient de doubler l'apport. Calculé[165] d'après COMIFER (2017, p.247, Tableau 6.10).

Unité d'apport : kg/100m²	**CEC=5 (cmol⁺/kg)**	**CEC=10**	**CEC=15**
CaO	7,0	14,0	20,0
Chaux	7,8	15,6	22,2
Roche calcaire	12,7	25,4	36,4

Amendement organique (et paillage)

Dans le concerto en sol, il manque une boucle pour que le système fonctionne sur la durée : la production du potager doit, bien entendu, servir à la consommation, mais aussi revenir en partie dans le système sous forme de résidus.

Mais est-ce que cela suffit ? ou bien faut-il aller chercher à l'extérieur, soit dans la pelouse, soit dans la plate-forme municipale de compostage, soit dans les écuries du club équestre voisin, de quoi redonner au sol ce que nous lui avons pris en « exportant » les légumes ? Nous avons vu, dans la section concernant la matière organique, que le bilan humique permettait de savoir si nous respections la loi de la restitution. Il s'agit à présent d'en préciser quelques éléments, et de voir avec d'autres apports que le foin, les quantités qu'il est nécessaire de ramener.

La matière organique dans le sol permet de construire sa structure par le complexe argilo-humique, de limiter son érosion, de stocker les éléments nutritifs pour les plantes, de faciliter l'infiltration de l'eau (et de l'air) et sa rétention, ainsi que d'aider à la pénétration des racines. Nous verrons, plus loin, que c'est aussi une des solutions évoquées pour

[165] Pour ceux que cela intéresse, le calcul est basé sur une valeur neutralisante de VN=0.90 pour la chaux et VN=0.55 pour les roches calcaires. Si la CEC_{metson} est donnée en meq/kg dans votre analyse de sol, il faut diviser cette quantité par 10 pour la convertir en $cmol^+/kg$.

stocker plus de dioxyde de carbone et combattre le changement climatique. Mary et Guérif (1994) parlent justement de « patrimoine matière organique du sol », mais on peut préférer le terme d'humus. Comment gérer au mieux ce patrimoine, pour créer un potager durable, voire même léguer un sol de meilleure qualité aux générations suivantes ?

Pour rappel, Hénin et Dupuis (1945) proposent que la dégradation de l'humus soit proportionnelle à sa quantité ($k_2 \times H$, k_2 est le coefficient de minéralisation secondaire), et qu'il en soit de même pour l'humification de la matière organique ($k_1 \times MS$, k_1 est le coefficient isohumique et MS la masse sèche de l'apport) ; on se retrouve donc avec un bilan de :

$$\Delta H = k_1 \times MS - k_2 \times H$$

La question est de savoir si, sur une année, le sol est agradé ($\Delta H > 0$) ou dégradé ($\Delta H < 0$) par les pratiques culturales, les amendements et le traitement des résidus de récolte. En ce qui concerne les unités de mesure, H et MS doivent avoir les mêmes, et les auteurs ont parfois choisi de parler en termes de matière organique ou de carbone, et en stock (T/ha) ou bien en teneur (g/Kg). Afin d'avoir une unité qui soit plus à la portée du jardinier amateur, je vais choisir le kilo de matière organique sèche par mètre carré.

Le coefficient isohumique dépend essentiellement du type de matière organique apportée, et une formule (ISB, indice de stabilité biologique) a été proposée comme approximation assez satisfaisante :

$$k_1 = 2.112 - (0.02009 \times SOL) - (0.02378 \times HEM) - (0.02216 \times CEL) + (0.00840 \times LIG)$$

avec SOL, HEM, CEL et LIG étant respectivement les proportions de solutés, hémicellulose, cellulose et lignine dans la matière organique considérée. Cette formule montre que l'humification se fait essentiellement sur la base du contenu en lignine (seul signe positif de

l'équation). On peut trouver dans la littérature grise[166] les valeurs de k_1 données dans le Tableau 9 ; mais attention, on multiplie par de la matière sèche MS, il faut donc convertir la matière fraîche par un coefficient d'humidité h : MS=h×MF, récapitulé pour différents amendements dans le même tableau.

Le coefficient de minéralisation secondaire dépend, lui, essentiellement des conditions pédoclimatiques, et la formule suivante, tirée de Girard et al. (2011), en permet une approximation :

$$k_2 = 0.03 \times (1 + 0.2 \times (TMA - 10)) / [(1 + 0.005 \times Arg) \times (1 + 0.0015 \times CaCO3)]$$

On voit que, plus il y a d'argile (Arg en g/Kg de terre fine), et plus il y a de carbonates de calcium (CaCO3 en g/Kg de terre fine), donc de calcaire, plus la minéralisation est faible : à mettre en rapport avec la plus grande cohésion du complexe argilo-humique. La température moyenne annuelle du sol (TMA en °C) accélère la minéralisation.

Si je me réfère à mes propres analyses de sol, j'obtiens sur mon potager Arg=199, CaCO3=7 et une température moyenne de 11.1°C sur 2007-2023, ce qui donne k_2=0.018. On va garder, pour la suite, une valeur de référence de k_2=2 % si vous n'avez pas de telles données personnelles.

Prenons donc 1 m^2 de surface de potager, et considérons une profondeur de sol usuelle de 30 cm. Un mètre cube contient environ 1.42 tonne de sol sec, ce qui nous donne 1420 × 0.3=426 kg de sol. Si

---

[166] Les estimations des coefficients d'humidité h sont tirées de : ITAB (2017) *Produire des légumes biologiques Tome 1*. Editions ITAB. Les estimations des coefficients k_1 de : Collaud, G. (2014). Production végétale : Calculer les rendements en humus. *Revue UFA, 11*, 14 ainsi que Bouthier, A., Duparque, A., Mary, B., Sagot, S., Trochard, R., Levert, M., ... & Ganteil, F. (2014). Adaptation et mise en œuvre du modèle de calcul de bilan humique à long terme AMG dans une large gamme de systèmes de grandes cultures et de polyculture-élevage. *Innovations agronomiques, 34*, 125-139. Les estimations concernant le brf de : Kulagowski, R., & Giraud, G. (2012). *Evaluation de l'utilisation du BRF (bois raméal fragmenté) en Grandes Cultures*. Travaux réalisés dans le cadre du Réseau DEPHY Grandes Cultures irriguées Val de Durance.

son contenu en matière organique est de 3 %, cela revient, à peu près, à H=426×0.03=12.78 kg d'humus, qui est donc minéralisé à hauteur de k_2×H=0.02×12.78=0.255 kg. C'est ce qui constitue la perte annuelle.

Maintenant, imaginons un amendement de compost de déchets verts MF, qui va constituer un apport d'humus de k_1×h×MF, et cherchons la quantité qui permet de combler la perte de 0.255 kg : ce sera donc MF=0.255/(k_1×h) kilos. En employant les données du Tableau 9 (*h*=0.60 et k_1=0.80), nous avons besoin de MF=0.53 kg de compost de déchets verts par mètre carré. On peut trouver, dans la dernière colonne du tableau, ce même calcul d'équilibre du bilan humique pour les autres amendements.

Tableau 9 : Paramètres pour l'humification de diverses matières organiques : *h* coefficient d'humidité, k_1 coefficient isohumique et ΔH la quantité de matière fraîche à apporter chaque année pour avoir un bilan humique équilibré, avec un stock initial de matière organique de 3 % et avec k_2=0.02 (ce sont des moyennes, les matières organiques présentent une importante variabilité).

Apport	*h*	k_1	ΔH (kg)
Foin/Paille	0,85	0,15	2,00
Déchets verts frais	0,15	0,05	34,00
Compost de déchets verts	0,60	0,80	0,53
Fumier frais de bovin	0,20	0,33	3,86
Fumier bien décomposé de bovin	0,33	0,50	1,54
Bois raméal fragmenté	0,49	0,85	0,61

Nous avons donc une meilleure idée de ce qu'il faut apporter pour garder notre capital d'humus. Notons, primo, que nous pouvons combiner ces apports, par exemple avec deux moitiés : 1 kg de foin et 0.33 kg de bois raméal fragmenté. Secundo, que cet apport ne préjuge pas des nutriments ainsi mis à disposition des plantes, comme l'azote. C'est un autre sujet, que nous traiterons dans le chapitre suivant.

Plus joueur, une autre ambition est de remonter son taux de matière organique, et donc nous allons prétendre passer de nos 3 % de départ à 5 % en une seule fois. Le compost de déchets verts est manifestement l'un des apports les plus efficaces ; il est facile à trouver, d'un prix raisonnable et pas compliqué à incorporer au sol : nous allons par conséquent nous concentrer sur lui. Comme nous l'avons dit, 3 %

d'humus représente 12.78 kg sur 426 kg de sol. Pour passer à 5 %, il faut ajouter X tel que (12.78+X)/(426+X)=5 %, ce qui donne X ~ 9 kg. Il ne reste plus qu'à calculer : MF=9/(0.80×0.60) ~ 19 kg[167]. On est donc sur l'idée d'une tonne[168] pour un potager de 50 m^2.

Cependant, la minéralisation secondaire sera plus importante, et donc l'apport annuel nécessaire pour la combler devra être supérieur. Le modèle de Hénin et Dupuis, s'il est utilisé sur plusieurs années avec un apport identique, conduit à la Figure 59 et à ses asymptotes. La conséquence est que, dans un jardin, tondre régulièrement sa grande pelouse, pailler son potager avec les résidus[169], et faire de même avec les feuilles mortes de son petit prunier, peut ne pas être suffisant, et à la longue, appauvrir le patrimoine en matière organique. Inversement, on ne peut augmenter indéfiniment le stock d'humus, même en prenant un abonnement premium à la plate-forme de compostage.

Tout cela est bel et bon, mais... est-ce que le modèle de Hénin et Dupuis fonctionne ? Sur des essais de très longue durée, ses estimations peuvent dévier, mais il est malgré tout considéré comme un « bon instrument de classement des situations culturales », donc, à notre niveau amateur, suffisant pour fournir des ordres de grandeur. Pour citer George Box, un statisticien célèbre : « Tous les modèles sont faux, mais certains sont utiles ». Le modèle de Hénin et Dupuis a été amélioré par Andriulo et al. (1999), en prenant en considération le fait que l'humus peut être séparé en deux compartiments : une partie active qui est humifiée dans l'année et une partie stable qui n'est pas humifiée à l'échelle de la vie humaine. Les prédictions sont bien meilleures, mais demandent de nouveaux calculs de k_2 et une estimation de la proportion que représente la partie active (1/3 ?). L'inconvénient est que toutes ces connaissances sont contenues, soit dans des mémoires ou des thèses difficilement consultables, soit dans des outils informatiques pratiquement inaccessibles.

---

[167] Cela semble beaucoup, mais dans certaines approches de type « sol vivant », des apports initiaux massifs de l'ordre de 50-100 kg/m^2 sont effectués... avec des risques de « blocage » durable, le temps pour le sol d'avaler de telles quantités.

[168] Soit dans les 100 € en 2024 pour ma propre plate-forme de compostage.

[169] Bien regarder dans le tableau des coefficients. Oui, vous avez bien lu : 34 kg par mètre carré !

Un autre problème réside dans le fait que les coefficients k_1 et k_2, tels qu'approximés par les deux équations présentées, ne dépendent pas de la technique de travail du sol. Or, Mary et Guérif (1994, tableau 3) montrent que l'humification est diminuée par l'intensité du travail du sol (k_1 baisse) et que la minéralisation secondaire s'en trouve augmentée (k_2 monte). Ceci nous amène aux questions suivantes : mais qui fait ce travail d'humification et de minéralisation ? Et dans quelles conditions peut-il le réaliser correctement ? Eh bien... certains penseront, à raison, à des réactions physico-chimiques, et d'autres, à déraison, à des « énergies subtiles » : mais ce sont, pour une large part, des micro-organismes qui effectuent ces transformations. Et le meilleur des mondes pour ces organismes, c'est (1) une certaine température, (2) une certaine humidité, (3) une certaine quantité d'oxygène, (4) un habitat pas trop perturbé et... (5) de la nourriture. Les deux premiers points expliquent que minéralisation (et donc nourriture pour les plantes) et humification se déroulent principalement au printemps et à l'automne, voire en été si l'humidité est suffisante. Le manque d'oxygène, par hydromorphie et compaction du sol, constitue un autre obstacle, que certains lèvent par un travail mécanique du sol, qui vient malheureusement en contradiction avec le quatrième point : si le labour bénéficie aux bactéries (qui récupèrent très vite et profitent de l'oxygène pour minéraliser), il pénalise les champignons (plus lents à récupérer, et qui humifient donc plus péniblement) ; ceci explique les résultats ci-dessus, concernant les modifications de k_1 et k_2 en fonction de l'intensité du travail du sol. Le cinquième point nous amène à différencier des apports déjà décomposés ou réellement frais ; ainsi, le compost de déchets verts, dont nous avons souligné l'efficacité pour l'humification, est le résultat d'un tel travail de transformation, mais en dehors du potager ! Cela a plusieurs conséquences collatérales, car si le taux d'humification est fort, celui de minéralisation primaire est inversement faible. D'une part, l'apport d'azote est minime : les pertes ont pu être importantes « dans le composteur », ce qui va donc peu contribuer à le rendre disponible aux plantes. D'autre part, les micro-organismes vont avoir peu de choses à se mettre sous la dent, puisque le repas a déjà été servi à d'autres convives : la biomasse microbienne sera donc faible, or elle contribue largement à la structure du sol en le

travaillant (déplacements) et en y excrétant des « colles » diverses. Elle constitue également un élément des chaînes trophiques.

La conclusion de cette longue digression est que *les amendements au potager doivent être de formes multiples*, pour permettre, certes, d'entretenir le stock d'humus, comme c'est l'objet principal de ce chapitre, mais aussi de fournir des *apports pas trop décomposés* pour bénéficier des services de la biomasse microbienne (exemple du compostage en surface du potager, plutôt qu'à l'extérieur dans une pile ou une boîte) et *pas trop ligneux* pour donner assez rapidement, par minéralisation, des nutriments aux plantes, sans passer par des phénomènes de faim d'azote (comme pour un apport massif de BRF et son rapport C/N élevé, mais nous y reviendrons dans le chapitre suivant) ; le tout avec un travail du sol et une irrigation raisonnés.

Travail mécanique du sol

L'effet du travail mécanique est complexe à décrire : ce n'est pas un hasard s'il existe des revues scientifiques entièrement consacrées au sujet[170]. J'approfondirai le thème dans les deux chapitres suivants, pour relater les effets du travail du sol sur sa santé chimique et sa santé biologique, mais nous allons, pour l'heure, nous limiter à sa seule santé physique, et uniquement rapporter les conclusions de deux études.

Le premier article de Lipiec et al. (2006) me semble assez révélateur. Durant 18 ans, ils observent l'effet de quatre traitements mécaniques du sol sur sa structure, et spécialement sa porosité : (1) aucun travail du sol, c'est le fondement de l'agriculture de conservation des sols ; (2) un travail superficiel, que l'on peut comparer, au potager, à un coup de griffe ou de cultivateur sur cinq centimètres ; (3) un travail superficiel annuel, et tous les six ans, un (petit) labour à vingt centimètres, l'équivalent au potager d'un bêchage[171] ; enfin, (4) un labour annuel. Deux précisions très importantes sont données par les auteurs : d'une part, il s'agit d'un travail manuel, donc aucun engin lourd n'est passé sur le sol, et d'autre part, ce travail est mené lorsque

---

[170] *Soil and Tillage Res*earch.

[171] À ne pas confondre avec un « grelinage », la grelinette servant à aérer le sol, sans le retourner.

le sol est dans un état de friabilité ou à la limite de la plasticité[172], ce qui signifie un sol non trempé.

Pour résumer leurs résultats, le sol labouré présente, par rapport au non-travail du sol, une meilleure porosité globale, surtout en termes de macroporosité, ce qui lui permet une meilleure aération et une infiltration de l'eau plus rapide. Ils notent également que leurs valeurs d'infiltration sont prises en fin de saison, ce qui signifie que la structure ne s'est pas dégradée en cours d'année. Les auteurs soulignent que d'autres études n'ont pas toujours conclu en ce sens. Ils notifient, sans le souligner, que le contenu en matière organique baisse avec l'intensité du labour, ce qui semble, en revanche, un résultat assez consistant d'une étude à l'autre.

Mais il existe une autre possibilité de travail du sol, c'est un travail en profondeur, de type sous-solage. Son effet a été exploré en grandes cultures avec des engins mécaniques, et là aussi, les résultats sont assez variables. Or, une technique a été proposée pour les petits jardins, qui s'appelle le double-bêchage (Jeavons, 2001), et qui revient à bêcher sur environ 60 centimètres. Holt et Smith (1998) ont testé la méthode, et concluent : « à cause du travail intensif que requiert le double-bêchage, les résultats de cette étude suggèrent qu'il doit être évité où il y a suffisamment de pluie, une bonne fertilité des sols et pas d'horizons qui restreignent la pénétration des racines[173] ». En effet, en conditions correctes, ils n'ont pas détecté de différence significative sur la production de haricots verts et de betteraves.

> Du côté de chez Stéphane : Il y a une petite chose dans le bêchage que je vais souligner, et même deux fois dans le cas du double-bêchage. Je pars de 1420 kg de masse sèche sur un mètre cube de sol. J'y ajoute un volume de 25 % d'eau, ce qui monte à 1670 kg la masse, dont je ne vais retourner que les 30 premiers centimètres, soit environ 500 kg. Par conséquent, j'en arrive, pour un petit potager de 50 m^2, à soulever 25 tonnes, et je vous fais grâce du nombre de

[172] Voir plus loin pour des précisions sur ces notions.
[173] Comme avec une semelle de labour...

> mouvements que cela occasionne, avec une bêche qui peut peser deux kilos... On ne s'étonnera pas, l'âge venant, que l'on opte pour un travail du sol plus superficiel, ou un potager plus petit.

Quelles conclusions (provisoires) tirer de tout cela ? Primo, *si travail du sol il y a, il doit se mener lorsque le sol n'est pas trop plein d'eau*. On distingue, selon son contenu en eau, quatre états du sol. Il peut y avoir tellement d'eau, que le sol est en suspension dedans, et c'est alors un état liquide boueux. Au-dessous de la limite de liquidité, il devient plastique, on peut, dans ce cas, le rouler comme une sorte de pâte dans sa main, et il est capable de forte déformation. Au-dessous de la limite de plasticité, le sol devient friable, il peut se déformer, mais ne peut plus « coller ». Enfin, au-dessous de la limite de retrait, le sol se travaille très difficilement. On parle de limites d'Atterberg, et il convient de travailler le sol lorsqu'il est friable (plus sec, c'est trop dur) et de ne pas le faire lorsqu'il est plastique (car c'est difficile aussi, mais surtout, il se compacte ensuite beaucoup).

Secundo, *tout passage sur le sol le compacte*, on peut trouver ci-dessous quelques solutions.

Tertio, *le double-bêchage est probablement inutile dans un potager bien géré* (humidité convenable du sol, apport régulier de matières organiques...).

Quarto, *le travail du sol a tendance à l'aérer et la matière organique est plus vite minéralisée*[174], il faut donc absolument *amender un peu plus largement* pour conserver la structure du sol.

Le second article de Bogunovic et al. (2017) décrit une expérience longue de sept ans, sur des sols que je trouve, pour ma part, physiquement peu attirants : argilo-limoneux, peu profonds, avec très peu de matière organique, et en forte pente (9 %). Il existe, là aussi, un labour profond, mais nous nous contenterons d'opposer le simple

[174] Ce qui, certes, menace le stock d'humus, mais aussi, ne l'oublions pas, intensifie les apports potentiels pour les plantes.

labour annuel avec le non-travail du sol. *Il me semble*[175] que la masse volumique du sol et la résistance du sol sont améliorées par le labour, ce qui confirme l'effet du travail du sol sur la porosité du précédent article, MAIS ce n'est pas vrai au-dessous de la semelle de labour, et cela ne dure pas forcément toute l'année avec ce type de sol et ce climat (Croatie avec des pluies violentes). Par conséquent, *après avoir préparé le sol, il ne faut pas attendre, en le laissant nu, avant de semer* : car tout avantage est alors perdu. Il est clair que le non-travail du sol réduit l'érosion, par rapport au labour, bien que, *si celui-ci est fait le long des lignes de contour de la pente*, cela réduise l'érosion de 75 %, par rapport à un labour pratiqué le long de la pente. De même, en semant juste derrière le travail du sol, les cultures le recouvrent rapidement, le protègent de la pluie et le stabilisent par leurs racines, ce qui annule pratiquement l'érosion, même sur ces pentes importantes. La productivité est meilleure avec le labour, sauf en saison sèche où le non-travail du sol présente un éventuel avantage en augmentant la rétention en eau.

Les auteurs insistent sur la longue transition vers le non-travail du sol, qui peut entraîner de très mauvais résultats les premières années, en perdant l'effet de structure artificiel que procure le labour. Ils évoquent parfois une durée de dix ans et plus ! Mais, avant de se lancer, il faut bien comprendre que *l'agriculture de conservation des sols est un système complet*. Il ne s'agit pas que de ne pas labourer, il faut laisser des résidus qui limitent l'effet de battance, et des racines, voire un couvert vivant, qui stabilisent le sol. Les couverts sont parfois éliminés par des herbicides (il faut le savoir aussi...), mais au niveau d'un potager, des possibilités avec des bâches occultantes existent. Il faut être capable de semer ou d'implanter dans les résidus (pas si simple), ou du moins, dans une structure grossière en surface ; or, les légumes n'ont probablement pas la vigueur des céréales et autres

[175] Je prends quelques précautions, car je me tiens (me semble-t-il) plus près des données présentées, qu'ils ne le font ; à la lecture de l'article, vous pourriez trouver mes conclusions un peu différentes des leurs.

légumineuses, plantés très densément, qui sont les cultures de référence de l'agriculture de conservation des sols[176].

> Du côté de chez Stéphane : Il y a des situations où, opter complètement pour le non-travail du sol, alors que celui-ci est extrêmement résistant, risque de fortement limiter la production. *Toutefois, l'ensemble du potager n'a pas à être travaillé de la même façon*. Pour ma part, lorsque j'implante des semis indirects, je me contente d'un lit de semences beaucoup plus grossier que pour des semis directs. Et pour des semis directs, je travaille plus profondément le sol pour des légumes-racines que pour des légumes-feuilles.

Cultures de couverture (engrais vert)

La plante peut également devenir un outil de jardinage. C'est l'objectif des cultures de couverture, aussi appelées cultures de service, qui sont implantées entre les « véritables cultures » destinées à la production. Elles poursuivent divers objectifs comme, par exemple, retenir les nutriments, créer de la biomasse pour séquestrer du carbone, etc. Comme Blanco-Canqui et Ruis (2020), nous nous restreindrons dans ce chapitre à leurs effets sur les propriétés physiques du sol. Sur la base des 98 études rassemblées, ils concluent que les cultures de couverture sont globalement améliorantes. Leur effet est probant sur la résistance du sol, la formation d'agrégats résistant à l'eau, la macroporosité, et par conséquent, l'aération et l'infiltration de l'eau. Leur effet est plus discutable sur la masse volumique du sol et les agrégats secs, c'est-à-dire ceux qui souffrent de l'érosion éolienne (mais il est vrai que les cultures de couverture, par leur présence même, la réduisent). Leur effet est inexistant sur la rétention en eau[177]. Ils notent également un effet tampon sur la température du sol, qui est

---

[176] Pour avoir une meilleure idée de l'implantation de ces techniques de sol vivant dans une version maraîchage professionnel, je conseille la chaîne YouTube « Ver de terre production ». Elle propose d'ailleurs un exposé très instructif destiné aux jardiniers amateurs : (https://www.youtube.com/).

[177] Dans des régions arides, la culture de couverture peut même épuiser le réservoir en eau.

légèrement augmentée en hiver, et réduite en été et automne mais surtout au printemps[178]. Toutes les cultures de couverture n'ont pas le même effet, ainsi les brassicacées à forte racine pivotante (comme des radis daïkon) agissent probablement avec plus de succès sur la compaction. C'est avec la durée – plusieurs années d'utilisation - que l'effet des cultures de couverture sur la qualité physique du sol s'intensifie.

> Du côté de chez Stéphane : Le système des cultures de couverture est plutôt adapté aux grandes cultures (ou aux très vastes jardins), qui risquent d'avoir un sol nu sur une grande partie de la saison. Dans un petit potager comme le mien, le temps manque pour les installer, les cultures se succédant en effet tout au long de la saison. Ce sont donc les cultures principales qui jouent ce rôle, les semis indirects permettant d'ailleurs une installation immédiate d'une petite masse aérienne et racinaire.

Protection du sol

La battance est la détérioration de la partie supérieure de la structure d'un sol, suivie par la formation, en surface, d'une croûte lors de son assèchement. Cette croûte de battance va colmater le sol, et par conséquent, poser des problèmes d'aération, d'infiltration, d'émergence des plantules, de flaquage, de ruissellement et finalement d'érosion. Elle peut être causée par la pluie ou par une compression, due par exemple à des piétinements, cas typique des allées d'un jardin.

La pluie présente un inconvénient supplémentaire, elle a un effet dit *splash* qui peut projeter des agents pathogènes et répandre diverses maladies fongiques. Il peut sembler exagéré qu'une simple pluie puisse produire de tels dégâts, mais il faut se mettre à l'échelle des microagrégats et des microorganismes du sol, pour lesquels une goutte d'eau, surtout par pluie violente, représente une énergie cinétique considérable. Fernández-Raga et al. (2017) rapportent que l'effet *splash* peut soulever une particule de sol à 1.5 mètre de hauteur, ou l'envoyer à cinq mètres de distance avec l'aide du vent !

---

[178] Ce qui, pour le coup, n'est pas un avantage pour démarrer des cultures.

L'indice de battance (Walter et al., 1998) permet de quantifier le risque que le phénomène se produise, selon les caractéristiques physiques d'un sol :

$$IB=(1.5\times LF+0.75\times LG)/(A+10\times SOM) \quad [- 0.2\times(pH-7) \text{ si } pH>7]$$

où interviennent le pourcentage de limons fins (LF), de limons grossiers (LG), d'argiles (A), de matière organique (SOM), ainsi que le potentiel hydrogène (pH, mais uniquement s'il est supérieur à 7). On considère, au-delà de IB=1.5, que le sol peut être sensible à la battance[179].

Si je reprends le cas de mon propre potager[180], nous sommes à $IB=(1.5\times19.1+0.75\times15.2)/(21.7+10\times7.6)-0.2\times(7.9-7)=0.23$. Je suis assez tranquille.

La formule de l'indice IB est claire : les sols sensibles à la battance sont les sols limoneux, avec du sable plutôt que de l'argile, et un faible taux de matière organique. L'alcalinité du sol est un « avantage ».

Comment prévenir ce type de problème ? S'il est difficile de modifier la texture de son sol, un apport régulier de matière organique et de calcaire limitera les dégâts. Sur le court terme, une couverture de sol y pourvoira, qu'elle soit vivante (cultures de service, et même adventices), morte (résidus de culture) ou inerte (bâche plastique ou autre).

Limiter la compaction

Que faire pour limiter la compaction ? Je vais citer Batey (2009), qui cite un autre agronome, qui cite Caton (234-149 avant JC) : « Ne pas travailler un sol mouillé et ne pas conduire un chariot ou un troupeau sur un champ après la pluie. » En effet, la réponse du sol à une compression dépend de la force de celle-ci, de la surface sur laquelle elle est exercée, et du contenu en eau du sol à ce moment. Batey indique qu'il faut, dans la plupart des cas, éviter de travailler sur le sol lorsque celui-ci est au-dessus de la capacité au champ. Les sols mal drainés y sont, par conséquent, particulièrement sujets, et donc les sols argileux sont les plus difficiles ; les sols avec beaucoup de matières

[179] C'est une simplification, la grille qualitative comprenant en fait cinq niveaux.
[180] Voir analyse de sol en annexe.

organiques et de carbonates de calcium, en revanche, résistent mieux. Pour réduire l'effet de la compaction avec les engins mécaniques, de nombreux dispositifs ont été inventés : multiplier les essieux, doubler les pneus, les choisir plus larges, les dégonfler... C'est pourquoi de nombreux jardiniers utilisent des planches pour travailler sur le sol du potager, afin de répartir la portance, mais il est préférable de créer des parcelles de culture avec des allées, pour ne point marcher sur le lit de semences. Enfin, c'est préférable... seulement si le jardin est assez grand, car les allées prennent aussi de la place !

La compaction peut être située juste à la surface du sol, en étant créée par les intempéries (croûte de battance). Elle peut aussi être présente dans l'horizon supérieur du sol. Elle peut, pour finir, être positionnée plus bas, c'est le cas classique des semelles de labour. Un travail du sol résout assez simplement les deux premiers problèmes ; le dernier, où la compaction est profonde, est largement plus délicat, et va demander une énergie considérable, sans toujours être couronné de succès (Batey, 2009). Au niveau du jardinier amateur, c'est la méthode dite du double-bêchage (Jeavons, 2001), déjà évoquée, que je vous propose de visualiser pour la mieux comprendre, et voir en passant l'utilisation d'une planche de portance :

https://www.youtube.com/doubledigging

Irrigation

Pour suivre la condition de son sol, le cadre conceptuel de la Figure 70 indique qu'il faut avoir l'œil, à la fois, sur son aération, sa résistance et son contenu en eau. De plus, ce dernier agissant sur les deux autres facteurs, il peut être mis au centre d'une stratégie d'irrigation plus complète que celle envisagée dans le chapitre dédié à l'eau. Il s'agit d'être, non seulement dans les limites du réservoir utilisable, mais simultanément dans deux autres zones qui vont autoriser une production satisfaisante. da Silva et al. (1994) parlent de « gamme d'eau moins limitante » (LLWR : *least limiting water range*), au sens où l'humidité du sol va le moins possible limiter la croissance de la culture. Les auteurs préfèrent cette appellation à la dénomination originelle de Letey (1985) *non limiting water range*, car ils soulignent qu'il n'y a pas véritablement de valeurs de rupture dans l'aération, le contenu en eau ou la résistance du sol, mais plutôt une continuité de leurs effets sur la production.

Le problème est de quantifier cette gamme d'eau pour un sol donné. En utilisant les fonctions de pédotransfert (équations 5.4, 5.6 et 5.9), on peut calculer, à partir de la texture (%argile), de la matière organique (%C) et de la masse volumique du sol : premièrement θ_{FC}, le contenu en eau à la capacité au champ (-0.01 MPa[181]), et θ_{PWP}, le contenu en eau au point de flétrissement (-1.5 MPa). Deuxièmement, en se basant sur la masse volumique sèche, on calcule également θ_{Sat}, le contenu en eau à saturation, et on se donne une limite de 10 % pour permettre à la plante de respirer (porosité remplie d'air). Troisièmement, on peut définir $\theta_{SR(2MPa)}$, le contenu en eau correspondant à une résistance limite de 2 Mpa, qui handicaperait la pénétration des racines.

LLWR est la gamme de contenu d'eau à l'intersection des quatre contraintes suivantes : $\theta<\theta_{FC}$, $\theta>\theta_{PWP}$, $\theta<\theta_{Sat}-0.10$ et $\theta>\theta_{SR(2MPa)}$; contraintes qui sont représentées dans la Figure 71, en fonction de différentes masses volumiques sèches du sol, c'est-à-dire de niveaux de compaction, en considérant que la texture (ici Argiles=30 %) et la matière organique (ici C=1.5 %) sont données.

---

[181] Les auteurs utilisent cette valeur plutôt que -0.033 MPa.

Bien entendu, il ne s'agit pas, dans notre potager, d'appliquer une technique aussi complexe[182], mais de garder en tête que notre irrigation doit non seulement couvrir les besoins en eau des cultures, mais aussi permettre à leurs racines de respirer (donc ne pas noyer nos légumes), et les aider à pénétrer le sol (en l'assouplissant par l'humidité). Le graphique montre, la compaction augmentant, que la gamme d'eau possible se réduit fortement, et que rester dans une gamme raisonnable de compaction, par un travail du sol ou par des amendements, permet de s'offrir une gestion plus souple de l'irrigation.

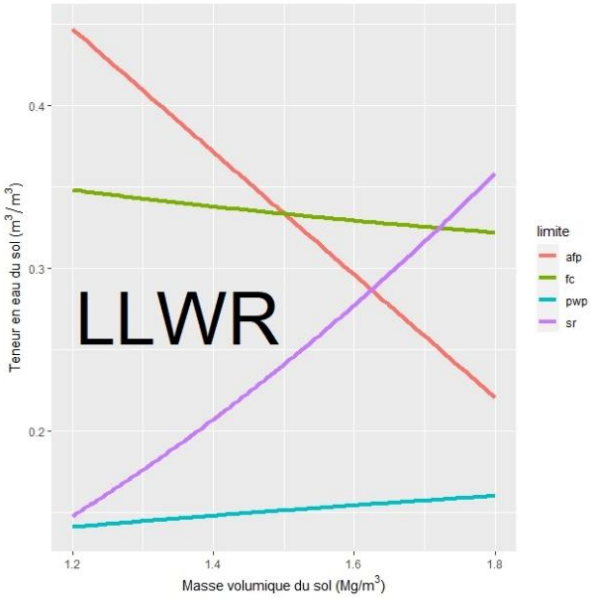


Figure 71 : Gamme d'eau moins limitante pour un sol avec SOC=1.5 % et argile=20 %.

Substrat de culture pour semis indirects

Un « sol » très particulier est le substrat de culture, qui est employé pour réaliser des semis indirects. Il peut comporter de la tourbe, de la sphaigne, du sable, de la vermiculite, du compost de déchets verts, etc. Autant de produits, autant de mélanges.

---

[182] Sans cacher non plus le fait qu'il y a une sensibilité de LLWR aux valeurs-limites choisies (-0.01 MPa, -1.5 MPa, 10 % et 2 MPa) et que la relation de la production à LLMWR reste à démontrer pour le cas de nos légumes...

En général, la masse volumique sèche de ces substrats est très faible, Argo (1998) cite des valeurs de l'ordre de ρ_D=0.125 Mg/m^3, ce qui amène à une porosité totale (par l'équation 5.4) de l'ordre de n=95 %. Sur plusieurs produits commercialisés, des valeurs entre 85 % et 95 % ont été estimées.

Il faut, de toute évidence, partager cette porosité totale entre air et eau, et des répartitions comme 20 % d'air, 65 % d'eau et 15 % de solide s'avèrent usuelles. Ceci dit, cela dépend ensuite de la hauteur du contenant, car plus il est haut et plus la part de l'air est importante : elle est donc particulièrement réduite pour les petits contenants hauts de cinq centimètres des plaques alvéolées, où l'eau peut occuper pratiquement tout l'espace libre.

Un autre élément influençant la porosité est la compaction : lorsque l'on remplit les contenants de substrat, il faut prendre garde à ne pas tasser, et simplement « secouer » un peu le tout, pour que le contenu trouve sa place. Le premier arrosage par aspersion a souvent un gros effet de tassement, il est par conséquent nécessaire d'employer une pomme d'arrosage à trous fins.

Pour augmenter l'aération, il y a trois solutions : ajouter des éléments grossiers de type sable, utiliser des contenants plus hauts (mais on dépense dès lors plus de substrat) et ne pas arroser au-delà de la capacité au champ. Sur ce dernier point, la méthode d'arrosage a aussi un effet : la subirrigation a tendance à être moins envahissante que l'aspersion. Puisque l'on maîtrise bien l'irrigation avec des semis indirects, c'est souvent l'aération qui est le facteur limitant (Argo, 1998). Il ne faut donc pas noyer la plante tous les jours, au risque de la saturer.

Dernier point : il y a bien entendu évapotranspiration, et il faut, surtout dans des châssis, recharger très régulièrement pour retrouver le poids du contenant tel qu'il était à l'issue du premier arrosage. Couvrir d'un couvercle, ou d'un disque percé si la plantule a déjà émergé, permet de réduire de 25 à 50 % l'irrigation.

5.8 Changement climatique et santé physique du sol

Le concerto en sol rappelle que le problème du jardinier est de s'assurer que les niveaux d'air, d'eau et de résistance du sol vont permettre une production satisfaisante. Ceci recoupe largement les indicateurs proposés par Allen et al. (2011) pour suivre les effets du changement climatique sur l'état physique du sol : stabilité des agrégats, porosité, masse volumique sèche du sol, infiltration de l'eau, réservoir utilisable et couverture du sol. Le climat a, comme nous l'avons vu, une influence sur la condition du sol : les prévisions de hausse des températures et de modification du cycle de l'eau vont nécessiter, à court terme, des réglages ponctuels à l'aide d'ombrages, d'irrigations, de paillages, etc.

Toutefois, sur le long terme, un élément semble déterminant : c'est la teneur en matière organique. Elle intervient dans de multiples fonctions du sol, et joue positivement sur la structure, l'aération, le réservoir utilisable et la résistance du sol (et aussi sur le cycle des nutriments, la biomasse microbienne, sa diversité et son activité comme nous le verrons dans les prochains chapitres). La présence de la matière organique peut donc contribuer à protéger le sol contre le changement climatique.

Cependant, le changement climatique a aussi un effet sur la teneur en matière organique : d'un côté, l'élévation du dioxyde de carbone va augmenter la production primaire, donc potentiellement les résidus pouvant retourner au sol, mais de l'autre, l'élévation des températures accélère la décomposition de la matière organique. Le débat scientifique n'est pas clos, mais il semblerait qu'on puisse s'attendre au final à une influence modeste, voire même peut-être positive du changement climatique sur la matière organique. En revanche, les disparités régionales risquent d'être très fortes, car le bilan dépend, non seulement de la température et des précipitations, mais aussi du type de sol et de son management.

Smith (2012) dit qu'il vaut mieux arrêter de se poser la question de ce bilan global, et plutôt s'intéresser aux facteurs (édaphiques par exemple) qui entrent en jeu, et aux modes de management des sols qui

permettront d'y conserver la matière organique. D'où l'importance de la gestion durable de la matière organique, comme nouveau paramètre à prendre en compte. Or, pour l'heure, nous sommes globalement sur une dynamique qui a entrainé une érosion des sols et une baisse de leur teneur en matière organique...

Pour certains, l'ambition est, en fait, plus grande que de simplement maintenir la teneur en matière organique. Il s'avère en effet que le premier mètre de sol contient deux fois plus de carbone que l'atmosphère, et trois fois plus que la végétation. On a donc imaginé utiliser le sol et la végétation comme des puits de carbone, et ainsi « résoudre » le problème du changement climatique[183]. Toutefois, il faut savoir que ce type de stockage a une limite (Smith, 2012), on ne peut augmenter indéfiniment le taux de matière organique ; l'effet est surtout important au début des apports. C'est, de plus, un effet réversible, dès que l'on revient à des pratiques qui ne sont pas durables. Certaines gestions ne font d'ailleurs que déplacer le problème, et n'ont pas d'effet net : si je prends une part de la matière organique dans mon jardin, en tondant la pelouse, pour la concentrer dans mon potager : cela augmente d'un côté, mais baisse de l'autre. C'est un peu comme avec les biocarburants, qui finissent en fumée, et par conséquent sont un stockage très provisoire (sachant qu'ils semblent surtout s'ajouter pour l'instant à tous les autres carburants).

Le problème de fond a été résumé de la façon suivante : une masse considérable de carbone était emprisonnée dans la géosphère, et a été, et continue d'être, relâchée dans l'atmosphère, par la consommation des énergies fossiles. Nous imaginons la stocker dans la biosphère, mais le problème est, simplement, qu'on en relâche trop par rapport à ce qu'on peut stocker, et que la solution réside d'abord dans la réduction des émissions (cité, à peu de choses près, dans Smith, 2018). On peut utiliser la séquestration dans les sols et la végétation, pour aider à atteindre des cibles à court et moyen terme de réduction du CO_2, et on ne va pas s'en priver, vu tous les bénéfices que cela apporte pour protéger les sols contre le changement climatique... mais cela n'est pas

[183] Ce qui est, de toute façon, impossible à court terme vu l'inertie du système...

ce qui semble être la véritable panacée, qui porte un nom énervant tout le monde : la décroissance...

5.9 Références

Allen, D. E., Singh, B. P., & Dalal, R. C. (2011). Soil health indicators under climate change: a review of current knowledge. In B.P. Singh et al. (Eds.), *Soil health and climate change* (p. 25-45). Springer-Verlag Berlin Heidelberg

Andriulo A., Mary B., & Guerif J. (1999). Modelling soil carbon dynamics with various cropping sequences on the rolling pampas. *Agronomie, 19*(5), 365-377.

Argo, W. R. (1998). Root medium physical properties. *HortTechnology, 8*(4), 481-485

Batey, T. (2009). Soil compaction and soil management–a review. *Soil Use and Management, 25*(4), 335-345.

Benjamin, J. G., Nielsen, D. C., & Vigil, M. F. (2003). Quantifying effects of soil conditions on plant growth and crop production. *Geoderma, 116*(1-2), 137-148.

Blanco-Canqui, H., & Ruis, S. J. (2020). Cover crop impacts on soil physical properties: A review. *Soil Science Society of America Journal, 84*(5), 1527-1576.

Bogunovic, I., Pereira, P., Kisic, I., Sajko, K., & Sraka, M. (2018). Tillage management impacts on soil compaction, erosion and crop yield in Stagnosols (Croatia). *Catena, 160*, 376-384.

Calvet, R. (2013). *Le sol*. Éditions France Agricole, Paris.

Calvet, R., Chenu, C., & Houot, S. (2015). *Les matières organiques des sols: Rôles agronomiques et environnementaux*. Éditions France Agricole, Paris.

Chenu, C., Le Bissonnais, Y., & Arrouays, D. (2000). Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability. *Soil Science Society of America Journal, 64*(4), 1479-1486.

COMIFER (2017). *Guide de la fertilisation raisonnée* (2ème édition, pp. 608). Éditions France Agricole.

da Silva, A. P., Kay, B. D., & Perfect, E. (1994). Characterization of the least limiting water range of soils. *Soil Science Society of America Journal*, *58*(6), 1775-1781.

da Silva, A. P., & Kay, B. D. (1997). Estimating the least limiting water range of soils from properties and management. *Soil Science Society of America Journal, 61*(3), 877-883.

da Silva, A. P. D., Imhoff, S., & Kay, B. (2004). Plant response to mechanical resistance and air-filled porosity of soils under conventional and no-tillage system. *Scientia Agricola*, *61*, 451-456.

da Silva, A. P., Kay, B. D., & Perfect, E. (1997). Management versus inherent soil properties effects on bulk density and relative compaction. *Soil and Tillage Research, 44*, 81-93.

Douguet, J. M., & O'Connor, M. (2003). Maintaining the integrity of the French terroir: a study of critical natural capital in its cultural context. *Ecological Economics, 44*(2-3), 233-254.

Fernández-Raga, M., Palencia, C., Keesstra, S., Jordán, A., Fraile, R., Angulo-Martínez, M., & Cerdà, A. (2017). Splash erosion: A review with unanswered questions. *Earth-Science Reviews, 171*, 463-477.

Girard, M. C., Schvartz, C., & Jabiol, B. (2011). *Etude des sols: description, cartographie, utilisation*. Dunod.

Gobat, J. M., Aragno, M., & Matthey, W. (2010). *Le sol vivant: bases de pédologie, biologie des sols*. PPUR Presses polytechniques.

Grable, A. R., & Siemer, E. G. (1968). Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potentials, and elongation of corn roots. *Soil Science Society of America Journal, 32*(2), 180-186.

Håkansson, I. (1990). A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. *Soil and Tillage Research, 16*(1-2), 105-120.

Hénin S., & Dupuis, M. (1945). Essai de bilan de la matière organique des sols. *Annales Agronomiques, 15*, 161-172.

Holt, B. F., & Smith, I. K. (1998). Small-scale, intensive cultivation methods: The effects of deep hand tillage on the productivity of bush beans and red beets. *American Journal of Alternative Agriculture, 13*(1), 28-39.

Jackson, R. B., Pockman, W. T., Hoffmann, W. A., Bleby, T. M., & Armas, C. (2007). Structure and function of root systems. In F.

Pugnaure and F. Valladares (Eds.), *Functional Plant Ecology* (p. 151-174). CRC Press.

Jeavons, J. C. (2001). Biointensive sustainable mini-farming: II. Perspective, principles, techniques and history. *Journal of Sustainable Agriculture, 19*(2), 65-76.

Johannes, A., Matter, A., Schulin, R., Weisskopf, P., Baveye, P. C., & Boivin, P. (2017). Optimal organic carbon values for soil structure quality of arable soils. Does clay content matter?. *Geoderma, 302*, 14-21.

Kay, B. D., Silva, A. D., & Baldock, J. A. (1997). Sensitivity of soil structure to changes in organic carbon content: predictions using pedotransfer functions. *Canadian Journal of Soil Science, 77*(4), 655-667.

Leão, T. P. (2023). Can the non/least-limiting water range concept be rehabilitated?. hal-03983271

Letey, J. (1985). Relationship between soil physical properties and crop production. Adv. *Soil Science, 1*, 277-294.

Lipiec, J., Kuś, J., Słowińska-Jurkiewicz, A., & Nosalewicz, A. (2006). Soil porosity and water infiltration as influenced by tillage methods. *Soil and Tillage Research, 89*(2), 210-220.

Mariani, L., & Ferrante, A. (2017). Agronomic management for enhancing plant tolerance to abiotic stresses - drought, salinity, hypoxia, and lodging. *Horticulturae, 3*(4), 52.

Mary, B., & Guérif, J. (1994). Intérêts et limites des modèles de prévision de l'évolution des matières organiques et de l'azote dans le sol. *Cahiers Agricultures, 3*(4), 247-257.

Moeys, J. (2024). soiltexture: Functions for Soil Texture Plot, Classification and Transformation. R package version 1.5.3.

Murphy, B. W. (2015). Impact of soil organic matter on soil properties—a review with emphasis on Australian soils. *Soil Research, 53*(6), 605-635.)

Orzolek, M. D. (1991). Establishment of vegetables in the field. *HortTechnology, 1*(1), 78-81.

Passioura, J. B. (2002). Soil conditions and plant growth. *Plant, Cell & Environment, 25*(2), 311-318.

Pribyl, D. W. (2010). A critical review of the conventional SOC to SOM conversion factor. *Geoderma, 156*(3-4), 75-83.

Richer de Forges, A. R., Feller, C., Jamagne, M., & Arrouays, D. (2008). Perdus dans le triangle des textures. *Etudes et Gestion des Sols, 15*(2), 97-111.

Roussel, O., Bourmeau, E., & Walter, C. (2001). Evaluation du déficit en matière organique des sols français et des besoins potentiels en amendements organiques. *Etude et Gestion des Sols, 8*(1), 65-81.

Ruehlmann, J., & Körschens, M. (2009). Calculating the effect of soil organic matter concentration on soil bulk density. *Soil Science Society of America Journal, 73*(3), 876-885.

Smith, P. (2012). Soils and climate change. Current Opinion in *Environmental Sustainability, 4*(5), 539-544.

Sokol, N. W., Kuebbing, S. E., Karlsen-Ayala, E., & Bradford, M. A. (2019). Evidence for the primacy of living root inputs, not root or shoot litter, in forming soil organic carbon. *New Phytologist, 221*(1), 233-246.

Taylor, H. M., & Gardner, H. R. (1963). Penetration of cotton seedlingg taproots as influenced by bulk densoty, moisture content, and strength of soil. *Soil Science 96*(3), 153-156.

Taylor, H. M., Roberson, G. M., & Parker Jr, J. J. (1966). Soil strength-root penetration relations for medium-to coarse-textured soil materials. *Soil Science, 102*(1), 18-22.

Tranter, G., Minasny, B., McBratney, A. B., Murphy, B., McKenzie, N. J., Grundy, M., & Brough, D. (2007). Building and testing conceptual and empirical models for predicting soil bulk density. *Soil Use and Management*, *23*(4), 437-443.

Walter, C., Schvartz, C., Claudot, B., Aurousseau, P., & Bouedo, T. (1998). *Synthèse nationale des analyses de terre : période 1990-1994*. Rapport de recherche, Association Française pour l'Etude des Sols. 68 p. + 25 cartes.

5.10 Ctrl-R

```
##################################
########## MODELE DE HENIN-DUPUIS
##################################

# Calcul du coefficient de minéralisation secondaire K2
k2<-function(TMA,Arg,CaCO3){
```

```
0.03*(1+0.2*(TMA-10))/((1+0.005*Arg)*(1+0.0015*CaCO3))
}

k2(11.1,199,7)

HD<-function(t,k1,k2,C0,x){
k1*x*(1-exp(-k2*t))/k2+C0*exp(-k2*t)
}


### évolution du modèle avec un apport identique de foin chaque
année
t<-0:200
hd<- HD(t,k1=0.15,k2=0.02,C0=12.78,x=1.5*0.85)
dataset<-data.frame(t,hd)

require(ggplot2)
ggplot(data=dataset)+aes(x=t,y=hd)+
geom_line(lwd=1.5)+
theme_gray()+
xlab("Années depuis le début de l'amendement en foin")+
ylab(expression(paste("Stock d'humus (",kg/m^2,")")))


#####################################################
########## MASSE VOLUMIQUE DU SOL SELON MO ET TEXTURE
#####################################################
# texture définie par le sable
# modèle dans Tranter at al. (2007)

AdaptedAdamsStewart<-function(OM,sand,depth=1){
# OM en %
# sand en %
# depth en cm
# BD en g.cm-3

BDom<-0.224
BDm<-1.35+0.0045*sand-6*10^(-5)*(44.7-
sand)^2+0.060*log(depth)
print(BDm)
BD<-100/((OM/BDom)+((100-OM)/BDm))
}

Sable<-30
OM<-rep(seq(1,5,l=100),4)
BD<-AdaptedAdamsStewart(OM,Sable)
Dataset<-data.frame(OM,BD)

require(ggplot2)
ggplot(data=Dataset)+aes(x=OM,y=BD)+
geom_line(lwd=1.5)+
theme_gray()+
xlab("Matière organique (%)")+
ylab(expression(paste("Masse volumique du sol (Mg/",m^3,")")))
```

```
##############################################################
########## MASSES VOLUMIQUES DU SOL, DE REFERENCE ET RELATIVE
##############################################################
# selon matière organique (carbone) et texture (argiles)
# da Silva et al. (1997)

BulkDensity<-function(OC,Cl){
1.5726-0.125*OC-0.0032*Cl+0.0021*OC*Cl
}

RefBulkDensity<-function(OC,Cl){
1.810-0.129*OC-0.004*Cl+00.002*OC*Cl
}

RelBulkDensity<-function(OC,Cl){
BulkDensity(OC,Cl)/RefBulkDensity(OC,Cl)
}

OC<-2
Cl<-20
BulkDensity(OC,Cl)
RefBulkDensity(OC,Cl)
RelBulkDensity(OC,Cl)


#####################
########## EAU ET AFP
#####################
# Eau et AFP da Silva et Kay (1997)
# On commence pour matière organique et texture donnée
# Simplement effet de la compaction
# par la masse volumique du sol
# Trois niveaux de succès (satiration=0, capacité au champ=33,
# point de flétrissement permanent=1500)

WaterRelease<-function(Phi,BD,OC,Cl){
lntheta<-                                                -
4.1518+0.6851*log(Cl)+0.4025*log(OC)+0.2731*log(BD)+
(-
0.5456+0.1127*log(Cl)+0.0223*log(OC)+0.1013*log(BD))*log(Phi)
exp(lntheta)
}

TP<-function(BD){
(2.65-BD)/2.65
}

AFP<-function(Phi,BD,OC,Cl){
TP(BD)-WaterRelease(Phi,BD,OC,Cl)
}

OC<-1.25
Cl<-30
```

```
BD<-seq(1.2,1.6,l=100)
theta33<-WaterRelease(33/1000,BD,OC,Cl)
theta1500<-WaterRelease(1500/1000,BD,OC,Cl)
theta0<-TP(BD)

Bd<-rep(seq(1.2,1.6,l=100),3)
Theta<-c(theta0,theta33,theta1500)
Potentiel<-
factor(rep(c("Sat","FC","PWP"),rep(100,3)),level=c("Sat","FC"
,"PWP"))
Dataset<-data.frame(Bd,Theta,Potentiel)

require(ggplot2)
ggplot(data=Dataset)+aes(x=Bd,y=Theta,group=Potentiel,
colour=Potentiel)+
geom_line(lwd=1.5)+
theme_gray()+
xlab(expression(paste("Masse      volumique      du      sol
(Mg/",m^3,")")))+
ylab(expression(paste("Teneur en eau (",m^3/m^3,")")))+
ylim(0,0.6)

#####################
########## EAU ET AFP
#####################
# effet de la MO, seule la texture (argiles) est donnée

BulkDensity<-function(OC,Cl){
1.5726-0.125*OC-0.0032*Cl+0.0021*OC*Cl
}

Cl<-30
OC<-seq(0.75,4,l=100)
BD<-BulkDensity(OC,Cl)

theta33<-WaterRelease(33/1000,BD,OC,Cl)
theta1500<-WaterRelease(1500/1000,BD,OC,Cl)
theta0<-TP(BD)

Oc<-rep(OC,3)
Theta<-c(theta0,theta33,theta1500)
Potentiel<-
factor(rep(c("Sat","FC","PWP"),rep(100,3)),level=c("Sat","FC"
,"PWP"))
Dataset<-data.frame(Oc,Theta,Potentiel)

require(ggplot2)
ggplot(data=Dataset)+aes(x=Oc,y=Theta,group=Potentiel,
colour=Potentiel)+
geom_line(lwd=1.5)+
theme_gray()+
xlab("Matière organique du sol (%C)")+
ylab(expression(paste("Teneur en eau (",m^3/m^3,")")))+
ylim(0,0.55)
```

```
###########################
########## RESISTANC DU SOL
###########################
# da Silva et Kay (1997)
# On commence pour matière organique et texture donnée
# Simplement effet de la compaction
# par la masse volumique du sol
# Quatre niveaux de teneur en eau

SoilResistance2<-function(theta,BD,OC,Cl){
# SR MPa
#theta en m3/m3 !!!
# BD en Mg.m-3
# OC en % attention c'est du carbone pas OM !!!
# Cl en %
lnSR<- -3.6733-0.1447*Cl+0.7653*OC+
(-0.4805-0.1239*Cl+0.208*OC)*log(theta)+
(3.8521+0.0963*Cl)*log(BD)
exp(lnSR)}

OC<-1.25
Cl<-20
BD<-rep(seq(1.2,1.6,l=100),4)
theta<-rep(c(0.15,0.20,0.25,0.30),rep(100,4))
SR<-SoilResistance2(theta,BD,OC,Cl)
Dataset<-data.frame(SR,theta,BD)

require(ggplot2)
ggplot(data=Dataset)+aes(x=BD,y=SR,group=theta,
colour=theta)+
geom_line(lwd=1.5)+
theme_gray()+
ylab("Résistance du sol (MPa)")+
xlab(expression(paste("Masse volumique du sol (Mg/",m^3,")")))


###########################
########## RESISTANC DU SOL
###########################
# Effet de la MO sur la résistance
# la texture (argiles) est donnée

BulkDensity<-function(OC,Cl){
1.5726-0.125*OC-0.0032*Cl+0.0021*OC*Cl
}

Cl<-20
Phi<-rep(c(33/1000,1500/1000),rep(100,2))
OC<-rep(seq(0.75,4,l=100),2)
BD<-BulkDensity(OC,Cl)
Theta<-WaterRelease(Phi,BD,OC,Cl)
SR<-SoilResistance2(Theta,BD,OC,Cl)
```

```
Potentiel<-
factor(rep(c("FC","PWP"),rep(100,2)),level=c("FC","PWP"))
Dataset<-data.frame(SR,Potentiel,OC)

require(ggplot2)
ggplot(data=Dataset)+aes(x=OC,y=SR,group=Potentiel,
colour=Potentiel)+
geom_line(lwd=1.5)+
theme_gray()+
ylab("Résistance du sol (MPa)")+
xlab("Matière organique du sol (%C)")+
ylim(0,10)


#####################################
########## LEAST LIMITING WATER RANGE
#####################################

SoilResistance3<-function(SR,BD,OC,Cl){
# SR MPa
#theta en m3/m3 !!!
# BD en Mg.m-3
# OC en % attention c'est du carbone pas OM !!!
# Cl en %
lntheta<- (-log(SR)-3.6733-0.1447*Cl+0.7653*OC+
(3.8521+0.0963*Cl)*log(BD))/(-(-0.4805-0.1239*Cl+0.208*OC))
exp(lntheta)}


OC<-1.5
Cl<-20
BD<-seq(1.2,1.8,l=100)

sr<-SoilResistance3(SR=2,BD,OC,Cl)
afp<-TP(BD)-0.10
fc<-WaterRelease(Phi=10/1000,BD,OC,Cl)
pwp<-WaterRelease(Phi=1500/1000,BD,OC,Cl)

theta<-c(afp,fc,pwp,sr)
bd<-rep(BD,4)
limite<-rep(c("afp","fc","pwp","sr"),rep(100,4))
dataset<-data.frame(theta,bd,limite)

require(ggplot2)
ggplot(data=dataset)+aes(x=bd,y=theta,group=limite,
colour=limite)+
geom_line(lwd=1.5)+
theme_gray()+
ylab(expression(paste("Teneur en eau du sol (",m^3/m^3,")")))+
xlab(expression(paste("Masse volumique du sol (Mg/",m^3,")")))
```

6 Santé chimique du sol (fertilisation)

6.1 « Alles ist chemie »

La période moderne de l'agriculture commence au début du dix-neuvième siècle. En premier lieu, le processus de la photosynthèse est grossièrement compris (Stirbet et al., 2020) grâce, successivement, à Jan Ingen-Housz (1773, rôle de la lumière), Joseph Priestley (1776, production de O_2), Jean Senebier (1782, rôle du CO_2), Nicolas Théodore de Saussure (1804, rôle de H_2O) et, pour finir, Julius von Sachs (1862, production de sucres). En second lieu, la théorie de l'humus est abandonnée, au profit de la théorie de la nutrition minérale, et la loi du minimum est proposée ; ces avancées étant l'œuvre de Carl Sprengel (van der Ploeg et al, 1999). C'est cependant Justus von Liebig, auteur de la citation qui ouvre ce chapitre, qui restera crédité de ces avancées, de la naissance de la « chimie agricole », et de l'identification du rôle central que jouent les éléments NPK (azote, phosphore et potassium). En France, Jean-Baptiste Boussaingault impulse le changement et est aussi considéré comme l'un des pères de la chimie agricole. En Angleterre, John Lawes et Joseph Gilbert créent la station agricole de Rothamsted (dont nous parlerons longuement, pour rapporter les expérimentations sur la fertilisation des cultures s'y déroulant, sans discontinuer depuis 1852 jusqu'à nos jours).

En ce qui concerne la fertilisation azotée, l'introduction de légumineuses dans la *rotation de Norfolk*, avait déjà amené de sérieux progrès de productivité vers 1700 (Sinclair & Rufty, 2012). Mais la compréhension de la nutrition minérale a conduit à séparer la production de l'azote de son utilisation, et à l'importation massive de salpêtre du Chili (nitrate de sodium transformé industriellement) et de guano du Pérou (engrais organique). Le procédé Haber-Bosch, mis au point au début du vingtième siècle, a permis de s'affranchir de ces sources naturelles et de créer les engrais de synthèse. C'est à partir de la seconde moitié du vingtième siècle et de la révolution verte, que de

nouvelles variétés vont réclamer des quantités plus importantes d'azote, et permettre des niveaux de productivité inconnus jusqu'alors, ce qui a nourri (une grande partie de) l'humanité, pourtant en croissance démographique exponentielle.

Dans les années 1970, sont clairement apparus les problèmes environnementaux que les applications de la chimie agricole ont, en même temps, générés. Toutefois, il me semble que c'est seulement en comprenant bien cette « chimie agricole[184] », que des alternatives viables pourront être proposées, et pas simplement en priant la déesse de la fertilité.

Si nous en venons à nous questionner sur la fertilisation au potager, nous sommes pris entre deux pôles. Au nord, il y avait les corons, et on y trouve maintenant les livres de jardinage destinés au grand public, qui évitent, pour la plupart, consciencieusement, d'aborder le sujet ; et pour une raison assez simple : *bien fertiliser est complexe*. Au sud, le temps dure longtemps, et il y a les professionnels, et plus précisément la fertilisation des grandes cultures, qui est un enjeu majeur de productivité et environnemental, mais est peu adapté à notre situation potagère, faite de multiples cultures, en parallèle et en succession. Je ne connais guère que Jean-Martin Fortier qui donne des indications précises sur le sujet dans le cadre du maraîchage[185].

Reste que la fertilisation des cultures de légumes est de plus en plus étudiée, car il a été démontré qu'elle est, le plus souvent, excessive. Les légumes sont en effet plus demandeurs, du fait de leur court cycle de croissance et de leur système racinaire, relativement faible[186]. Les légumes étant mieux valorisés, une fertilisation importante est aussi une « assurance » contre la perte de production. Cela finit par générer, certes à plus petite échelle, les mêmes problèmes environnementaux qu'en grandes cultures, mais également des risques pour les consommateurs avec, en particulier, une concentration élevée de nitrates dans les légumes-feuilles.

---

[184] Et aussi la « biologie agricole », « l'écologie agricole », la « physique agricole », et sans doute, quelques « sciences sociales et humaines agricoles ».

[185] Je les résume dans le chapitre consacré à la santé biologique du sol.

[186] Par rapport à des céréales.

Pourquoi faire compliqué quand on peut faire simple ? Pour la raison habituelle : ne pas se mentir[187] ! Je vais aborder le sujet de la fertilisation dans toute sa richesse et sa difficulté, en réalisant même des calculs concernant l'azote (qui est l'élément déterminant : Lawlor et al., 2001) ; calculs qu'il ne faudra pas prendre pour argent comptant, mais comme une démarche d'apprentissage des points clés de la fertilisation. Ensuite, ce sera à chacun d'en tirer des conclusions.

6.2 Nutrition des plantes

6.2.1 Éléments indispensables

Afin de savoir ce que demandent les plantes, il est possible de partir de leur composition[188]. Elles contiennent, tout d'abord, 80 à 90 % d'eau, une information que nous mettons pour l'instant de côté, à gauche. Ensuite, leur matière sèche comprend trois éléments minéraux majeurs : du carbone (45 %), de l'oxygène (40 %) et de l'hydrogène (5 %). C'est lors de la photosynthèse que ces éléments sont intégrés : le premier provenant de l'air et les deux autres de l'eau ; nous mettons aussi cette dernière information de côté, à droite.

Puis, on retrouve une série de sept éléments, assez présents[189], appelés macronutriments : azote, phosphore, potassium, soufre, calcium, magnésium, et plus inattendu, le silicium[190]. Neuf éléments supplémentaires, dits micronutriments, sont indispensables ou complémentaires, et sont détaillés dans le Tableau 10. D'autres éléments, non cités ici, sont sans doute intéressants, peut-être pas directement pour les plantes, mais pour divers organismes qui contribuent à leur croissance.

---

[187] « An in-depth insight into all processes that govern the N cycling in soil is needed to optimize fertilization and maximize N use efficiency (Tei et al., 2020) »

[188] Attention, ce ne sont que des valeurs moyennes, il y a une grande variabilité de composition d'une espèce à l'autre, d'un stade de développement à l'autre, d'un organe à l'autre, mais aussi d'un contexte pédoclimatique à l'autre.

[189] Comme la description détaillée du processus de photosynthèse pouvait nous le laisser deviner...

[190] Qui n'est pas présent dans toutes les plantes, mais dans les graminées et dans les prêles.

Tableau 10 : Éléments minéraux composant les plantes, formes absorbées par les plantes, % de la masse totale, et rapport entre la concentration dans les plantes et la concentration dans les sols (COMIFER, 2017).

Éléments	Forme absorbée	% plante	Plante/Sol
Majeurs			
Carbone	CO_2	45	—
Oxygène	H_2O	40	—
Hydrogène	H_2O	5	—
Macro-nutriments			
Azote	NO_3^- ; NH_4^+	1,5	10,0
Potassium	K^+	1,0	10,0
Phosphore	$H_2PO_4^-$; HPO_4^{2-}	,2	5,0
Calcium	Ca^{2+}	,5	,4
Magnésium	Mg^{2+}	,2	1,0
Soufre	$S\text{-}SO_4^{2-}$	,1	4,0
Micro-nutriments			
Chlore	Cl^-	<0,01	,3
Bore	B^{3+}	<0,01	,7
Fer	Fe^{2+}	<0,01	,0
Manganèse	Mn^{2+}	<0,01	,1
Zinc	Zn^{2+}	<0,01	,3
Sodium	Na^+	<0,01	,5
Cuivre	$Cu2+$	<0,01	,5
Nickel	Ni^{2+}	<0,01	,0
Molybdène	MoO_2^{4-}	<0,01	,1

6.2.2 Éléments limitants

Si on met de côté les trois éléments majeurs, tous les autres proviennent du sol et parviennent en étant dissous dans la solution du sol à la plante. Cette troisième information sur le rôle fondamental de l'eau dans la nutrition de la plante nous permet de souligner que l'on ne peut, en réalité, séparer le problème de la fertilisation de celui de l'irrigation : *la plante a besoin de manger et de boire*.

Quelle est la concentration, dans un sol « naturel », des éléments minéraux que nous avons évoqués ? Cette question est importante, car un minéral peut être demandé en forte quantité par la plante, mais le sol en être abondamment pourvu : dans ce cas, il ne pose pas de problème. À l'inverse, il peut être réclamé en faible quantité par la plante, mais s'avérer fort rare dans le sol : il va alors constituer ce qu'on appelle un facteur limitant, et c'est de lui dont il faudra *d'abord* se préoccuper.

Le Tableau 10 indique le rapport entre la concentration de l'élément dans la plante et celle dans le sol. Il apparaît évident que l'azote, le potassium et le phosphore devront être au centre de notre attention, et ceci explique qu'une stratégie de fertilisation est *d'abord* une stratégie NPK.

6.2.3 Formes absorbées

Le Tableau 10 précise sous quelle forme ionique un élément est absorbé par les plantes. Ainsi, l'azote est consommé sous forme de nitrate (NO_3^-) ou d'ammonium (NH_4^+), le phosphore sous forme d'ions orthophosphates ($H_2PO_4^-$ ou HPO_4^{2-}), et quant au potassium, sous forme du cation K^+.

Il peut donc y avoir une grande différence entre les quantités dites totales d'azote, de phosphore ou de potassium que l'on peut mesurer dans un sol, et celles qui vont être utiles aux plantes : c'est-à-dire sous forme phytodisponible.

Ces différences proviennent du fait que les éléments sous forme organique doivent d'abord être décomposés en forme minérale plus simple. Cette transformation prendra plus ou moins de temps selon la matière organique apportée (voir plus loin le coefficient C/N), son niveau de décomposition, la température, l'humidité et la vie du sol qui va s'en charger.

Une fois sous forme minérale, la partie n'est pas pour autant gagnée : ainsi, en ce qui concerne l'azote, l'ammonium peut « s'envoler » ou le nitrate « s'enfoncer ». Pour sa part, le phosphore peut être adsorbé et finalement diffusé au compte-gouttes, ou pire, il peut précipiter dans des conditions défavorables et ne pratiquement plus être soluble.

Fertilisation foliaire

Bien que les plantes tirent, dans la nature, l'essentiel des minéraux par leurs racines, il leur est aussi possible de les absorber via leurs feuilles, même si la voie de pénétration n'est pas forcément très claire. La technique de fertilisation foliaire est plutôt employée pour combler les carences en micronutriments, typiquement le fer, bloqué en sol alcalin, mais des essais ont également été menés avec des macronutriments, comme l'azote ou le phosphore. Les résultats

obtenus s'avèrent plutôt positifs, mais extrêmement variables, et l'intérêt économique semble encore à démontrer, en tout cas au champ.

6.3 Réponse des plantes à la fertilisation

6.3.1 Expérimentations de Rothamsted

Le centre de recherche agronomique de Rothamsted (GB) a été créé en 1843 par John Lawes, rapidement rejoint par Joseph Gilbert. L'objectif initial était de comparer la productivité agricole avec du fumier, comme c'était alors la règle, et avec les nouveaux fertilisants minéraux. Lawes et Gilbert ont mis en place, à partir de 1852, sur plusieurs cultures (blé, orge, betterave), puis sur prairie (*Park Grass Experiment*), une expérience comparative, avec des parcelles non fertilisées (le contrôle), fertilisées avec du fumier (35 t/ha) et fertilisées avec diverses combinaisons d'éléments minéraux. Et depuis lors, ces expériences continuent !

Il existe de rares expériences agronomiques d'une telle durée dans le monde (ferme expérimentale de Grignon en France), mais il faut bien comprendre, au moment où l'on parle - mais pas assez - de durabilité agricole, qu'on peut, ici, la voir en œuvre. Au cours de ces années, l'expérience s'est complexifiée, tout en restant focalisée sur la fertilisation, et des innovations ont été progressivement introduites (gestion des mauvaises herbes, chaulage, cultivars modernes), dont nous allons observer l'impact sur la culture de l'orge (Figure 72). Un facteur, non prévu, est le réchauffement climatique. ; à Rothamsted, depuis 1980, la température annuelle a pris un degré supplémentaire, l'expérience permet aussi de suivre ce changement. Plus généralement, Lawes a mis en exergue que ce type d'approche, au long cours, permet de s'affranchir des *larges variations annuelles dues à la météorologie qui brouillent les résultats d'études plus courtes*[191].

Le premier résultat intéressant concerne la culture témoin, celle qui est sans fertilisants : elle reste stable, à une production proche de

[191] On peut d'ailleurs observer, dans la Figure 72, que ce sont des moyennes sur plusieurs années qui sont représentées...

1 t/ha, ce que l'on considère être les « performances du moyen-âge[192] ». On voit que les innovations successives ne permettent pas de faire décoller la production : *la fertilisation (azotée) est bien un facteur limitant* (Sinclair, & Rufty, 2012). Cette conclusion est renforcée par le fait que la courbe correspondant à des parcelles amendées au fumier, mais seulement jusqu'à 1871, plongent pour rejoindre la courbe témoin.

Les premières années de l'expérience apportèrent deux évidences : d'une part, que *la disponibilité du phosphore est, également, un élément limitant*, peu importe la forme ou l'intensité de la fertilisation azotée ; et d'autre part, que les fertilisants minéraux[193] procurent la même production que le fumier. « Lawes never used these information to suggest that fertilisers were better than farmyard manure. Rather, he realized that *no farmer would have this amount of famyard manure to apply to each field each year* and that fertilizers, when used judiciously, could maintain and increse food production to help feed the rapidly increasing urban population (Johnston & Poulton, 2019) ».

> Du côté de chez Stéphane : J'ai indiqué *en italique*, dans la phrase précédente, une chose qui me semble importante, pour toute personne s'inquiétant de la sécurité alimentaire mondiale. Sans fertilisation, nous sommes condamnés à une « productivité du moyen-âge », avec une terre qui a, grosso modo, la même taille et une population en explosion. Ici, la productivité passe de 1 t/ha à 10 t/ha, pour les meilleures combinaisons ! Combinaisons qui intègrent la fertilité, certes, mais aussi la gestion du pH, des mauvaises herbes, des pathogènes, et à n'en pas douter, l'irrigation.
>
> En outre, si les fertilisants de synthèse demandent une énergie considérable, il ne faut pas croire que le fumier ou les engrais verts sont des cadeaux offerts par la nature[194] ! Il faut bien un espace, du temps, et d'autres inputs

---

[192] Sur lesquelles il y a quelques données, ce qui ne veut pas dire que le moyen-âge soit une période spécialement retardée !

[193] En quantités adéquates.

[194] Je me suis déjà fait avoir une fois, plus jeune, avec l'histoire du Père Noël...

> probablement, pour les produire ; et les minéraux qu'ils contiennent ont bien été prélevés ailleurs, et non créés[195]. C'est ce que j'appelle « déshabiller Pierrette pour habiller Paulette », parce que, par exemple, utiliser ses tontes de pelouse pour enrichir son potager, c'est appauvrir le sol de sa pelouse et... le laisser toujours en pelouse afin de pouvoir continuer.

Autre résultat intéressant, il y a, vers les années 1940, un décrochage de la fertilisation minérale, dont l'origine est l'effet acidifiant de ces engrais. Il a dû être contrebalancé par un chaulage, l'acidité du sol, repérée par *le pH, est donc un facteur limitant supplémentaire*.

Un autre enseignement a été une meilleure connaissance du cycle de l'azote. En employant des isotopes, il a été possible de suivre son devenir, après les apports. En moyenne, 50 % est absorbé par les plantes, 25 % reste dans le sol et 25 % part en volatilisation ou en lixiviation.

Trois innovations (les cultivars modernes, le contrôle des maladies, ici par les fongicides, et le recours aux rotations) ont augmenté la production, *à condition que la fertilisation ne soit pas limitante* : des quantités d'azote ont dû être ajoutées pour en tirer le plein bénéfice.

Il semble, avec l'orge, mais ce n'est pas aussi net avec d'autres cultures, comme le blé ou la betterave, que l'effet matière organique qu'apporte la fertilisation par le fumier, et qui a permis, sur la durée de l'expérience, de multiplier par 2.5 la matière organique dans le sol, finisse par payer, en partie par son effet sur la structure du sol, et par fournir, au final, la meilleure fertilisation possible, *en combinaison avec une quantité d'azote minéral apporté au printemps*, époque où la minéralisation biologique se fait avec difficulté. Pour sortir un peu du sujet (la fertilisation), le *Park Grass Experiment*, sur lequel nous reviendrons, a aussi fait avancer les connaissances écologiques.

---

[195] À part l'azote, dans une certaine mesure, avec les légumineuses (fabacées) qui le tirent largement de l'air.

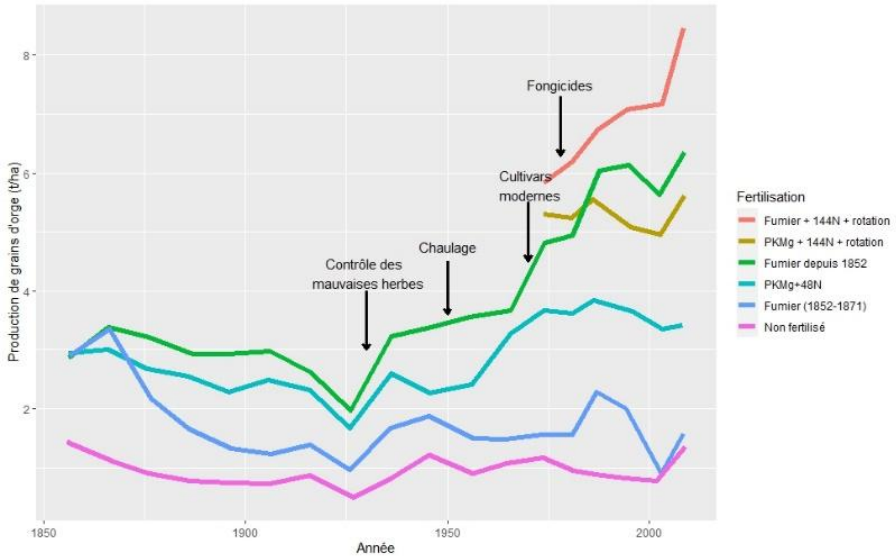


Figure 72 : Comparaison de productions d'orge (1852-2016) à Rothamsted, suivant différentes fertilisations. Les changements de gestion sont indiqués par des flèches.

6.3.2 Courbe de réponse à la fertilisation

À présent, supposons que nous soyons capables d'apporter de l'azote, sous une forme qui soit disponible, au bon moment, pour notre légume, en l'occurrence une culture de laitue (Boroujerdnia & Ansari, 2007), et que les autres facteurs soient aussi réunis (lumière, température, humidité, autres nutriments, état correct du sol...). La Figure 73 indique une relation absolument typique entre la production d'un légume et la quantité d'azote apporté. Qu'en dire ? Primo, qu'en l'absence d'azote *apporté*, cela pousse quand même ! Il y a généralement des reliquats d'azote, de la minéralisation secondaire ou d'autres phénomènes qui font, comme nous le verrons plus en détail en décrivant le cycle de l'azote, qu'il y a toujours une certaine quantité d'azote, qu'on appelle offre du sol, qui permet un rendement minimal. Secundo, que les apports sont très positifs avec une faible fertilisation, jusqu'à 50 kgN/ha, mais se révèlent ensuite de moins en moins intéressants, jusqu'à 120 kgN/ha. Tertio, qu'au-delà d'un optimum, le rendement décroît, mais cela n'est pas vérifié pour tous les nutriments, qui peuvent parfois dessiner une courbe *finissant en plateau*.

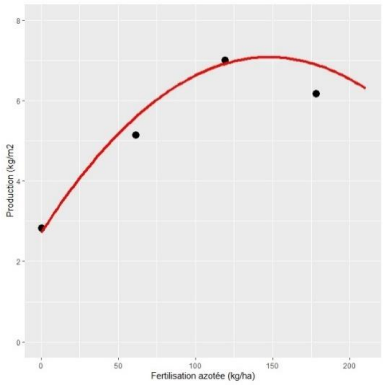


Figure 73 : Relation entre la production de laitue et la fertilisation azotée (données tirées de Boroujerdnia & Ansari, 2007).

Si nous postulons un tel effet de plateau, le modèle de Metscherlich (Figure 74) décrit la production obtenue y, lorsque b unités d'un nutriment sont dans le sol, et qu'il en est apporté x unités supplémentaires :

$$y = A\left(1 - e^{-c(x+b)}\right) \qquad \text{(Eq. 6.1)}$$

avec comme paramètres : A désignant la production asymptotique maximale et c un facteur de proportionnalité. D'après Metscherlich, ce facteur est constant pour le nutriment considéré, pour toute culture, tout sol ou autres facteurs ; ce qui a été largement contesté (Balba & Bray, 1956).

La question posée par le plateau est : mais que devient cet azote non utilisé par les plantes ?

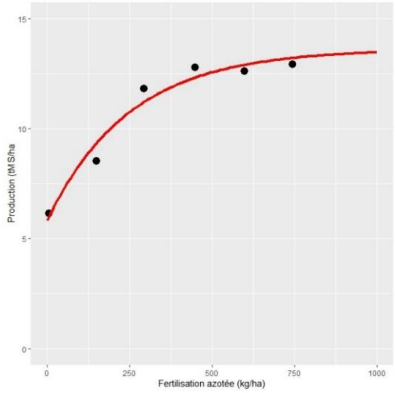


Figure 74 : Relation entre la production annuelle de maïs (matière sèche) et la fertilisation azotée. Ajustement par le modèle de Mitscherlich (données tirées de Dhanoa et al., 2022).

6.3.3 Rendement des nutriments et offre du sol

Courbe de rendement

Sans considérer, dans un premier temps, la fertilisation, le modèle de Metscherlich peut être employé pour définir la relation entre la production et la quantité disponible d'un nutriment, en l'espèce l'azote. En posant b=0 dans l'équation 6.1, on obtient la Figure 75, que l'on nomme courbe de rendement.

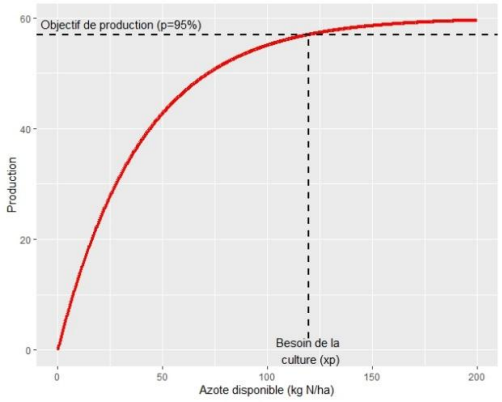


Figure 75 : Courbe de rendement (A=60,c=0.025,b=0) en rouge. Objectif de production fixé à 95 %, soit y_p=51, avec l'abscisse correspondante x_p~120, qui constitue le besoin de la culture.

Les caractéristiques de ce modèle sont les suivantes : premièrement, lorsque le nutriment indispensable est absent, il n'y a pas de production ; deuxièmement, dans une première gamme de présence du nutriment, la réponse de la production est proportionnelle (de coefficient $A \times c$) ; troisièmement, au-delà, le rendement devient décroissant ou « moins que proportionnel » ; quatrièmement, la courbe se rapproche de la production asymptotique A.

Le potentiel de la culture est la production maximale A, qui n'est en fait jamais accompli. Aussi, on considère usuellement un objectif de production plus réaliste (et économique), qui est de récolter p (%) de ce potentiel, soit $y_p = A(1-p/100)$. Pour atteindre cet objectif, il est nécessaire de disposer au moins d'une quantité $x_p = -\ln(1-p/100)/c$, qui est l'abscisse correspondant à l'objectif de production (*cf.* Figure 75). Lorsqu'on évoque, sans plus de précisions, le besoin de la culture, on

parle de la quantité x_p calculée avec une valeur de p élevée (p=95 % par exemple).

Offre du sol

Le sol contient toujours une certaine quantité de nutriments phytodisponibles. Tout au long de la culture, il s'agit, *sous forme disponible*, de ce qu'il y a dans le sol, plus ce qui y entre, moins ce qui en sort. Dès lors, cette offre x_s de nutriments contenus dans le sol, autorise une production minimale y_s (Figure 76). Remarquons que la partie de la courbe de rendement située à droite de l'offre de sol est exactement la courbe de réponse à la fertilisation (Figure 74).

Lorsque cette offre est très importante, ce qui peut être le cas avec le phosphore dans des sols régulièrement fertilisés, la production minimale peut suffire, et aucune fertilisation n'est nécessaire (F=0). Une fertilisation ne serait alors qu'un gâchis économique, et générerait éventuellement des problèmes environnementaux : le nutriment inutile pouvant « s'échapper du système », par les airs ou par les eaux. À l'opposé, quand le sol est pauvre en ce nutriment, c'est le cas usuel pour l'azote avec une culture courte en sortie d'hiver, une fertilisation devient intéressante : la quantité restant à régler, mais sans dépasser au total (sol+fertilisant) le besoin de la culture, pour les deux raisons évoquées au-dessus (donc $F<x_p-x_s$).

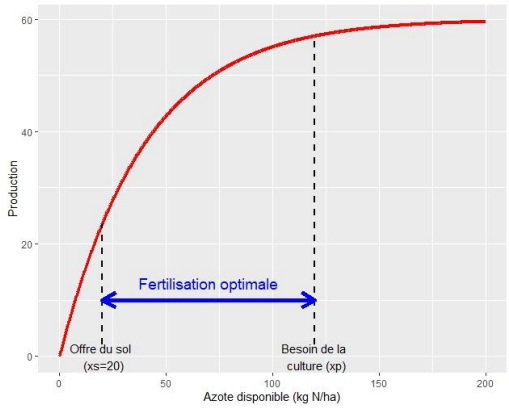


Figure 76 : Courbe de rendement (en rouge). Le besoin de la culture à p=95 % est de x_p=120. L'offre du sol est ici de x_s=20. La fertilisation possible s'étend donc de 0 à $F_{opt}=x_p-x_s$=100. Au-delà, il y a surfertilisation.

Il ne reste qu'un petit problème concret : c'est d'avoir une idée de l'offre du sol et aussi de la courbe de rendement. En ce qui concerne le rendement, des expérimentations de fertilisation ont permis de le définir *dans une situation donnée*. Au final, ce sont généralement des courbes moyennes de rendement, en conditions favorables, qui sont employées, avec des besoins forfaitaires correspondants. Bien évidemment, une part d'incertitude demeure : et s'il faisait moins chaud ? S'il pleuvait moins ? Si le niveau de dioxyde de carbone augmentait ? Si le sol était très différent, moins profond, plus sableux ou avec moins de matière organique ? Si un autre élément nutritif manquait ? Si les pratiques agronomiques étaient différentes, avec par exemple, du non-labour ?

En ce qui concerne l'offre du sol, on distingue deux situations. Celle où l'élément est particulièrement mobile, c'est le cas de l'azote, et il s'agit de faire un bilan de ce qui *pourrait* être disponible, en partant d'une quantité dans la solution du sol au semis[196], et en formulant des prévisions sur de multiples processus biogéochimiques (déposition, minéralisations, immobilisation, volatilisation...) qui vont moduler cette quantité initiale. Pour des éléments moins mobiles, typiquement le phosphore, c'est un peu plus simple : des tests de sol indiquent ce qui *pourrait* être disponible[197]. Là aussi, il y a des incertitudes, nous verrons que l'offre du sol dépend de nombreux facteurs non forcément maîtrisés.

6.4 Facteurs de variation de la réponse à la fertilisation

6.4.1 Facteurs climatiques

La minéralisation secondaire (de l'humus) mensuelle est présentée dans la Figure 77. Elle reproduit fidèlement la courbe des températures du sol, et ce n'est guère surprenant, puisque ce sont des organismes du

---

[196] Qui peut être connu par une analyse de sol succincte (voir, plus loin, le *strip test*) ou une approximation selon la saison, le sol et la culture précédente.

[197] En France, on utilise les méthodes Olsen, Dyer ou Joret-Hébert.

sol qui s'en chargent, et que leur niveau d'activité est plus ou moins réglé par cette même température. La courbe de minéralisation primaire des matières organiques apportées a la même allure. On saisit donc clairement les problèmes de démarrage des cultures en fin d'hiver et début de printemps, et donc l'intérêt de monter en température avec des couvertures de culture ou des serres, et l'utilisation recommandée d'engrais starter, c'est-à-dire avec des nutriments directement fournis sous une forme phytodisponible.

La courbe rouge montre ce qui se passe en l'absence d'irrigation, et rappelle le rôle de l'humidité qui est, elle aussi, indispensable à l'activité des organismes du sol. En été particulièrement, l'arrosage a plusieurs effets : fournir de l'eau à la plante, transporter les nutriments dans la solution, ameublir le sol et aider les organismes à être actifs et à minéraliser, donc à fertiliser !

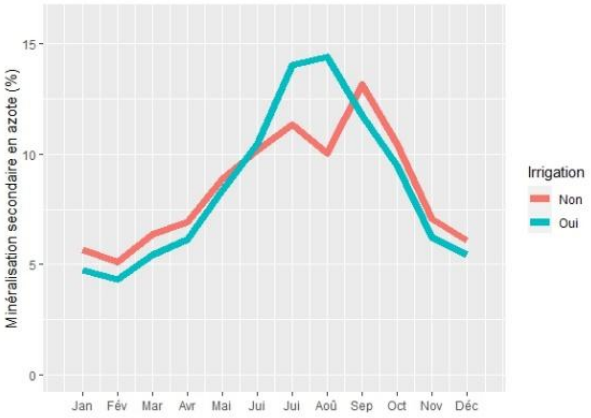


Figure 77 : Pourcentage d'azote fourni par la minéralisation secondaire chaque mois (CA Bretagne, 2008).

En fait, lorsqu'on parcourt les articles scientifiques sur l'effet de la fertilisation azotée, ils prennent très souvent simultanément en compte l'effet de l'irrigation ou bien s'en « débarrassent », en la calant à un niveau optimal. Ainsi, le travail de Gheysari et al. (2009), sur le maïs d'ensilage, est tout à fait représentatif, et montre (Figure 78), sur deux années différentes, l'effet conjoint de l'irrigation et de la fertilisation azotée. La première chose évidente est que la production fut bien meilleure en 2004, pour une raison simple : un décalage des dates de semis et des températures et radiations solaires nettement plus

importantes. Il est possible de constater que les deux effets sont alors amplifiés, c'est comme si nous avions une interaction entre les trois facteurs : température (et radiations), humidité et fertilisation. On repère également que l'eau a un effet plus important que la fertilisation azotée : elle fournit en effet des éléments majeurs (oxygène et hydrogène) à la plante, alors que l'azote « n'est que » le plus important des macronutriments. Bien que la meilleure performance soit réalisée par une irrigation (W4) et une fertilisation (N200) maximales, les auteurs cherchent en fait un déficit hydrique (et azoté) permettant une production raisonnable, car ils habitent une région, en Iran, où l'eau est une ressource rare. Une approche à méditer.

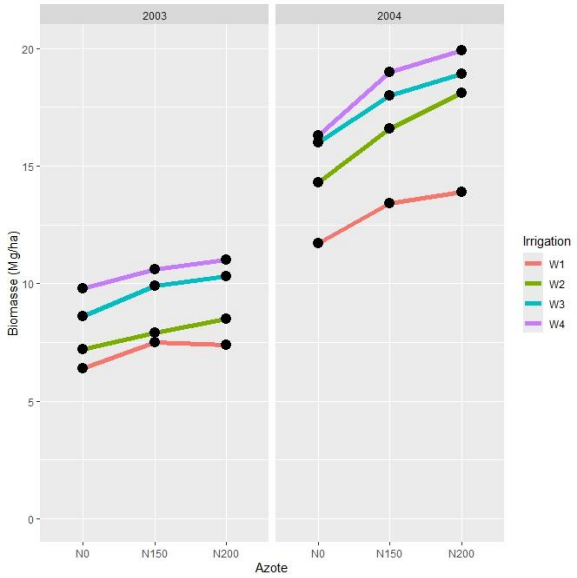


Figure 78 : Biomasse totale produite pour du maïs d'ensilage en fonction de la fertilisation et de l'irrigation (données tirées de Gheysari et al., 2009).

6.4.2 Facteurs édaphiques

Potentiel hydrogène

Définition

Le potentiel hydrogène eau du sol (pH) est en fait celui d'une solution, où du sol sec (HA, H désignant le proton associé au sol) a été

mélangé à de l'eau en proportions fixées[198]. Dans cette dilution, se produit un équilibre, avec des H^+ qui restent associés au complexe argilo-humique et d'autres qui se dissocient en ions Hydronium H_3O^+ : $HA+H_2O <-> A^- + H_3O^+$

Pour une concentration[199] C en moles/litre d'ions H_3O^+, on a :

$$pH=-\log_{10}(C).$$

L'échelle du pH s'étale de 0 à 14, mais en ce qui concerne les sols, elle se limite généralement de 3.5 à 9. Le pH permet de déterminer l'acidité d'un sol (pH<7) ou *a contrario* son alcalinité (pH>7). La raison la plus fondamentale de la valeur du pH est la constitution de la roche mère ; s'il s'agit d'une roche calcaire, le pH aura toujours tendance à être élevé. Au niveau mondial, le climat joue aussi un rôle important, les zones arides ont souvent des sols alcalins et les zones humides des sols acides (Hartemink & Barrow, 2023).

Le pH est un paramètre essentiel[200] de la santé du sol et est parfois comparé à la température d'un patient (Neina, 2019). Il s'agit, en premier lieu, de s'informer de la santé chimique ou fertilité chimique du sol, c'est-à-dire de sa capacité à fournir des éléments nutritifs sous une forme disponible aux plantes pour leur croissance, et à limiter les éléments qui leur sont toxiques. Mais cette capacité est reliée au travail des organismes du sol, surtout en ce qui concerne l'azote. Or, cette activité, signe de la santé biologique du sol, est elle-même conditionnée par le pH. Le pH reflète aussi, dans une certaine mesure, la santé

---

[198] Ce n'est donc pas le pH de la solution du sol, il est moins variable que ce dernier.

[199] En fait, une activité plus qu'une concentration.

[200] Une autre mesure est parfois évoquée pour compléter l'information pH sur l'état du sol, c'est le Eh, potentiel redox (oxydo-réduction). Si l'intérêt théorique est manifeste, la variabilité et la difficulté de sa mesure semblent l'écarter, à l'heure actuelle, d'une utilisation directe au potager. On trouve en ligne une revue complète sur le sujet : Husson, O. (2013). Redox potential (Eh) and pH as drivers of soil/plant/microorganism systems: a transdisciplinary overview pointing to integrative opportunities for agronomy. *Plant and soil, 362*, 389-417. Le même auteur a co-écrit une version nettement plus accessible : https://agriculture-de-conservation.com

physique du sol et sa structure. S'il est bas, c'est le signe que les ions Hydrogène ont pris la place des ponts calciques du complexe argilo-humique, et que ce dernier a donc tendance à se disperser.

Mais pour tirer parti de cette information sur la santé du sol et savoir remédier aux éventuels problèmes, il convient d'abord de comprendre comment le pH *affecte et est affecté* par de nombreux processus biogéochimiques.

Influence du pH sur les processus biogéochimiques

Ce qui nous intéresse plus particulièrement dans ce chapitre est la biodisponibilité des éléments nutritifs, c'est-à-dire le fait qu'ils soient accessibles aux plantes. Dès que l'on s'écarte de la *zone de confort*, celle d'un pH entre 5.5 et 7.5, de nombreux éléments peuvent devenir moins disponibles (phosphore et soufre en particulier) et d'autres peuvent atteindre des doses toxiques (aluminium en milieu acide). Cette relation entre le pH et la disponibilité des nutriments est souvent résumée dans le diagramme de Truog (Hartemink & Barrow, 2023, voir ici : https://www.researchgate.net). Toutefois, si ce diagramme indique les situations qui sont plutôt favorables, il ne dit rien de la présence effective de ces nutriments dans le sol, ni de leur besoin, variable selon les plantes ou selon le climat dans lequel ces plantes poussent. Les recherches plus récentes, menées depuis la publication du diagramme en 1946, montrent que la relation entre le pH et la disponibilité des nutriments est d'une grande complexité, et dans de nombreux cas, le contredisent. Si les légumes se portent au mieux dans la plage 6-7 du pH, certaines plantes sont capables de s'accommoder de pH extrêmes, comme le myrtillier (*Vaccinium Myrlillus*), plus à l'aise dans la gamme 3.5-5.0. On trouvera une liste[201] des pH optimaux pour de nombreuses espèces dans Spurway (1941). Notons qu'avec un pH bas, l'absorption de calcium et de magnésium se fait plus difficilement, ce qui rend les légumes moins intéressants du point de vue nutritif.

Le pH a également un effet sur les habitants du sol, en particulier les bactéries, et donc leur activité ; les champignons s'avèrent plus résistants et deviennent dominants en sol acide. L'activité a tendance

[201] Disponible en ligne : https://babel.hathitrust.org

à être optimale avec un pH entre 6 et 7 ; dans un sol plus acide, la fixation d'azote atmosphérique, la minéralisation et la nitrification se font par conséquent plus difficilement. Les vers de terre sont également assez sensibles au pH.

Pour ce qui est des sorties gazeuses d'azote, la dénitrification est plus forte en sol acide, il faudra alors être particulièrement vigilant aux conditions d'aération du sol. À l'inverse, en sol alcalin, la volatilisation est nettement augmentée, ce sont donc les apports organiques de type fumier qu'il va falloir absolument incorporer pour limiter ce risque.

Influence des processus biogéochimiques sur le pH

Il est important de la bien comprendre, car il sera ensuite possible d'utiliser ces processus pour ne pas sortir de la zone de confort des plantes et des organismes du sol, voire même pour corriger un pH trop extrême.

Si on ne prend pas en compte l'azote, les plantes absorbent plus de cations (K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+...) que d'anions (SO_4^{2-}, $H_2PO_4^-$, HPO_4^{2-}, Cl^-...), on parle d'excès de bases (EB=cations-anions). Dès lors, pour respecter une électroneutralité, des acides organiques des plantes libèrent des protons dans le sol – et par conséquent l'acidifient – mais conservent les anions organiques en résultant, dans les tissus végétaux[202]. Ce phénomène d'acidification du sol est modulé selon la forme sous laquelle l'azote est consommé par les plantes (Jaillard, 2001). Si c'est sous forme d'anions nitrates, ceux-ci vont venir contrebalancer l'excès de base et il n'y aura pas, au final, d'acidification du sol. Si c'est sous forme de cations ammonium, l'excès de base va être amplifié et l'acidification du sol sera forte. Le cas des légumineuses est intéressant, car la fixation atmosphérique du dioxyde d'azote n'est pas chargée électriquement, et l'excès de base n'est en conséquence pas modifié, d'où une acidification importante du sol.

Ce phénomène d'acidification par les plantes est, dans la nature, inversé par le retour dans le sol des matières organiques, et particulièrement des anions organiques qui vont consommer des protons[203] lors de la minéralisation. Mais dans les cultures, une partie

---

[202] AO-H -> AO^- + H^+ (AO-H est l'acide organique et AO- l'anion organique.)
[203] AO^- + H^+ nO2 -> nCO_2 + yH_2O (COMIFER, 217, p. 241).

(voire le tout) est exportée, ce qui laisse le sol plus acide qu'avant et l'appauvrit, en outre, en nutriments. C'est donc en apportant de la matière organique complémentaire, et par la minéralisation de ses anions organiques, que le pH peut se maintenir, voire augmenter.

La nitrification est un processus acidifiant[204] et il en va de même pour la volatilisation[205]. Il s'agit donc de choisir, de calculer au plus juste, et de pratiquer correctement la fertilisation.

Les organismes vivants du sol, y compris les racines des plantes, par leur activité de respiration, relâchent du dioxyde de carbone, qui se dissous en partie au contact de l'eau et devient un acide carbonique, dont la dissociation a un effet acidifiant[206]. Il est généralement temporaire et très saisonnier, ce qui explique que le pH varie, en étant plus haut en hiver qu'en été. On utilise parfois le taux de saturation[207] qui est plus stable.

Les précipitations ont un effet direct sur le pH, car l'eau des pluies est un peu acide[208]. Plus indirectement, la lixiviation, due aux fortes pluies, à une irrigation excessive ou à un sol très drainant, entraîne les anions organiques et les nitrates, ce qui a aussi un effet acidifiant (COMIFER, 2017, p. 240).

Capacité d'échange cationique

La capacité d'échange cationique (CEC) est la capacité du sol à fixer des cations sur des charges négatives, c'est-à-dire sur le complexe argilo-humique, à un pH donné. La CEC est, en effet, reliée positivement au pH ; les matières organiques, en particulier, voyant leur pouvoir adsorbant augmenter nettement plus que les argiles, aux charges moins variables.

On distingue la CEC effective, mesurée au pH du sol, et la CEC méthode Metson[209], où le pH a été « réglé à sa valeur neutre ». L'unité

---

[204] $NH_4^+ + 2O_2 \rightarrow NO_3^- + H_2O + 2\ H^+$

[205] $NH_4^+ \rightarrow NH_3 + H^+$

[206] $CO_2 + H_2O \rightarrow H_2CO_3 \rightarrow HCO_3^- + H^+$

[207] Pourcentage des ions Ca2+, Mg2+, K+ et Ca+ dans la CEC (voir plus loin) c'est-à-dire l'ensemble des cations du CAH (H+ et Al3+ s'y ajoutent en particulier).

[208] Et parfois beaucoup plus dans les « pluies acides » !

[209] Attention, c'est cette valeur qui est souvent donnée dans les analyses de sol, elle n'estime pas correctement la CEC effective, si le pH est très différent de 7.

est le milliéquivalent (meq/kg) ; au-dessous de 100 meq/kg, elle est considérée comme faible, et au-dessus de 250, comme forte. Les différents cations (Ca^{2+},Mg^{2+} ,K^{+} , Na^{+} ,NH_4^{+} , H^{+} , Al^{3+} , Fe^{3+}) sont adsorbés par le complexe argilo-humique, le calcium réalisant des liaisons très stables, car il forme des ponts entre argiles et matières organiques. Des anions peuvent aussi s'y fixer, typiquement PO_4^{3-}. Il doit y avoir un équilibre entre les différents cations[210] (Ca^{2+} ~ 75-85 %, Mg^{2+} ~ 10-15 %, K^{+} ~ 2-5 % et Na^{+}<1 % ; Néron & Alletto, 2023)

6.4.3 Facteurs spécifiques

Nous avons, pour l'heure, évoqué la réponse de *la* plante à la fertilisation, mais elles ne sont pas toutes identiques. En particulier, par rapport aux céréales par exemple, les légumes sont crédités d'une faible efficience dans l'utilisation de l'azote, qui est due à leur système racinaire peu développé et leur courte saison de croissance (Teil et al. 2020).

Variabilité interspécifique des besoins en azote

La Figure 79 décrit les besoins en azote des légumes couramment cultivés au potager. Ils s'échelonnent de 20 à 300 kgN/ha. Une famille botanique, celle des fabacées, est très particulière de ce point de vue, car ce sont des plantes qui poussent en symbiose avec des bactéries fixatrices d'azote, qui couvrent une grande part de leurs besoins. Elles permettent donc d'introduire de l'azote dans le système (pour les cultures suivantes).

Pour les autres familles, la grande majorité des plantes demandent de l'ordre de 150 kgN/ha. Les variations observées sont globalement reliées à la biomasse produite et à la durée de culture. Si le radis semble un légume économique en azote, ce n'est qu'une impression, car il faut rapporter cela à sa très courte période de culture. On a le temps de cultiver trois successions de radis, pour une culture de chou ; et ceci revient, au bout du compte, à une quantité équivalente d'azote... Dans le cas des cultures longues, l'apport d'azote gagne à être fractionné, pour éviter d'en perdre, car c'est un élément extrêmement mobile sous

[210] Attention, en sol calcaire, le pourcentage de calcium est surestimé.

sa forme phytodisponible la plus usuelle (nitrate). Quant aux plantes vivaces (rhubarbe, artichaut), elles doivent bénéficier d'un apport annuel.

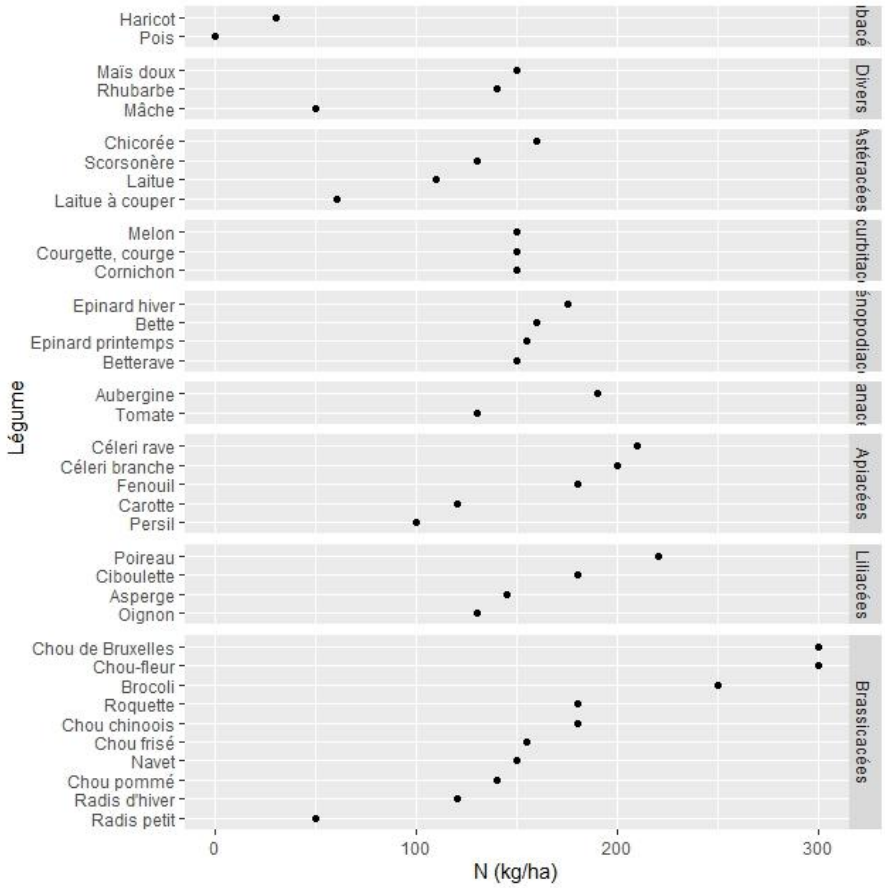


Figure 79 : Besoins en azote (kgN/ha) de différents légumes (données tirées de Neuweller & Krauss, 2017).

Variabilité intraspécifique des besoins en azote

Au sein de la même espèce, les cultivars peuvent avoir des besoins bien différents. Ainsi, les cultivars modernes de céréales, qui sont nettement plus productifs, ne peuvent l'être qu'à la condition d'une fertilisation adaptée.

L'autre facteur de variation est le stade de développement de la culture. La Figure 80 (à gauche) montre les besoins en nutriments d'une plante annuelle. Alors que le début de la croissance est consacré à construire racines, tige et feuilles, la floraison est l'occasion d'un basculement, et les prélèvements sont alors en partie consacrés aux

fruits. Le phénomène est redoublé par une réallocation, c'est-à-dire que des nutriments mobiles, qui étaient dans les feuilles (sources de nutriments), vont aller vers les fruits (puits de nutriments). Il est donc très souvent conseillé de soigner la fertilisation, un peu avant la floraison, lorsque ce sont les fruits que nous voulons récolter. Bien entendu, pour une laitue, nous ne fertiliserons qu'en pensant à la croissance végétative, sauf à vouloir produire des semences.

La situation des plantes bisannuelles (Figure 80, à droite) est bien différente. Il s'agit d'une betterave, et jusqu'en octobre-novembre, la demande en nutriments vient prioritairement de la croissance des feuilles, et secondairement de celle des racines. Alors s'opère un basculement, les prélèvements sont principalement le fait des racines qui, de plus, bénéficient d'une réallocation depuis les feuilles, ceci afin de constituer des organes de réserve pour passer l'hiver. La plupart du temps, nous allons récolter ces organes pour en faire un *bortsch*, mais, si nous les laissons en terre, il y aura, en fin d'hiver, une nouvelle réallocation, cette fois en direction des feuilles. Et pour la constitution des graines, une autre réallocation aura également lieu des feuilles vers les graines, sachant que, simultanément, les prélèvements dans le sol sont destinés aux trois types d'organes. Dans ce cas complexe, si on vise la production de graines, une nouvelle fertilisation de début d'année est nécessaire.

Reste que tous les nutriments ne suivent pas exactement le même rythme et des décalages sont observés entre les besoins en azote, phosphore, potassium...

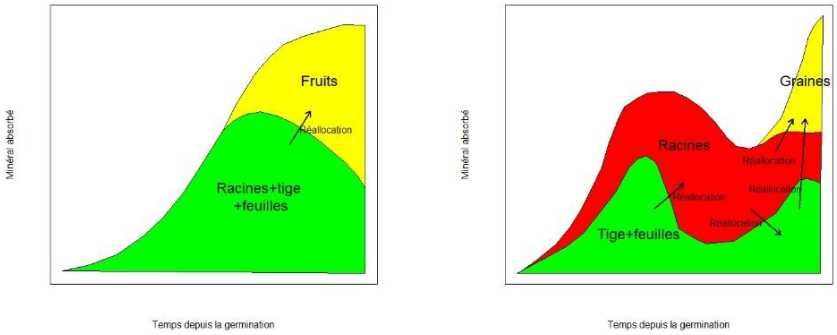


Figure 80 : Besoins en minéraux des plantes annuelles (à gauche) et bisannuelles (à droite) au cours du temps de croissance et de développement, avec leur répartition selon les organes de destination (reproduction d'après COMIFER, 2017).

6.5 Principes de fertilisation

6.5.1 Lois de la fertilisation

Il y a un dernier élément qui joue sur la réponse à la fertilisation, c'est la disponibilité des autres nutriments. Comme nous l'avions dit, il s'agit là d'un des premiers enseignements tirés des expérimentations à Rothamsted : si le sol manque de phosphore, la fertilisation azotée ne fonctionne pas. Sur quelle base, dès lors, faut-il combiner les différents apports de nutriments, par exemple l'azote et le phosphore ?

Nous allons commencer par une vue plus générale de ce qui fait la croissance des plantes et qui n'a, pour l'heure, été qu'esquissé. La fonction de production Y (biomasse, fruits ou graines) peut être écrite sous la forme suivante, dite du paradigme du facteur limitant (Wagonnier & Norvell, 1979, un peu améliorée) :

$$Y=\min[f_1(I),f_2(T),f_3(H_2O),f_4(CO_2),f_5(N),f_6(P),f_7(K),...,f_{n-1}(MH),\ f_n(A)]$$

La production dépend de l'irradiance (I), de la température (T), du dioxyde de carbone (CO_2) de l'eau (H_2O), de divers nutriments comme l'azote (N), le phosphore (P), le potassium (K) et bien d'autres, et enfin de la compétition avec les mauvaises herbes (MH) et des dommages causés par les bioagresseurs (A).

Nous avons ici réuni les éléments fondamentaux qui forment le cœur de chaque chapitre des présentes notes de lecture scientifiques au sujet du potager. Chaque fonction f_j correspond à la courbe de réponse de la production Y au facteur *j*, *quand les autres sont en quantité non limitée*. Nous avons étudié nombre de telles courbes de réponse, au cours des précédents chapitres.

La spécificité du paradigme du facteur limitant est la façon très simple dont ces courbes de réponse s'agrègent, pour donner un modèle général[211]..

---

[211] Comme le disent Sinclair et Park (1993), un certain nombre de ces facteurs sont hors de notre champ de maîtrise, en particulier l'irradiance, et plus ou moins la température. Il serait possible de les sortir du problème dans un contexte donné...

Justus von Liebig a énoncé la loi du minimum (Lemaire, 2024)[212] : « Les plantes ne croissent qu'en fonction du niveau permis par l'élément nutritif qui est le plus limitant ». Elle peut en fait s'interpréter de deux façons différentes, la plus courante étant la loi des facteurs limitants : la croissance des plantes est *limitée de façon indépendante* par les différents nutriments, et il convient de lever successivement celui qui est le plus limitant. L'idée est souvent illustrée par une image de tonneau très évocatrice.

Mais une autre interprétation est celle de Liebscher, dite loi de l'optimum : « Chaque élément nutritif est utilisé de manière d'autant plus efficiente que la disponibilité de l'élément qui est le plus limitant est portée près de son optimum » (Lemaire, 2024). Ici, les différents nutriments n'agissent plus de façon indépendante, mais il existe des *interactions*.

La Figure 81 montre, dans le panneau de gauche, ce que donne l'hypothèse des facteurs limitants, pour des rendements d'un nutriment A, modélisés par la fonction de Metscherlich. La courbe rouge, sans limitation du nutriment B, est celle que nous avions vu précédemment. Lorsque le facteur B devient plus limitant, ce qui change est l'asymptote de production, qui baisse (courbe violette puis courbe orange), mais la forme initiale de la courbe de rendement reste la même. En revanche, dans le panneau de droite, qui dépeint une interaction, non seulement l'asymptote baisse, mais la forme initiale de la courbe de rendement est altérée : la limitation du facteur B a tendance à modifier le rendement du facteur A.

Cet effet d'interaction entre les nutriments signifie qu'ils peuvent *en partie se substituer les uns aux autres*. Si, au niveau moléculaire et cellulaire, la non-substitution d'un nutriment à un autre est évidente, ce n'est en revanche plus le cas au niveau de la plante ou au niveau de la culture, d'après Sinclair et Park (1993). De nombreuses adaptations morphologiques et physiologiques des plantes leur permettent de

[212] Traduction dans Lemaire. G. (2024). Fertilisation des cultures : des bases scientifiques renouvelées. Article publié sur un site particulièrement intéressant, chapeauté par l'INRAE : https://mots-agronomie.inrae.fr L'article propose, en outre, des nouvelles voies pour gérer la fertilisation.

réallouer leur énergie (photosynthèse), pour acquérir les ressources qui leur manquent. Sinclair et Park en arrivent à la conclusion que, sauf dans des cas extrêmes où un nutriment est particulièrement rare, le modèle des facteurs limitants ne s'applique pas. Dans le cas général, et plus encore à proximité de l'optimum de production, les facteurs peuvent être considérés comme substituables.

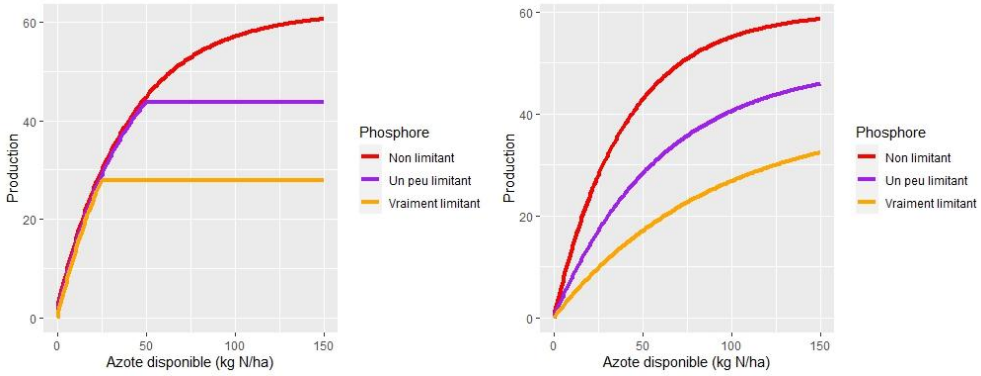


Figure 81 : À gauche, une illustration de la loi des facteurs limitants sans effet d'interaction entre le nutriment azote (A) et le nutriment phosphore (B) ; à droite, une illustration d'une interaction.

Une théorie plus générale, celle de la colimitation, a été développée en écologie et inspire actuellement les agronomes (Seghouani et al., 2024). On peut la définir comme « la limitation simultanée de la croissance par de multiples ressources *souvent accompagnée* (mais pas toujours) *par un effet de synergie* » (Sperfeld et al., 2016). Cette théorie propose une typologie plus large de situations (de colimitation), certaines pouvant s'identifier à la loi du minimum et d'autres à la loi de l'optimum. Cette dernière semble être la plus courante en ce qui concerne l'azote et le phosphore (Elser et al., 2007 ; Seghouani et al., 2024), mais aussi la colimitation de l'eau et de l'azote (Cossani & Sadras, 2018).

La conclusion est que les facteurs devraient être considérés simultanément pour optimiser la fertilisation (et la production), mais que cela est... trop compliqué. Nous allons, *en étant conscients des limites de cette approximati*on, optimiser séparément les différentes fertilisations, en *espérant tout de même* bénéficier d'effets de synergie.

6.5.2 Valeur optimale de fertilisation

Considérations agronomiques

Le principe de la fertilisation optimale est qu'elle doit permettre de compléter l'offre du sol (si elle n'est pas suffisante) pour remplir les besoins de la culture. La quantité optimale de fertilisant est, par conséquent, de $F_{opt}=x_p-x_s$, (*cf.* Figure 76).

Fernandes et al. (2022) rapportent les inconvénients de la sous-fertilisation et de la surfertilisation azotée. Le manque d'azote impacte la production des protéines, des enzymes et des acides nucléiques, et donc le fonctionnement des cellules. Conséquemment, la photosynthèse se fait mal : on peut ainsi enregistrer des pertes de 50 % sur la production de riz. Le déficit d'azote impacte également la qualité, la taille, la couleur, le goût et les qualités nutritionnelles (contenu en protéines, en particulier). C'est pourquoi la fertilisation azotée a permis une croissance remarquable des rendements et une (relative) sécurité alimentaire. Plus de la moitié de la population mondiale est nourrie par des cultures dopées aux engrais de synthèse. Un argument rarement entendu est que cela a aussi permis de *limiter* la déforestation, qui aurait été nécessaire pour nourrir la planète.

Cependant, cet usage massif a également conduit à dépasser les besoins des plantes de 30 à 80 %, le reste se retrouvant dans les sols, dans les eaux ou dans les airs... Il y a, bien entendu, une perte financière pour les agriculteurs à l'achat du fertilisant. Mais la surfertilisation augmente, en outre, la durée de la croissance végétative et décale la reproduction des cultures. Pour le haricot vert, on assiste à une perte de 92 % de la production de gousses, mais c'est aussi le cas pour les légumes-fruits comme la tomate, le concombre, le melon... La fertilisation excessive change aussi la qualité de la récolte ; des qualités organoleptiques sont modifiées, comme la taille, la couleur, les arômes, ainsi que la teneur en sucre (betterave, tomate, carotte). La teneur en d'autres éléments minéraux est également impactée, comme par exemple le calcium, ce qui modifie la fermeté des produits et leur durée de vie à l'étalage. Le contenu nutritionnel apparaît moindre. D'une part, la synthèse des métabolites secondaires est plus faible (vitamine C), ils sont pourtant une raison essentielle des bienfaits de la consommation de légumes. D'autre part, il peut y avoir accumulation

de nitrates, particulièrement dans le cas des légumes-feuilles, ce qui est dommageable pour la santé. Ainsi, pour des laitues pommées, passer d'une fertilisation de 80 à 125 kgN/ha ne change pas la quantité récoltée, mais augmente l'accumulation de nitrates de 50 % (Albornoz, 2016).

Considérations économiques

La théorie agronomique nous indique que la quantité optimale de fertilisant est : $F_{opt}=x_p-x_s$. Mais cela n'est ni toujours possible, ni même toujours souhaitable. À supposer que l'agriculteur en ait les moyens, la fertilisation a un coût et la récolte un prix de revient : il y a donc un arbitrage à réaliser, afin que la fertilisation ne coûte pas plus qu'elle ne rapporte.

Soit P_y le prix de vente de la récolte y et P_x le prix d'achat du fertilisant x, le bénéfice pour l'agriculteur sera de $B(x)=P_y\,y - P_x\,x$. Si nous ajoutons que le rendement y suit la formule de Metscherlich (Eq. 6.1), il s'ensuit[213] comme dose de fertilisant économiquement optimale, c'est-à-dire maximisant le bénéfice, la valeur suivante :

$$x= \ln(P_y \times A \times c/P_x)/c-b.$$

On peut en déduire que la dose x de fertilisant va augmenter quand le prix de vente P_y de la production va monter ; ou quand la production A va croître ; ou quand le prix d'achat P_x du fertilisant va baisser ; ou quand l'offre du sol b sera moindre[214]. Afin d'illustrer ces variations, la Figure 82 utilise l'exemple d'une production de blé (Fowler, 2003, variété AC Reed). Son potentiel est de six tonnes à l'hectare ; l'offre de sol étant de 25 kgN/ha. Pour la période 2016-2021, Arvalis, institut technique agricole, donne un prix du blé de 170 € la tonne et un prix moyen pour l'ammonitrate, fertilisant de synthèse, de 0.95 € par kilo d'azote.

---

[213] En dérivant la fonction B(x) et en cherchant la valeur de x où cette dérivée s'annule, qui est alors un optimum.

[214] Notons également, dans la gamme usuelle de valeurs de c, que la fertilisation va aussi augmenter lorsque la culture sera plus exigeante, c'est-à-dire lorsque c sera plus petit.

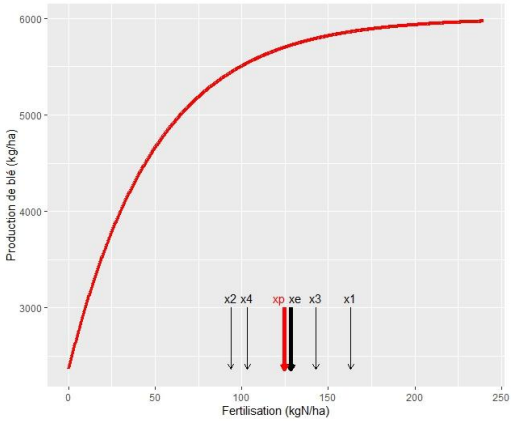


Figure 82 : Réponse du blé à la fertilisation (Eq. 6.1, A=6 000, b=25, c=0.02 ; données de Fowler, 2003). La valeur agronomique optimale (xp, p=95 %) est très proche de la valeur économique optimale (xe), lorsque le prix du blé est de 170 € par tonne et celui du fertilisant de 0.95 € par kgN. x1 est l'optimum économique lorsque le prix du blé passe à 340 € la tonne ; x2 lorsque le prix du fertilisant monte à 1.90 € le kgN ; x3 lorsque la production atteint 8 000 kg/ha ; x4 lorsque l'offre du sol augmente à 50 kgN/ha.

Soulignons à nouveau que, lorsque le prix de vente de la récolte est élevé, et c'est le cas avec les légumes, il y a moins d'hésitation à fertiliser ; et même, pour éviter tout risque, à surfertiliser largement en guise d'assurance contre la perte de récolte. Ceci explique que le maraîchage soit, souvent, moins regardant que les grandes cultures sur la juste fertilisation ; et, à surface comparable, soit en définitive, plus polluant.

Considérations environnementales

Les conséquences environnementales sont importantes, car l'agriculture est le secteur qui a le plus d'impact sur le cycle biogéochimique global de l'azote. Les sols sont acidifiés par certains fertilisants, ce qui nuit à leur productivité et biodiversité. La lixiviation des nitrates dans le sol a conduit à la pollution et à l'eutrophisation des cours d'eau et à la prolifération d'algues nuisibles. Au-delà d'un certain seuil, cette eau peut devenir un danger pour la santé humaine. La fertilisation azotée peut aussi se volatiliser sous forme d'ammoniac (générant une forte pollution de l'air, à cause de particules fines) ou de protoxyde d'azote (qui est un gaz à puissant effet de serre).

Il convient donc d'améliorer l'efficience d'utilisation de l'azote, c'est-à-dire le pourcentage qui se retrouve dans la plante par rapport à celui apporté pour sa fertilisation.

En ce qui concerne la surfertilisation phosphatée, le problème se pose différemment. Déjà, elle n'entraîne pas de baisse de la production (effet plateau), et à peine, de sa qualité[215]. Il est en revanche possible qu'elle génère des problèmes de pollution des eaux de surface et d'eutrophisation par érosion ou ruissellement. La lixiviation s'avère toutefois assez rare. Le gâchis de la surfertilisation phosphatée est bien sûr économique, pour l'agriculteur, mais au-delà, elle repose souvent sur des engrais tirés de roches phosphatées, dont l'extraction est en cours d'épuisement. C'est donc un problème de durabilité qui est posé. L'étude de Yan et al. (2013) sur la culture légumière en Chine montre l'étendue du problème. Alors que les exportations moyennes de phosphore sont de 25 kgP/ha en plein champ et de 45 kgP/ha en serre, les apports organiques et minéraux cumulés sont, respectivement, 4.7 et 13 fois plus élevés ! Ceci conduit, au fil du temps, à une accumulation dans le sol, quantifiée par le P-Olsen (un mode d'extraction chimique reflétant la biodisponibilité du phosphore), qui est de 100 mgP/Kg au champ et 179 mgP/Kg sous serre, à comparer avec 34 mgP/Kg pour des céréales. Or, la valeur critique du P-Olsen, celle au-delà de laquelle il n'y a plus de gain de rendement, est typiquement de 60 mgP/ha pour des légumes (et, dans leurs propres essais, de 58 pour les légumes-fruits et 46 mgP/ha pour les légumes-feuilles). 87 % des champs et des serres étudiés dépassent allègrement ces seuils, rendant la fertilisation quasiment superflue. Mieux encore, les apports organiques, à eux seuls, couvrent généralement les exportations, ce qui rend pratiquement inutile, sauf une petite dose pour le démarrage de la culture[216], l'emploi de fertilisants minéraux qui sont une ressource non-renouvelable.

---

[215] Une déficience en zinc parfois.

[216] Parce que les fertilisants organiques sont souvent plus lents à agir, nous en reparlerons.

6.5.3 4R

4R est un cadre conceptuel afin de mieux fertiliser (Bruulsema, 2018). Il s'agit d'employer la bonne source de nutriments (*Right nutrient source*), en bonne quantité (*Right rate*), au bon moment (*Right time*) et au bon endroit (*Right place*). Nous nous sommes déjà largement attardés sur le problème de la bonne quantité, et n'y reviendrons pas tout de suite.

La bonne source n'est pas unique et résulte souvent d'une combinaison entre engrais et amendements organiques. Les disponibilités de leurs éléments sont différentes et doivent se compléter. Du fait de leur grande variabilité de composition, les fertilisants organiques peuvent présenter certains dangers, comme la présence de métaux lourds, de pathogènes et de résidus pharmaceutiques (Goss et al. 2013) ; il convient de s'assurer de leur qualité et de les appliquer correctement.

Le bon moment signifie qu'il faut, d'une part, tenir compte du fait que les plantes n'ont pas toutes les mêmes besoins en nutriments, et que ceux-ci changent au cours de leur développement ; d'autre part, selon le moment de la saison, l'offre du sol va être différente à cause de la relation entre la température du sol et la minéralisation. De même, les problèmes de ruissellement ou de lixiviation sont liés aux pluies, qui ont généralement une saisonnalité. Enfin, pour l'azote en particulier, le fractionnement des apports est très courant, ce qui permet d'en perdre le moins possible. Le même résultat est possible en mixant plusieurs sources, qui ont des vitesses de disponibilité différentes (Albonoz, 2016).

En ce qui concerne le bon endroit, le principe est des plus simples : il s'agit de mettre le fertilisant au plus près des racines. Il existe, par exemple, des techniques de fertilisation en bandes, où seul le rang de légumes est bien fertilisé, mais où les inter-rangs ne le sont pas : ce qui est essentiel pour des éléments peu mobiles comme le phosphore. Dans le même esprit, on peut fertiliser en même temps que l'on plante. La fertigation est une autre méthode où le fertilisant est dilué dans l'eau d'irrigation, qui est alors exactement appliquée au pied de la plante, selon ses besoins.

6.5.4 Gestion intégrée de la fertilité du sol

Mugwe et al. (2021) décrivent l'histoire de la gestion intégrée de la fertilité du sol (ISFM, *integrated Soil Fertility Management*), dans le contexte de la remédiation aux problèmes de productivité de l'agriculture africaine[217].

L'une des raisons majeures en est la fertilité déclinante des sols, du fait que la culture est continue sur le même espace, avec des apports très insuffisants pour combler les exportations ; une situation que certains jardiniers, en zone plus tempérée, peuvent aussi connaître dans leur potager.

Cette histoire commence dans les années 1970, par une sorte de répétition de la révolution verte, en préconisant des inputs de fertilisants synthétiques, d'eau et de chaulage. Le succès n'est pas au rendez-vous, pour diverses raisons (infrastructure, politique, etc.). Un virage est pris dans les années 1980, avec le remplacement des fertilisants synthétiques par des apports organiques, mais il se heurte à des problèmes d'espaces disponibles, de travail et d'achat de bétail. Au cours des années 1990, se fait jour l'idée de *combiner au mieux* les deux types d'apports : engrais (essentiellement synthétiques) et amendements organiques (produits localement). À partir des années 2000, est ajoutée la prise en considération de la *qualité des variétés et semences employées*. Plus récemment, c'est l'*intégration des connaissances et pratiques agronomiques* dans un contexte local (à la fertilisation) qui est en jeu.

Vanlauwe et al. (2010) définissent l'ISFM (Figure 83) comme « un ensemble de pratiques de gestion de la fertilité du sol qui incluent nécessairement des fertilisants, des apports organiques, des germoplasmes améliorés, combinés aux connaissances pour adapter ces pratiques aux conditions locales et visant à maximiser l'efficience agronomique des nutriments appliqués et la productivité des cultures. Tous les inputs se doivent d'être gérés selon des principes agronomiques solides. »

---

[217] En ce qui concerne les céréales, cette productivité est trois fois moindre qu'en Asie et cinq fois moindre qu'en Amérique latine.

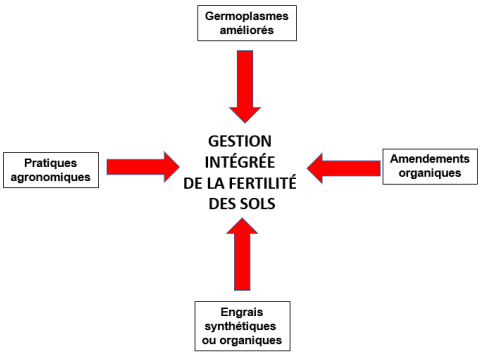


Figure 83 : Principe de la gestion intégrée de la fertilité des sols (ISFM).

Pour les terrains les plus pauvres en matière organique, les amendements vont permettre d'améliorer la structure du sol, donc sa capacité à respirer, à retenir de l'eau et à laisser pénétrer les racines, mais aussi à limiter son érosion et à constituer un réservoir (complexe argilo-humique) de nutriments. Dans ce type de sol, un engrais employé seul, n'a qu'une efficacité limitée, car les autres facteurs vont restreindre la productivité.

Pour des sols déjà mieux pourvus en matière organique, les engrais synthétiques ou organiques sont un apport complémentaire, permettant de combler les besoins nutritifs des plantes, particulièrement en des saisons où la minéralisation primaire et secondaire est médiocre, typiquement au printemps en zone tempérée. À l'inverse, à certaines saisons (été avec humidité satisfaisante ou confortée par une irrigation, automne), un apport d'engrais s'avère inutile, et même problématique, puisque les nutriments risquent d'être lixiviés et de partir dans les nappes phréatiques et dans les rivières.

Les deux inputs s'avèrent complémentaires et ont même un effet de synergie : si l'engrais augmente la production, il y aura plus de résidus, donc plus de matière organique pour structurer le sol ; et si le sol a plus de matière organique, il a plus de potentiel et donc exploite mieux l'effet des engrais (et a moins besoin d'engrais à cause de la minéralisation secondaire). L'une des pratiques promouvant de telles synergies consiste en des rotations ou en des cultures intercalaires à l'aide de légumineuses, qui apportent une production, des résidus, un reliquat intéressant en azote, une couverture du sol et un entretien de la rhizosphère.

Pour ce qui est des fertilisants, il est nécessaire de procéder, de temps à autre, à une analyse de sol, pour savoir où on en est, pour vérifier que le pH est correct et pour définir le besoin selon la culture qui suit et sa période.

Pour ce qui est des pratiques agronomiques, ce sont à la fois les gestions de l'eau, de la température, de la structure du sol, des mauvaises herbes et des bioagresseurs, qui vont concourir à l'efficience de la fertilisation.

Pour ce qui est des germoplasmes, les variétés modernes ont clairement un potentiel plus élevé, mais s'il n'a pas les moyens de s'exprimer, à cause d'un niveau insuffisant de fertilisation[218], mieux vaut se tourner vers des variétés classiques, voire locales, à la capacité augmentée par des greffes ou par des mycorhizations performantes.

Ce qu'expose, à mon sens, la gestion intégrée de la fertilité des sols, c'est que fertiliser correctement est intensif en connaissances agronomiques. Il ne suffit pas d'appliquer une dose (raisonnable) de fertilisants, synthétiques ou non, mais de gérer simultanément de nombreux paramètres.

6.6 Pratique de la fertilisation

6.6.1 Modifier le pH

Pour minimiser les trois problèmes (physique, chimique et biologique) d'un sol acide, la pratique du chaulage est ancienne. Des éléments à ce sujet ont été donnés dans le chapitre précédent (*cf.* la section amendement minéral).

D'autres pratiques agronomiques permettent de contenir la baisse tendancielle du pH, en limitant les processus biogéochimiques acidifiants (lixiviation des nitrates ou d'anions organiques, volatilisation de l'ammoniac, nitrification excédentaire, absorption

---

[218] Peut-être dois-je préciser que je ne souhaite « obliger » personne à une fertilisation optimale, donc importante, puisque les moyens disponibles et les conceptions du potager diffèrent. Je « milite » pour une prise de conscience du potentiel réel de son potager et de ce qu'il est, en conséquence, raisonnable de faire et d'espérer.

racinaire déséquilibrée en cations et anions) et en promouvant les processus biogéochimiques alcalinisants (minéralisation).

Ainsi, l'apport de matières organiques se révèle bénéfique, sauf si elles se volatilisent. Le fumier frais, en particulier, mais aussi les résidus de culture, doivent être de préférence incorporés au sol. Les cultures végétales d'hiver permettent de limiter la lixiviation des nitrates et l'acidification corrélative, de même qu'une irrigation en deçà de la capacité au champ. Les fertilisants de synthèse contenant de l'ammonium sont à employer en quantité correspondant aux besoins des plantes : toute surfertilisation entrainant le risque d'acidification. L'exportation des résidus de culture ne permet pas de retourner au sol les anions organiques qui, en se minéralisant, alcalinisent le sol, elle est donc à éviter. Les cultures de légumineuses, en dépit de leurs nombreux avantages pour la fertilisation azotée, sont cependant acidifiantes...

Baisser le pH est plus difficile, surtout qu'on se voit mal encourager certains processus acidifiants en lixiviant beaucoup, en surfertilisant largement, en volatilisant l'ammoniac, au vu des conséquences environnementales. Limiter les apports de matières organiques est aussi peu envisageable.

Restent les cultures de légumineuses, dont l'effet acidifiant devient alors un avantage !

6.6.2 Modifier la CEC

Pour agir sur ce potentiel de fertilité qu'est la capacité d'échange cationique, on peut partir de l'équation suivante, estimant la CEC effective (Julien & Tessier, 2021) :

$$\mathrm{CEC} = 0.0463 \times \mathrm{A} + 0.0044 \times (\mathrm{pH} - 5.6) \times \mathrm{A} + 0.0990\ \mathrm{pH} - 3.8) \times \mathrm{C}$$

avec A la teneur en argile et C en carbone organique du sol.

Les sols argileux auront donc une CEC plus élevée que les sols limoneux ou sableux, et cela, leur jardinier n'en peut mais... Il reste néanmoins deux possibilités pour l'améliorer : travailler sur le pH avec un chaulage et apporter de la matière organique.

6.6.3 Fertilisation azotée

Circulation de l'azote dans le sol

L'azote existe, dans le sol, sous plusieurs formes : premièrement organique, deuxièmement minérale (ammonium, nitrite, nitrate) et troisièmement, il peut s'en échapper sous forme de gaz (ammoniac, monoxyde d'azote, protoxyde d'azote, diazote), ou au contraire, y être fixé à partir du diazote atmosphérique. De nombreuses transformations ont lieu (minéralisation, nitrification, fixation...) entre ces formes, qu'il va falloir saisir pour : d'une part, comprendre ce qui sera à un moment phytodisponible, c'est-à-dire la quantité de nitrates dans le sol (voire d'ammonium), et d'autre part, dans la section suivante, pour réaliser un bilan permettant de gérer la fertilisation.

La Figure 84 est une représentation de la circulation[219] de l'azote dans le sol. Elle ne constitue qu'une partie du cycle biogéochimique de l'azote, qui est fortement perturbé par les activités humaines ; mais que nous n'évoquerons que sous l'angle des services écosystémiques du sol : limiter les sorties, que ce soit sous forme de gaz ou lessivé vers les cours d'eau et les eaux souterraines.

Dans le sol, l'azote est essentiellement présent sous forme organique : amendements organiques, résidus de culture, organismes vivants, et de façon plus stable, dans l'humus. Le processus de transformation de la matière organique en matière minérale s'appelle, de façon générale, la minéralisation, mais, dans le cas précis de l'azote, on parle d'ammonification : Norg -> NH_3 -> NH_4^+. Il peut s'agir d'une ammonification primaire, opérant à partir de matière organique décomposée (mais encore « fraîche »), ou d'une ammonification secondaire à partir de l'humus.

Cet ammonium peut alors suivre plusieurs voies. Il peut être absorbé directement par les plantes, même si ce n'est pas la forme majeure qu'elles consomment. L'ammonium peut aussi être consommé par les organismes vivants, et donc retourner à l'état organique, ce qu'on

[219] On parle plus volontiers du cycle de l'azote dans le sol. Cependant, cette expression présente, à mon sens, le désavantage de laisser penser qu'il est fermé.

appelle immobilisation[220]. Il arrive également qu'il soit adsorbé en petite quantité sur le complexe argilo-humique, du fait de sa charge positive, mais il sera échangé à un moment ou un autre et reviendra dans la solution du sol (un tour pour rien...). Beaucoup plus ennuyeux, il peut être perdu par volatilisation, c'est-à-dire retourner dans l'atmosphère sous forme d'ammoniac[221]. Mais ce qui est espéré, c'est qu'il soit transformé par nitrification en nitrate : NH_4^+ -> NO_3^-, car c'est la forme préférentielle de consommation d'azote par les plantes.

Malheureusement, tout le nitrate ne va pas aux plantes. C'est un élément facilement emporté par l'eau, et la lixiviation est le risque le plus important, non seulement de perte de fertilisation, mais aussi en termes écologiques, car il va rejoindre les eaux souterraines ou de surface et génère d'énormes problèmes de pollution et d'eutrophisation. L'agriculture est la plus grande source de ce type de pollution des eaux. Ce phénomène se produit souvent en automne-hiver, lorsque les pluies sont abondantes et les nitrates ne sont pas « piégés » par des cultures ; mais une irrigation excessive peut aussi en être la cause[222]. Les sols sableux y sont particulièrement sujets. L'un des objectifs majeurs de la réalisation d'un bilan azoté (devenu progressivement obligatoire chez les agriculteurs européens depuis la directive Nitrates de 1991) est d'éviter de trop fertiliser et de générer de telles conséquences néfastes, mais cela reste valable à notre petite échelle de jardinier amateur. En cas de manque d'oxygène dans le sol, certaines bactéries utilisent les nitrates pour « respirer », ce qui entraîne la dénitrification, et la fuite

---

[220] Une situation spécifique d'immobilisation se produit quand des bactéries ont besoin d'azote pour transformer un apport de matière organique particulièrement carbonée : c'est ce qu'on appelle la faim d'azote, où le nutriment est confisqué aux plantes, d'où la nécessité, dans les amendements, de prendre en considération le rapport C/N.

[221] Nous y reviendrons, mais le fumier frais peut ainsi s'envoler, induisant un problème environnemental et une perte de fertilisation. La volatilisation provient soit de fertilisants de synthèse à base d'ammonium ou d'urée (jusqu'à 65 % de perte pour cette dernière...), soit de produits organiques, les fumiers donc en premier lieu, mais également les résidus de culture (5-15 % de pertes, cité dans Tei et al., 2020).

[222] D'où l'insistance, dans le chapitre sur l'eau, de ne pas dépasser la capacité au champ...

de l'azote sous forme gazeuse vers l'atmosphère, et qui ne va pas arranger le changement climatique et la pollution atmosphérique...

L'azote provient aussi de l'atmosphère. Il peut y avoir simplement une déposition, sèche ou humide (comme les fameuses pluies acides, qui sont le résultat des émissions de NO_3 par les élevages intensifs et de NO_x par l'industrie et les transports...). Il peut également y avoir fixation libre par des bactéries particulières, qui transforment le diazote en ammonium. Une opération similaire est réalisée par des bactéries associées à certaines plantes (de la famille des fabacées principalement), dans la fixation symbiotique.

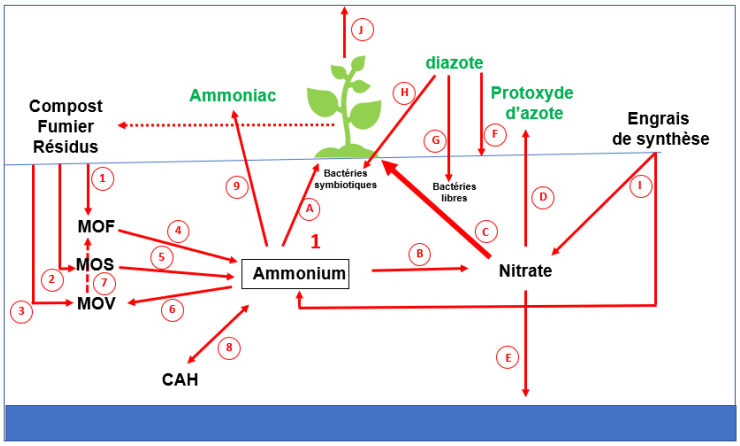


Figure 84 : Circulation de l'azote dans le sol : (1) décomposition, (2) humification, (3) immobilisation lors de la décomposition, (4) ammonification primaire, (5) ammonification secondaire, (6) immobilisation, par exemple en cas de faim d'azote, valable aussi pour les nitrates, (7) mort des organismes du sol, (8) adsorption et désorption, (9) volatilisation, (A) absorption (mineure) par les plantes, (B) nitrification, (C) absorption (majeure) par les plantes, (D) dénitrification, (E) lixiviation, (F) déposition atmosphérique, (G) fixation libre, (H) fixation symbiotique, (I) fertilisation par des engrais de synthèse et (J) exportations (MO : matière organique fraiche, stable ou vivante, CAH : complexe argilo-humique).

Pour en terminer, et cela a été le cœur de la révolution verte, il est possible d'apporter directement de l'azote sous forme minérale au sol, avec la fertilisation de synthèse. L'avantage en est la disponibilité presqu'immédiate pour les plantes, sans passer par les bactéries qui, dans certaines conditions climatiques ou pédologiques, ou avec

certaines matières organiques, peinent à produire ces formes phytodisponibles.

Bilan azoté

Concernant cette partie, je me repose sur le travail collectif remarquable de COMIFER (2017), portant sur les grandes cultures (céréales, légumineuses), et sur une version simplifiée (CA Bretagne, 2008), mais appliquée aux (grandes) cultures légumières. Il existe d'autres modèles très performants, mais adaptés à une culture particulière (blé, maïs, tomate) ; celui-ci présente l'intérêt de s'appliquer à la plupart des cultures de légumes, à des contextes pédoclimatiques différents, et peut proposer des quantités à apporter pour des fertilisants de synthèse comme organiques.

Il s'agit de déterminer, au début de la culture, s'il est « nécessaire » de fertiliser, et si c'est le cas, en quelle quantité ? L'idée est de mesurer l'écart entre la quantité d'azote non-organique dans le sol qui est attendue en fin de culture (Rf), et la quantité initiale (Ri). Cette différence doit être égale aux entrées d'azote dans le sol moins les sorties[223] :

$$\text{Rf-Ri=Entrées} - \text{Sorties.}$$

Dans les sorties, on compte ce qui va être absorbé pour construire la plante, donc ses besoins (Pf). Nous allons réécrire l'équation précédente sous une autre forme :

$$\text{Rf+Pf=(Ri+Entrées)} - \text{(Sorties-Pf)}$$

Pour compléter le tout, nous allons repérer, dans la Figure 84, ce qui constitue les entrées :

$$\text{Entrées= Mh + Fs + Mr + Xpro + A + X + Nirr + Fns}$$

avec Mh qui est la minéralisation de l'humus ; Fs est la fixation d'azote par les bactéries symbiotiques (présente uniquement pour les cultures

[223] Il existe également des méthodes radicalement différentes, qui reposent sur des mesures directes du « niveau en azote » des plantes, et qui permettent ensuite d'ajuster les apports.

de fabacées : fèves, haricot vert, soja, pois) ; Mr est la minéralisation provenant d'éventuels résidus de culture, laissés sur place ; Xpro est un amendement de produit résiduel organique ; A correspond aux apports atmosphériques (déposition sèche ou humide) ; X est l'apport en engrais de synthèse ; Nirr représente l'apport éventuel d'azote lorsque de l'eau d'irrigation est employée (un élément non présent dans la figure) ; et pour finir, Fns est la fixation d'azote non-symbiotique (donc libre ; un élément qui va disparaître un peu plus loin).

En ce qui concerne les sorties, nous avons :

$$\text{Sorties - Pf} = \text{L} + \text{Gs} + \text{Ix} + \text{Gx},$$

Ici, L est constitué des pertes par lixiviation de nitrates, qui seront « négligées[224] » (considérées comme nulles, COMIFER 2013, p.51) ; Gs correspond aux pertes gazeuses par nitrification, dont on considère qu'elles se compensent avec la fixation non-symbiotique (Fns dans les entrées, voir COMIFER 2017, p. 307). Quant à Ix, qui mesure l'immobilisation d'azote minérale apportée par les engrais, et Gx leur volatilisation, ce sont deux informations qui vont aussi disparaître, car elles seront plus avant intégrées dans un coefficient (apparent d'utilisation : CAU).

Au final, nous nous retrouvons avec :

$$\text{Rf} + \text{Pf} = \text{Ri} + \text{Mh} + \text{Fs} + \text{Mr} + \text{A} + \text{Nirr} + \text{X} + \text{Xpro} \qquad \text{(Eq. 6.2)}$$

En l'espèce, c'est une version relativement sophistiquée du bilan azoté qui est proposée. Il existe des modèles plus simples, comme la technique Nmin (ou KNS), qui se « contente » de faire le point sur l'azote dans le sol à l'installation et sa différence avec une valeur cible d'azote de la culture. Nous allons, de toute façon, avoir recours à des simplifications en pratique dans la réalisation de ce bilan.

---

[224] Il me semble qu'on devrait plutôt dire dans une perspective prévisionnelle qu'on va essayer de les réduire à zéro (pour raisons environnementales). Cette lixiviation est parfois décomposée en lixiviation due aux apports d'engrais synthétiques (Lx) et lixiviation du sol (Ls), correspondant au reliquat initial.

Maintenant, il faut bien comprendre l'objectif du calcul avant de le réaliser. Nous allons chercher à avoir un reliquat Rf minimal à la fin de la culture[225] (qui ne peut être nul, mais dont nous pouvons définir une valeur incompressible) afin d'éviter des pertes par lixiviation. Nous allons par conséquent ajuster X+Xpro, les apports en fertilisation organique ou minérale, pour équilibrer cette équation, avec Rf fixé à cette valeur incompressible. Mais avant cela, il nous faut estimer les autres termes de l'équation 6.2. Il existe plusieurs méthodes pour chacun, j'irai ici « au plus simple ». Afin d'illustrer les différents calculs, je vais transplanter une culture de laitue le 15 mars, qui sera récoltée deux mois plus tard, vers le 15 mai. Elle suit une culture de Mizuna d'hiver, en pleine montaison, dont je laisse les résidus sur place.

Pour Rf, des valeurs pour le reliquat incompressible ont été proposées par la CA Bretagne (2008, p.8), qui sont de 20 kgN/ha pour une fin de culture en décembre-février, 30 kgN/ha en mars-avril et octobre-novembre, et 40 kgN/ha de mai à septembre. Pour notre laitue récoltée en mai, nous avons donc Rf=40.

Pour Pf, nous allons nous reporter à un tableau disponible en annexe[226] qui, pour chaque légume, indique la quantité nécessaire à sa pousse. Pour une culture de laitue, nous avons Pf=110 kgN/ha.

Pour Ri, le reliquat dans le sol en début de culture, le mieux est bien entendu de disposer d'une analyse de sol... Il existe des méthodes rapides, peu onéreuses et assez précises, avec des bandelettes nitrates[227] (Schmidhalter, 2005). Faute de quoi, nous allons nous baser sur les quantités incompressibles proposées pour Rf, mais en faisant cette fois référence à la période de début de culture. Pour nos laitues implantées en mars, c'est donc Ri=30 kgN/ha qui convient. Je tiens à souligner que ce poste est considéré comme important pour réaliser un bon bilan

---

[225] Notons qu'il va rester aussi des résidus de culture, mais que cela n'entre pas en ligne de compte pour la présente fertilisation, uniquement pour la suivante.

[226] La majeure partie des données de ce tableau provient de Neuweiler, R., & Krauss, J. (2017). Fertilisation des cultures Maraîchères. *Recherche Agronomique Suisse 8*(6) : publication spéciale.

[227] Attention, je ne dis pas que c'est simplissime. L'article est disponible en ligne (en cherchant bien) pour se faire une idée. Il faut *un peu* de matériel, *un peu* d'organisation et *un peu* de calculs... Je suis *un peu* en train de faire des essais.

(Tei el al., 2020), et qu'il s'agit d'une des valeurs en lesquelles je suis le moins confiant...

Pour Mh, une autre valeur où ma confiance s'avère limitée, il s'agit de la quantité d'humus minéralisé pendant la période de culture. Dans un potager à faibles inputs, c'est une source d'azote des plus importantes. On sait que, sur une année, on peut considérer les calculs du modèle de Hénin-Dupuis soit :

$$Mh_{an}=S\times\rho_D \times h\times(\%SOM/100)\times(\%N/100)\times k_2$$

avec les valeurs par défaut suivantes : une surface de 10 000 m^2, une masse volumique moyenne de ρ_D=1 400 kg, une profondeur racinaire de h=0.25 m, un pourcentage d'humus de %SOM=3 %, un pourcentage d'azote[228] dans cet humus de %N=5 %, et un coefficient de minéralisation secondaire[229] de k_2=2,5 % (sol intermédiaire), d'où Mh_{an}= 131 N (kg/ha). Cependant, la culture de la laitue ne prend que deux mois, du 15 mars au 15 mai, et de plus, la minéralisation n'est pas un phénomène uniforme sur l'année, elle suit la courbe des températures du sol. Pour estimer le pourcentage de la minéralisation annuelle correspondant à ces deux mois, je propose un petit « bricolage ». Le Tableau 11 indique, pour chaque mois, le pourcentage de minéralisation correspondant[230]. Pour la laitue, avec 15 jours de pousse en mars, le mois d'avril complet et 15 jours en mai, nous avons donc 0.5×5.5+6+0.5×8.5=13 %, et finalement Mh=131×0.13~17... la terre est encore froide et la minéralisation se fait mal. Un autre élément important à la bonne minéralisation est l'humidité. Sans irrigation, la

[228] On utilise aussi souvent le fait que la matière organique est le double du contenu en carbone organique et que le rapport C/N de l'humus est proche de 9, d'où %N=100/2/9=5.5

[229] Sur une étude de 340 analyses de sol, en climat tempéré, la valeur de k_2 irait de 2 pour les sols argileux à 3 pour les sols sableux (Tei et el., 2020). Il est possible de l'adapter plus précisément à son propre sol en fonction de son taux d'argile, de calcaire et de la température moyenne annuelle, comme cela est expliqué dans le chapitre sur la santé physique du sol.

[230] Les données proviennent du CA Bretagne (2008, p.10, la courbe bleue avec une irrigation convenable).

minéralisation annuelle chute alors de 10 %, cette perte étant concentrée sur juillet et août (CA Bretagne, 2008, p.10).

Tableau 11 : Pourcentage mensuel de la minéralisation de l'humus.

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
% minéralisation	5	4	5,5	6	8,5	11	14	14	11	9	6,5	5,5

Pour Fs, le calcul est assez simple, car il n'y a pas de fixation symbiotique avec les laitues, par conséquent Fs=0. C'est uniquement avec les fabacées qu'il va falloir prendre en compte cet élément. On trouve Fs=40 pour le haricot (COMIFER, 2013, fiche haricot) qui n'a pas une fixation symbiotique très efficace, mais en revanche Fs=200 pour le pois (COMIFER, 2013, fiche pois).

Pour Mr, il existe des valeurs standards (COMIFER, 2017, p. 316) allant de 0 à 20 kgN/ha selon la biomasse produite et son rapport C/N[231]. On considérera donc des valeurs de 0 pour des cultures « ligneuses », comme le maïs ou le tournesol, de 20 pour les fabacées (et pomme de terre et betterave) et de 10 pour les autres. Nous prendrons, par défaut, cette valeur intermédiaire de Mr=10 kgN/ha, sauf si la culture précédente a été complètement enlevée pour obtenir une planche propre (et dans ce cas, on aura Mr=0). Je sous-estime ici probablement cet apport que Teil et al. (2020) considèrent comme très significatif pour les cultures légumières. Par exemple, il y a dans les résidus d'épinards et de laitue 25-30 kgN/ha, et pour les choux jusqu'à 250-300 kgN/ha ; et certaines études montrent que 60-80 % peuvent être minéralisés en trois semaines[232] (De Neve & Hofman, 1996). Plus précisément, ils proposent un modèle classique[233] : $N(t)=N_a(1-e^{-kt})$, dont on peut voir dans la Figure 85 quelques ajustements. Il est clair que, selon les parties plus ou moins ligneuses, la minéralisation est plus ou moins importante et rapide. Les deux auteurs relient en effet le

[231] Plus le rapport C/N est élevé, plus la minéralisation immobilise de l'azote, cela pouvant même donner des valeurs négatives (à court terme) dans le cas de faim d'azote.

[232] Pourcentage qui peut être volatilisé ou lixivié, voir plus loin le coefficient apparent d'utilisation.

[233] C'est celui de Mitscherlich sans le paramètre b d'offre du sol.

pourcentage asymptotique de disponibilité avec le rapport C/N : N_a=89.7- 2.03×(C/N), ce qui permet de voir, qu'au-delà de C/N=45, la minéralisation nette est nulle (N_a=0), car elle est contrebalancée par les immobilisations. Ce sont des résultats d'incubations en laboratoire, avec un bon taux d'humidité, une température de 17 °C et des résidus hachés incorporés à un sol ayant une densité volumique de 1.4 t/m^3. Les essais au champ étaient beaucoup plus variables, il faut en effet compter, mais *c'est vrai pour toutes ces études sur la minéralisation de matières organiques*[234], sur la température, l'humidité, la compaction du sol, l'incorporation ou non, la taille des résidus, en plus des facteurs qu'ils ont pris en compte : leur composition (C/N) et la durée de décomposition.

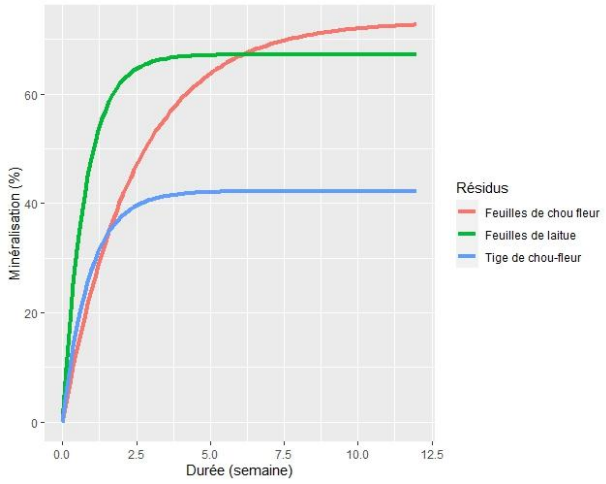


Figure 85 : Minéralisation de résidus de cultures légumières (tiré de De Neve & Hofman, 1996).

Pour A, dans COMIFER (2017, p.322), il est indiqué que la valeur de la déposition atmosphérique est de l'ordre de 10-15 kgN/ha par an. On a dans[235] Vet et al. (2014) une valeur de 0-25 kgN/ha par an en

[234] J'en ai peu parlé, mais les résidus contiennent aussi de l'azote minéral, directement utilisable, et pas seulement organique qui demande à être minéralisé. Ainsi, une feuille de laitue peut contenir un cinquième de son azote total sous forme minérale (De Neve & Hofman, 1996).

[235] Cité par Teil et al. (2020), j'avoue ne pas avoir lu cet article de 98 pages : Vet, R., Artz, R. S., Carou, S., Shaw, M., Ro, C. U., Aas, W., ... & Reid, N. W. (2014).

Europe. Dans les deux cas, la valeur centrale est de 12.5, que nous allons rapporter à la durée de culture, ici de deux mois : $12.5\times(2/12)=2$.

Pour Nirr, tout dépend de l'eau et de l'irrigation utilisée, ce qui est, bien entendu, difficile à deviner à l'avance... Si je m'avance sur 80 mm d'eau (soit 80 L/m^2), sur la durée et la période de cette culture, je vais aussi supposer que l'eau de mon robinet[236] possède une concentration en nitrates[237] de C=25 mg/L : la formule magique est : $Nirr=(V/100)\times(C/4.427)$ soit Nirr=4.5

Nous voilà presque au bout de nos peines, nous pouvons calculer, en partant de l'équation, la quantité que nous devrions apporter :

$$\begin{aligned} X+Xpro &= Rf+Pf- Ri- Mh-Fs-Mr - A -Nirr \\ &= 40+110-30-17-0-10-2-4.5=86.5 \text{ kgN/ha.} \end{aligned}$$

Cependant, il s'avère que ces quantités ne vont pas profiter entièrement à la culture, car une partie[238] va être nitrifiée ou volatilisée (voire lixiviée) et ce qui lui reviendra sera finalement $(X+Xpro)\times CAU$, où CAU est le coefficient apparent d'utilisation que nous allons estimer à CAU=0.725 (selon les références[239], il va le plus souvent de 0.60 à 0.85). C'est donc en définitive N=86.5/0.725~120kg N/ha qu'il va falloir apporter.

Fertilisation

Nous savons à présent que nous devons apporter de l'ordre de 120 kgN/ha, mais sous quelle forme ?

A global assessment of precipitation chemistry and deposition of sulfur, nitrogen, sea salt, base cations, organic acids, acidity and pH, and phosphorus. *Atmospheric Environment*, *93*, 3-100.

[236] Elle doit réglementairement être inférieure à 50 mg/L.

[237] Pour ceux qui utilisent l'eau d'un puits, il convient de savoir quelle est cette concentration, parce qu'on peut avoir de grosses surprises de ce côté-là, dans des zones polluées.

[238] C'est ici que reviennent Ix et Gx, qui avaient disparu dans l'équation 6.2

[239] Les variations dépendent des conditions climatiques et des capacités de la culture, racinaires en particulier. On peut, par exemple, consulter les fiches de fertilisation d'Arvalis : https://www.arvalis.fr

Je vais commencer par le plus simple, si ce n'est pas le plus écologique : employer un engrais de synthèse. Si je prends, par exemple, un ammonitrate, avec une teneur en N de 33 % (CA Bretagne 2008, p.17), c'est donc Q=120/0.33~365 kg/ha qu'il me faut. Pour revenir à une unité de mesure plus parlante pour la surface du potager, c'est donc un peu plus de 35 g/m^2 qui sont nécessaires.

Avec les amendements ou engrais organiques[240], les choses vont se gâter pour plusieurs raisons. Premièrement, les teneurs en azote sont plus faibles ; deuxièmement, surtout plus faibles en azote qui puisse être disponible rapidement, c'est-à-dire transformé en azote minéral dans le laps de temps de la culture ; et troisièmement, à cette période, le sol est encore froid et la minéralisation ne va pas être très efficace.

La formule de base pour définir la transformation de la matière brute du fertilisant (MB) en azote disponible (N) est la suivante :

$$N = MB \times (\%MS) \times (\%Ntot) \times Keq$$

avec %MS qui est le pourcentage que représente la matière sèche par rapport à la matière brute, %Ntot est le pourcentage d'azote total dans cette matière sèche et Keq est un coefficient d'équivalence (avec un engrais minéral) qui va permettre de savoir quelle partie de cet azote (organique et en partie minéral) peut finalement être disponible pour cette culture en cette période[241]. Les coefficients Keq proviennent

---

[240] Les amendements organiques (fumiers, composts) ont une faible quantité de nutriments, rapportée à leur masse ; ils servent plutôt de fertilisation de fond et apportent surtout de la matière organique, qui sera humifiée afin d'agrader la structure du sol. Les engrais organiques (sang desséché, corne, plumes, guano, poudre de légumineuses...) doivent dépasser certains seuils de concentration ; ils ont un effet plus rapide et permettent d'affiner la fertilisation, dans des situations plus froides par exemple.

[241] On peut trouver dans Möller (2018) des coefficients qui indiquent la disponibilité *sur toute l'année*, et non pas sur la durée de la culture, ce qui permet de corroborer ces résultats, mais aussi éventuellement de prendre en considération des « reliquats de disponibilité » pour les cultures suivantes. Il donne 25-35 % pour le compost, 50-70 % pour divers fumiers, 80 % pour les engrais organiques « coup de fouet », 40 % pour les résidus d'engrais vert et 60 % pour les résidus de légumineuses. Il est bien précisé qu'il s'agit de résultats où les pertes, avant et après l'application, sont faibles. Dans cette situation, Il y a un résultat intéressant sur les fertilisants

du rapport CA Bretagne (2008, p.42). Il ne reste donc qu'à employer les données du Tableau 12 afin de déterminer :

$$MB=N/[(\%MS)\times(\%Ntot)\times Keq]$$

> Du côté de chez Stéphane : Notez que j'ai mis une bonne journée à réunir les données du tableau caractérisant les fertilisants organiques. Ce sont ici des moyennes et il y a une variabilité très grande dans les mesures. De plus, d'un article à l'autre, les moyennes du même produit changent aussi pas mal. C'est du vivant et c'est normal ! Il faudrait en fait réaliser une analyse de chaque apport. Comme le disent Teil et al. (2020), pour beaucoup de ces produits, les quantités d'azote (%Ntot) et les vitesses de minéralisation (Keq d'une certaine façon) sont mal connues. Ce manque de standardisation du produit constitue une des grandes difficultés de la fertilisation organique et de la constitution d'un bilan azoté (Machet et al., 2017). Sans parler des coûts, ni de la place nécessaire à leur production[242]...

Nous prendrons quatre exemples : le compost de déchets verts, le compost de fumier de volaille, les tontes de gazon et le sang desséché. Pour le premier, nous avons $MB=120/[0.59\times0.0135\times0.05]$ soit 301 318 kg/ha~30 kg/m^2 (un résultat qui semble incroyable, mais lire

---

minéraux avec 85 % qui s'apparente donc au CAU, mais est plus élevé que ce que j'ai proposé. Un autre élément est une relation entre le C/N et la disponibilité (pour les fumiers) qui est disponibilité(%)=$80.4-6.08\times(C/N)+0.11\times(C/N)^2$. Cette équation montre qu'à partir d'un C/N de 25-30, la disponibilité des fumiers est nulle.

Pour les apports d'engrais verts, de foin et de paille, Vigil et Kissel (1991) proposent une équation intéressante pour la minéralisation annuelle : $N(\%)=59-1.4\times(C/N)$, ce qui monte ici la barrière de minéralisation nette ($N(\%)=0$) à $C/N=40$ ce qui explique la valeur de Keq nulle pour la paille, très variable pour le foin selon sa composition, et élevée pour les tontes de gazons. On voit que la minéralisation est plus faible qu'avec des résidus de cultures potagères, car les légumes renferment des quantités d'azote plus importantes.

[242] Pour sortir 500 kilos d'azote par an, il faut un hectare de légumineuses pérennes comme de la luzerne (Tei et al., 2020).

plus loin la section concernant les réflexions sur les amendements organiques) ; pour le deuxième, MB=120/[0.78×0.032×0.30] soit 16 025 kg/ha~1.6 kg/m^2 : pour le troisième, nous obtenons MB=120/(0.25×0.038×0.60) soit 21 053 kg/ha=2.1 kg/m^2 ; et pour le quatrième MB~215 g/m^2.

Tableau 12 : Caractéristiques de différents fertilisants organiques.

PRO	%MS	%Ntot (MS)	C/N	Keq
Compost de déchets verts	59 (a)	1,35 (a)	33 (b)	0,05-0,10-0,10 (f)
Compost de biodéchets	63 (a)	1,42 (a)	32 (b)	0,05-0,10-0,10 (f)
Fumier frais de cheval	54 (a)	1,52 (a)	30 (b)	0,10-0,20-0,25 (f)
Fumier frais de bovins	20 (a)	2,75 (a)	16 (b)	0,10-0,20-0,25 (f)
Compost de fumier de bovins	33 (a)	2,42 (a)	19 (b)	0,05-0,10-0,10 (f)
Compost de fumier de volaille	78 (a)	3,2 (a)	14 (b)	0,30-0,40-0,55 (f)
BRF	49 (d)	0,8 (d)	58 (d)	0 (l)
Foin	85 (j)	1-2,25 (c)	20-45 (g)	0-55 (g)
Paille	83 (j)	0,54 (b)	83 (e,j)	0 (l)
Tonte gazon	25 (i)	3,8 (i)	11 (i)	0,60 (g)
Sang desséché	100	5-9 (a,h)	5-10 (b)	0,80 (k)

[243](Lecture du tableau)

[243] Les données proviennent de (a) ITAB (2017) ; (b) calculé en considérant 45 %C dans MS ; (c) Demarquilly, C., & Andrieu, J. (1992). Composition chimique, digestibilité et ingestibilité des fourrages européens exploités en vert. *Productions Animales, 5*(3), 213-221 (selon la nature plus (trèfle, luzerne) ou moins azotée de l'engrais vert) ; (d) Kulagowski, R., & Giraud, G. (2012). *Evaluation de l'utilisation du BRF (bois raméal fragmenté) en Grandes Cultures*. Travaux réalisés dans le cadre du Réseau DEPHY Grandes Cultures irriguées Val de Durance ; (e) Shan, Y., Cai, Z., Han, Y., Johnson, S. E., & Buresh, R. J. (2008). Organic acid accumulation under flooded soil conditions in relation to the incorporation of wheat and rice straws with different C: N ratios. *Soil Science and Plant Nutrition, 54*(1), 46-56. (f) CA Bretagne (2008), les trois valeurs de Keq correspondent respectivement à des cultures à cycle court de printemps, à cycle court d'été et à cycle long (pomme de terre) ;
(g) Schaffers, A. P., Vesseur, M. C., & Sýkora, K. V. (1998). Effects of delayed hay removal on the nutrient balance of roadside plant communities. *Journal of Applied Ecology, 35*(3), 349-364. (h) Gholami, M., Sharifi, Z., & Renella, G. (2023). Agro-environmental assessment of recycling abattoir blood meal powder as an organic fertilizer using soil quality index and hazard quotient. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture, 12*. 75-91 ; (i) Illmer, P., Wagner, A. O., Mair, J., Malin, C., & Farbmacher, S. (2007). Chemical and biochemical parameters during composting of lawn clippings with special regard to the efficiency of a compost starter kit. *Compost science & utilization, 15*(1), 40-46. (j) Zahan, Z., Othman, M.

Est-ce que ces calculs sont justes ? Je ne pense pas, car j'ai sous-estimé des apports comme Mh (chez moi, la matière organique est deux fois plus élevée, et mon bricolage reste un bricolage) et Mr. Quant à Ri, il est très incertain. Tout ceci, sans compter que les produits organiques présentent une très grande variabilité et que les valeurs données ne sont, au mieux, que des moyennes. Toutefois, la pénible réalisation de ces calculs nous apprend quelques petites choses au passage :

- Pour les cultures de printemps, il y a des problèmes de minéralisations primaire (c'est la valeur inférieure de l'intervalle Keq dans le Tableau 12) et secondaire (*cf.* Tableau 11). Il est difficile de s'en sortir sans engrais de synthèse ou organique, voire de résidus de culture très « verts ».
- Les amendements à fort C/N, de type paille ou BRF, ne vont rien apporter, sur le court terme, en fertilisation azotée, voire même créer des faims d'azote. Il faut absolument les accompagner d'amendements à faible C/N, ou avoir du temps devant soi...
- Les composts domestiques ou de déchets verts, souvent mis en avant dans les agricultures alternatives, ont une faible capacité de fertilisation azotée. Au moins, ils ne créent pas de faim d'azote et ils vont avoir un bon pouvoir d'humification, mais il faut les seconder par des fertilisants azotés plus efficients.
- Les fumiers frais sont plus intéressants, mais délicats sanitairement et écologiquement à épandre. Pour les

---

Z., & Muster, T. H. (2018). Anaerobic digestion/co-digestion kinetic potentials of different agro-industrial wastes: A comparative batch study for C/N optimisation. *Waste Management, 71*, 663-674 ; (k) Möller, K. (2018). Soil fertility status and nutrient input–output flows of specialised organic cropping systems: a review. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 112(2), 147-164 ; (l) du fait de diverses références citées dans le texte qui montre que le seuil critique pour la minéralisation est de l'ordre de C/N=40-45.

composts de fumier, il vaut mieux s'orienter, au moins au printemps, vers ceux de volailles.

- Plus le taux de matière organique sera haut, plus les résidus de la culture précédente seront utilisés, plus il y aura de cultures de fabacées dans les rotations, et plus la température et l'irrigation seront maîtrisées, et moins nous aurons besoin de fertilisation azotée.
- Enfin, il faut surveiller le pH et les apports de phosphore.

Nitronitropeu

La section précédente a montré qu'un grand nombre de variables intervenaient dans la fertilisation azotée : le légume concerné, sa période de culture, les conditions climatiques et édaphiques, la gestion de la température et de l'irrigation.

Les simulations informatiques ont souvent un but pédagogique, aussi, pour réfléchir à ce sujet, j'ai créé un petit outil sur Excel : le Nitronitropeu[244], disponible en annexe. Il faut entrer les données (Pf, Rf...) afin de réaliser le bilan azoté ; des feuilles de calcul aident à déterminer ces valeurs avec des propositions par défaut. On peut voir le résultat, pour l'exemple de la laitue de printemps, dans la Figure 86.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	**Culture**										
2		Culture	Laitue								
3		Début	15-mars								
4		Fin	15-mai					**Bilan**	(Pf+Rf)-(E-S)	86,5	
5		Durée (jour)	61								
6								Engrais minéral	X	0	
7	**Demande**		(kg N/ha)					Engrais organique	Xpro	120	
8	Besoin de la culture	Pf	110					Coefficient apparent d'utilisation	CAU	0,725	
9	Reliquat final	Rf	40					Apport des fertilisants	(X+Xpro)*CAU	87	
10		D	150								
11											
12	**Entrées**		(kg N/ha)	Suggestion							
13	Reliquat sol en début de culture	Ri	30								
14	Minéralisation résidus de culture précédente	Mr	10								
15	Minéralisation humus	Mh	17								
16	Fixation symbiotique	Fs	0								
17	Fixation non symbiotique	Fns	1	0,99125							
18	Apport atmophérique	A	2	2,09334248							
19	Azote de l'irrigation	Nirr	4,5	4,5177321		Virr (mm ou L/M2)	80				
20		E	64,5								
21											
22	**Sorties**										
23	Perte gazeuse (dénitrification)	Gs	1								
24	Lixiviation	L	0								
25	Immobilisation des engrais	Ix			inclus dans CAU						
26	Perte par volatilisation de l'engrais	Gx			inclus dans CAU						
27		S	1								

Figure 86 : Bilan azoté réalisé à l'aide du nitronitropeu, pour l'exemple laitue de printemps.

[244] Pour ceux qui l'ont raté, nitro vient de *nitrogenium* en latin, qui a donné *nitrogen* en anglais et... l'azote en français.

L'ennui des outils, c'est qu'on peut les comparer avec d'autres... Ainsi, en France, le logiciel Azofert® est devenu la référence pour réaliser des bilans prévisionnels de fertilisation azoté. Il prend la suite d'Azobil® qui était un outil trop statique.

En effet, et c'est clairement le problème avec mon Nitronitropeu, les différentes minéralisations sont trop rarement envisagées comme des phénomènes dynamiques, sous l'influence des facteurs climatiques et édaphiques.

Si je prends l'exemple de la minéralisation de l'humus (Mh), on voit que mon « bricolage » prend en compte, dans une certaine mesure, la nature du sol (ρ_D, %SOM, %N, k_2) et la période dans l'année (*cf.* Tableau 11), mais pas les différences de températures, entre Lille et Marseille par exemple[245], ni l'humidité du sol (combinaison de précipitations, d'irrigation et d'évapotranspiration).

C'est pourquoi, je vais compléter cette déjà bien trop longue présentation de la méthode du bilan azoté, par celle du concept des jours normalisés.

Jours normalisés et bilan azoté

Tous les jours ne se valent pas en termes de minéralisation, à cause, en particulier, de la température moyenne et de l'humidité du sol. Aussi, l'idée des jours normalisés est de prendre une situation de référence, avec une température moyenne de 15 °C et une réserve du sol à la capacité au champ, de décrire ce qui se passe dans ce cas-là en termes de minéralisation (de l'humus, des résidus, des matières organiques apportées) pendant un certain nombre de jours JN (les jours normalisés), puis de fournir une formule permettant de calculer, dans des conditions différentes de températures et d'humidité, une correspondance en termes de jours normalisés.

Considérons une journée j, où la température moyenne est de T_j et la teneur en eau du sol est de $\%W_j$ (en pourcentage de la réserve utilisable : %W=1 à la capacité au champ et %W=0 au point de flétrissement).

---

[245] C'est pourquoi les valeurs forfaitaires données doivent être adaptées aux régions par les chambres d'agriculture.

La valeur normalisée JNj de cette journée (Machet et al., 2017) va être de :

$$JN_j = f(T_j) \times g(\%W_j)$$
$$\text{avec } f(T_j) = e^{0.115 \times (T-15)} \text{ et}$$
$$g(\%W_j) = 0.2 + 0.80 \times \%Wj$$

On voit, dans le Tableau 13, ce que valent de telles journées. Il « suffit » ensuite d'ajouter les valeurs journalières, pour obtenir celle de la période de culture : $JN = \Sigma_j JN_j$.

On saisit bien l'intérêt de la méthode (si elle est validée, et elle l'est assez bien) : c'est une bien meilleure prise en compte, au moins théorique, du contexte météorologique local, de la gestion de l'irrigation et des températures. Bien évidemment, le léger souci reste qu'on ne connaît à l'avance ni la température ni l'état hydrique du sol, il faut par conséquent émettre des hypothèses à leur sujet. Je vais prendre la courbe des températures locales de mon potager, sur les dernières années, et je vais fixer[246] la teneur en eau à %Wj=80 % au printemps et 70 % en été. Pour ma culture de laitue, du 15 mars au 15 mai, je trouve[247] JN1= 28.4, mais du 1er août au 1er octobre JN2=70.4. En passant, si j'emploie un voile de croissance qui me fait gagner 2 °C au printemps, j'ai plutôt JN1'=35.7, avec l'effet positif sur la minéralisation qui s'en déduit, à ce moment délicat.

Tableau 13 : Valeur en équivalent journée normalisée JN_j, selon différentes températures et humidité du sol.

$T_j \setminus \%W_j$	60%	80%	100%
5°C	0,21	0,27	0,32
15°C	0,68	0,84	1,00
25°C	2,14	2,65	3,16

[246] C'est un exemple, je serai probablement plus bas en été, particulièrement si je n'irrigue pas.

[247] Voir les programmes informatiques dans la section « Ctrl-R ».

Commençons par la minéralisation de l'humus, il est proposé dans COMIFER (2017, p.313) l'équation :

$$Mh=TNorg\times Km\times JN.$$

Tnorg est le stock d'azote organique (en t/ha) : $TNorg=\%N\times\rho_D\times h$ où %N provient soit d'une analyse de sol, soit d'un catalogue de sol[248], soit est approximé par %N=%SOM/2/9 où %SOM est le pourcentage de matière organique[249]. ρ_D est la masse volumique sèche du sol, par défaut à 1.4 t/m^2, et h la hauteur de sol, par défaut à h=25 cm.

Le taux de minéralisation normalisé est :

$$Km=22750/[(110+A)\times(660+CaCO3)]$$

où A est la teneur en argile du sol (g/Kg) et CaCO3 le calcaire (g/Kg), informations qu'on déniche dans une analyse de sol ou un catalogue de sols[250].

Je vais prendre, dans le catalogue, un sol un peu intermédiaire, avec A=200, CaCO3=10, ρ_D=1.4 et %SOM=3, d'où une valeur de Km=22750/[(110+200)×(660+10)]=0.12, %N=3/2/9=0.166, et par conséquent, TNorg=0.166×1.4×25=5.81. En considérant JN1=28.4, pour une culture du 15 mars au 15 mai, nous obtenons au final : Mh=5.81×0.12×28.4=19.9 kgN/ha, à comparer avec les 17 de mon « bricolage ».

Si nous considérons cette même culture en été, nous obtenons : Mh=5.81×0.12×70.4=49.4 kgN/ha avec les jours normalisés, et avec mon bricolage : Mh=131×(0.14+0.14)=36.7 kgN/ha. Globalement, il semblerait que mon bricolage sous-estime la minéralisation de l'humus.

La technique des jours normalisés peut aussi s'employer pour décrire la minéralisation des matières organiques (PRO) ou des résidus de

---

[248] Voir dans la feuille de calcul « Mh » de l'outil Nitronitropeu.

[249] Par défaut à 3 % dans les calculs.

[250] Voir dans la feuille de calcul « Mh » de l'outil Nitronitropeu.

culture. Machet et al. (2017) proposent de modéliser cette minéralisation avec :

$$N=N_0(a-be^{-kt}-ce^{-lt})$$

où N_0 est la quantité initiale d'azote de ces matières organiques et les autres paramètres sont donnés dans le catalogue des PRO (Table A5[251] de Machet et al., 2017). On peut observer dans la Figure 87, pour un apport d'azote de 100 %, la vitesse de minéralisation en fonction des jours normalisés. Il s'agit d'une sorte de coefficient d'équivalence (Keq), mais vu de façon dynamique, en incluant les conditions de température et d'humidité, dans les jours normalisés en abscisses. On voit ainsi, pour la culture de laitue de printemps en JN=28.4, les faibles minéralisations du compost de déchets verts (5 %) et du fumier de bovins (4 %), et la bien meilleure minéralisation des fientes de volaille (33 %) ; sans compter, bien entendu, que les pourcentages d'azote de départ de ces apports sont très différents ! Autre fait intéressant : l'immobilisation (Keq<0), causée par le fumier de bovins pailleux. Remarquons que ces résultats recoupent assez bien la première des trois valeurs de la colonne Keq du Tableau 12, employée dans le Nitronitropeu.

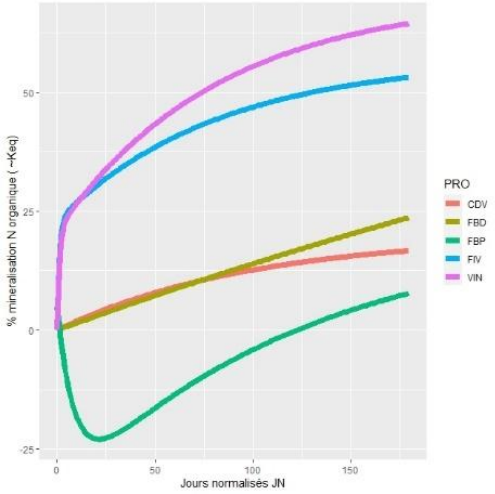


Figure 87 : Modélisation du % d'azote organique minéralisé (Keq) en fonction des jours normalisés pour différents apports : compost de

[251] Reprise en partie dans la feuille de calcul « Xpro » de l'outil Nitronitropeu.

déchets verts (CDV), fumier de bovin décomposé (FBD), fumier de bovin frais pailleux (FBP), fientes de volaille (FIV) et vinasse (VIN).

Pour ce qui est de résidus de culture, appelés « pièges à nitrates », c'est-à-dire des engrais verts que l'on utilise généralement pendant l'hiver pour les incorporer au printemps, la Figure 88 montre un effet initial d'immobilisation, suivi, selon le rapport C/N des cultures, d'une compensation par la minéralisation.

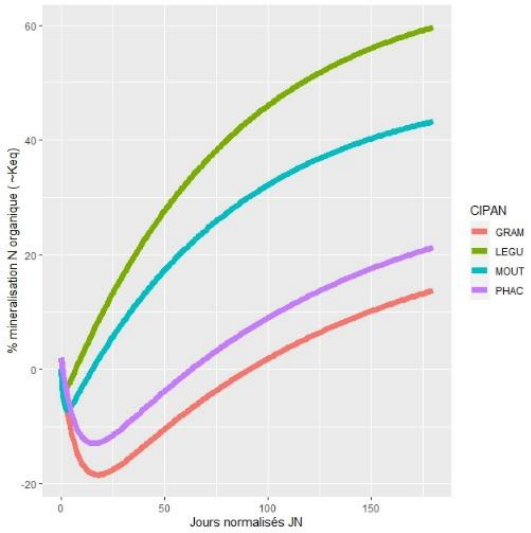


Figure 88 : Pourcentage de minéralisation de l'azote organique (Keq), selon des jours normalisés, pour différents résidus de culture : graminées (GRAM), légumineuses (LEGU), moutarde (MOUT) et phacélie (PHAC).

Méthodes agronomiques

Nous avons, jusqu'ici, considéré une culture unique, sans la relier véritablement, de façon stratégique, aux précédentes ou aux suivantes. Or, la fertilisation se conçoit également au niveau d'une rotation. Premièrement, des légumineuses (fabacées) sont souvent employées, qui vont laisser, après elles, de l'azote, à la fois dans le sol, et dans leurs résidus (et de façon concentrée dans leurs graines, qui sont généralement exportées). Deuxièmement, des cultures « pièges à nitrates » réduisent la lixiviation d'hiver, de 70 % d'après Tonitto et al. (2006). Troisièmement, il est possible d'alterner des cultures à faible enracinement (poireau avec 0.5 m de profondeur de racines) et fort

enracinement (chou jusqu'à 2.5 m de profondeur), pour explorer complètement le profil de sol.

La même complémentarité, entre légumes à petit et grand système racinaire, peut être exploitée spatialement, avec des cultures intercalaires, où des lignes d'alliacées alternent avec des lignes de choux[252].

Les espèces et les cultivars n'ont pas tous la même capacité à capter l'azote. Sur le long terme, des progrès génétiques sont espérés, afin de proposer des variétés améliorées. Mais il existe une technique ancienne, *à portée de main*, qui fonctionne aussi bien : il s'agit de la greffe, très classique sur les cucurbitacées et les solanacées. Des résultats ont montré l'intérêt de la technique, non seulement pour résister à des bioagresseurs, mais parfois aussi pour utiliser efficacement l'azote (Nawaz et al., 2016).

La compaction du sol peut également présenter un inconvénient qui est de réduire l'oxygène disponible et de potentiellement entraîner une dénitrification plus importante. À prendre en considération, donc.

6.6.4 Fertilisation phosphatée

Circulation du phosphore dans un agrosystème

Le phosphore est un macronutriment que l'on peut retrouver dans l'ADN, dans les vecteurs d'énergie que sont l'ADP et l'ATP, dans les phospholipides. Il est central dans la nutrition des plantes, et conséquemment, dans la fertilité des sols. Dès les premières années d'expérimentations à Rothamsted (Johnston & Poulton, 2019), il a été évident que le phosphore, apporté sous forme soluble[253], augmentait la production ; mais qu'il constituait également un élément limitant pour la réponse des plantes aux autres nutriments : l'azote au premier chef.

---

[252] On trouvera plus de renseignements sur ces associations dans le chapitre traitant des interactions végétales.

[253] Lawes fit des essais avec des os écrasés, qui ne furent guère concluants, contrairement à ceux menés avec du phosphate d'ammonium, qui est soluble. Il inventa, par la suite, un procédé pour créer, à partir d'os (et d'autres matériaux phosphorés), un engrais phosphaté soluble efficace : le superphosphate simple.

La circulation du phosphore dans l'agrosystème (Figure 89) est constituée, d'une part, de flux sortant et entrant dans le sol, et d'autre part, au sein du sol, de flux entre trois compartiments (minéral, organique mort et organique vivant *i.e.* microbes). Si, dans un milieu naturel, la circulation du phosphore est plus ou moins fermée, et on parle alors volontiers de cycle du phosphore, dans un agrosystème, une partie est immanquablement exportée, sous forme de récolte. Il est donc nécessaire de la remplacer, sous peine d'épuisement à moyen ou à long terme. Les fermes en agriculture biologique sont plus touchées par ce phénomène d'épuisement (Morel et al., 2006). Et ce, d'autant plus qu'elles fonctionnent en circuit fermé ; car, contrairement à l'azote qui peut être fixé depuis l'atmosphère, grâce aux légumineuses, il n'y a pas d'échange gazeux de phosphore. On ne peut que « déplacer » du phosphore dans l'exploitation[254].

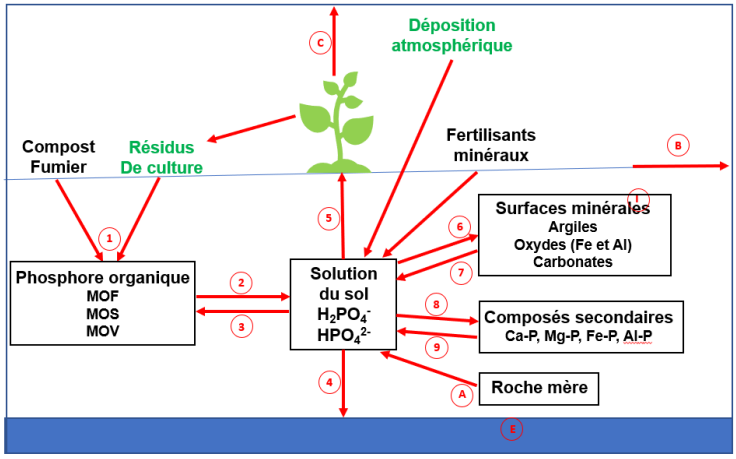


Figure 89 : Circulation du phosphore dans un agrosystème. 1/ décomposition, minéralisation et humification, 2/ minéralisation, 3/ immobilisation, 4/ lixiviation, 5/ absorption, 6/ adsorption, 7/.désorption, 8/ précipitation, 9/ dissolution, A/ érosion de la roche, B/ ruissellement et érosion du sol, C/ exportations.

---

[254] Une citation intéressante de Boussaingault (1881), relevée par Dumas (1965) : « En réfléchissant attentivement aux faits qui viennent d'être exposés, on se convaincra, contrairement à l'opinion courante, que le bétail n'est pas un producteur, mais un destructeur d'engrais ». Le bétail prélève en effet de l'herbe (ou d'autres végétaux), en immobilise une forte partie, qui risque de finir dans un hamburger, et en rejette des *résidus* qui peuvent alors être déplacés vers les surfaces cultivées.

Or, les imports se font majoritairement sous forme minérale, qui provient de l'extraction de roches phosphatées, dont les réserves se tarissent peu à peu. Le défi présent est d'utiliser de plus en plus d'apports organiques de phosphore, donc de mieux recycler, et d'améliorer les flux à l'intérieur du sol, pour éviter une accumulation de phosphore bloqué.

Flux entrants et sortants

Les sorties sont d'abord les prélèvements des cultures, et dans une bien moindre mesure, des phénomènes d'érosion, de ruissellement, d'écoulement latéral ou en profondeur.

Plus précisément, la culture absorbe du phosphore, sous forme orthophosphatée, dissoute dans la solution du sol ; une partie est exportée, lors de la récolte, pour consommation, et les résidus, aériens ou souterrains, peuvent être soit laissés en place (restitution), soit également exportés. À part dans des situations très particulières, avec des apports massifs, des terrains en forte pente ou des pluies conséquentes, les autres pertes sont négligeables. Le phosphore est un élément très bien retenu dans le sol, à tel point qu'il a été longtemps considéré comme tellement fixé, et qu'il fallait renouveler, chaque année, les apports de phosphore soluble (Johnston & Poulton, 2019). On sait dorénavant que la fixation est plus ou moins réversible.

Les entrées sont des engrais minéraux, des résidus de culture, des produits résiduaires organiques (fumiers, composts, boues, etc.), mais aussi de faibles dépôts atmosphériques.

Flux au sein du sol

On distingue le phosphore en phase solide et le phosphore en solution, essentiellement sous forme ionique, phosphore qui est celui disponible pour les plantes. Ces ions sont les orthophosphates $H_2PO_4^-$ ou HPO_4^{2-}, en parts variables selon le pH.

En ce qui concerne la phase solide, le phosphore est sous forme organique ou minérale. La majeure partie du phosphore est minérale, ce sont donc des processus physico-chimiques qui vont être prépondérants, plutôt que des processus biologiques, dans sa transformation. Dans les formes minérales, il y a des phosphates adsorbés, c'est-à-dire qui peuvent, encore assez facilement, être

désorbés (libérés), et d'autres qui sont précipités, avec des liaisons qui les fixent très fortement et dont la dissolution est plus difficile.

Les formes organiques peuvent être minéralisées en phosphates dans la solution, ou à l'inverse, les phosphates sont immobilisés, principalement par les microbes ; l'immobilisation peut être dominante et vider la solution de ses nutriments phosphatés, un peu à l'image de la faim d'azote. Bien que 30 % du phosphore dans le sol soit organique, le taux annuel de minéralisation n'est que de 0.5-1.5 kgP/ha (Johnston & Poulton, 2019), même si cela peut, quand même, monter à 8 kgP/ha, lorsque 100 tonnes/hectare de fumier de ferme ont été apportés, ou si une prairie a été retournée.

Bilan du phosphore

Les exportations de la culture, qui sont la sortie majeure, représentent 30 à 60 kgP/ha chaque année, si nous nous référons au tableau des besoins des cultures[255], disponible en annexes. Or, il y a, à l'implantation, environ 0.2 kgP/ha dans la solution du sol (COMIFER, 2017). Cela signifie que ce sont les flux venant de la partie solide (désorption, dissolution, voire minéralisation) qui vont devoir combler cet énorme différentiel.

Puisque c'est la partie inorganique qui prévaut, ce sont alors des phénomènes physico-chimiques de diffusion, des zones où le phosphore est le plus concentré vers celles où il l'est moins, qui vont compter. L'absorption des ions phosphates par les racines et les mycorhizes entraîne un gradient de concentration, qui va libérer de nouveaux ions, issus de la phase solide inorganique, vers la solution, et les rendre phytodisponibles. Si, à l'inverse, par un apport d'engrais minéral soluble, la concentration augmente dans la phase liquide, des ions phosphates vont rejoindre la phase solide. Les apports minéraux non-solubles ont un rôle marginal de diffusion.

Il va donc s'agir, essentiellement, de comparer la sortie, donc le prélèvement, et ce qui est libéré par la phase solide inorganique, sans trop compter sur les restitutions. Le modèle de Freundlich représente

[255] En succession de deux à trois par an, et attention, il faut diviser par 2.29 pour passer de l'unité P_2O_5 à l'unité P.

ce phosphore libéré, en fonction de la concentration dans la solution du sol et du temps :

$$P_r = v \times C^w \times (t/60)^d$$

avec P_r, la quantité d'ions phosphate diffusibles (mgP/kg de sol), C la concentration de P dans la solution du sol (mgP/L) et t la durée (sec.). La Figure 90 nous montre, pour deux sols, cette dynamique, avec la concentration[256] C=0.075. Sur une année, nous arrivons donc à des valeurs proches de P_r=100 mgP/kg, ce qui revient, pour 25 cm d'un sol de masse volumique ρ_D=1 400 kg/m^3 sur un hectare, à 100/1000/1000×0.25×1400×10000, soit 350 kg P/ha, ce qui semble largement suffisant[257] pour couvrir une sortie de 30 à 60 kgP/ha !

Johnston et Poulton (2019) proposent un modèle conceptuel des formes inorganiques du phosphore dans le sol, en quatre compartiments. Le premier est très petit : c'est le phosphore dans la solution du sol. Le deuxième est adsorbé en surface et facilement diffusible. On peut estimer la quantité représentée par ces deux compartiments, qui est celle aisément disponible aux plantes, par la méthode Olsen-P. Le troisième compartiment est formé de phosphore accumulé, au fil des apports, et est plus fortement fixé. Il est mesurable par des méthodes d'extraction plus puissantes. Il peut toutefois revenir, sur une longue période, dans le compartiment précédent, si celui-ci vient à se vider. Le quatrième compartiment est constitué de phosphore très fortement fixé, précipité ou appartenant à la roche-mère. Il ne peut devenir disponible qu'au cours d'une très lente érosion.

En fait, le problème de disponibilité se pose, avant tout, en début de culture. À ce moment, les racines sont très petites et ont du mal à explorer le sol, alors que le phosphore est un nutriment peu mobile. Il s'avère pourtant nécessaire d'avoir suffisamment de phosphate pour assurer la croissance initiale de la plante. Si une modeste fertilisation phosphatée soluble est appliquée, proche des racines, pour passer ce cap difficile, la plante, en grandissant et par ses mycorhizes, trouvera

---

[256] Que je prendrai comme référence, à la lecture du graphique 5.20, page 139, de COMIFER (2017).

[257] On n'observe parfois aucune réponse à la fertilisation phosphatée, tout bonnement parce qu'il y a déjà une fourniture satisfaisante par le sol !

par la suite tout le phosphore dont elle a besoin dans le sol (en fait dans sa solution), puisque nous avons vu qu'il n'en manquait pas. L'apport de phosphore se fera donc avant la culture, avec un éventuel travail du sol, qui le répartit dans tout le profil[258].

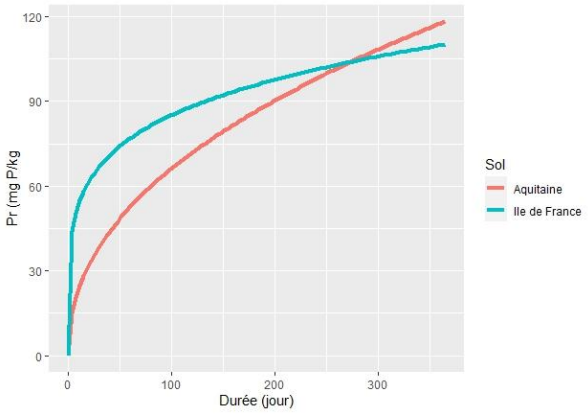


Figure 90 : Évolution de la quantité d'ions phosphate diffusibles dans deux sols français (COMIFER, 2017, tableau 5.9 p. 137).

Méthode des coefficients multiplicateurs

La technique la plus utilisée en France (dite COMIFER PKMg) pour gérer la fertilisation du phosphore, du potassium et du magnésium ne repose pas, comme pour l'azote, sur la description fine des divers flux (entrées et sorties du sol, minéralisation, fixation...) de ces éléments. Elle résulte d'une confrontation entre les exportations de la culture et la quantité évaluée dans le sol.

Concrètement, la quantité de l'élément dans le sol est estimée, par exemple, pour le phosphore, par une analyse P-Olsen, puis est située par rapport à un seuil d'impasse[259] (au-dessus duquel on fertilise rarement) et un seuil de renforcement (au-dessous duquel on fertilise fortement ; et entre ces deux seuils, on fertilise de façon...

[258] On considère parfois que l'apport en phosphore des engrais est peu efficient, car seulement 25 % est absorbé par la plante. Le reste vient du sol, du deuxième compartiment en particulier, et il faut bien le remplacer, si son réservoir est un peu « juste », ce qu'on peut estimer avec la mesure du Olsen-P. L'efficience est, dans ce cas, nettement plus élevée.

[259] Qui est différent selon la région de culture.

intermédiaire...). La situation, par rapport aux seuils, est croisée avec l'ancienneté du dernier apport fertilisant (0, 1 an, 2 ans et plus), et la sensibilité de la culture aux carences (appelée exigence, en trois niveaux). Un tableau, avec ces trois entrées, va alors fournir un coefficient K, pour multiplier les exportations prévues[260] , donnant la dose de fertilisation :

$$\text{Fertilisation} = \text{coefficient K} \times \text{Exportations.}$$

Quelle utilité pour le jardinier amateur ? Déjà qu'une analyse de sol de notre potager permet de se situer, avec l'aide des grilles régionales, par rapport aux seuils d'impasse et de renforcement. Et que le tableau des coefficients multiplicateurs donne une idée relative de la fertilisation nécessaire... ou pas.

Fertilisation phosphatée et mycorhizes

Les relations symbiotiques qu'entretiennent la plupart des légumes avec des champignons ont de nombreux intérêts. Ces légumes peuvent recueillir un peu plus d'eau, bénéficier de protections supplémentaires contre de multiples pathogènes, et surtout avoir un meilleur accès au phosphore. En effet, le réseau des hyphes est beaucoup plus étendu, ce qui est fondamental pour un phosphore peu mobile dans le sol. De plus, les ions phosphates diffusent plus rapidement dans les hyphes que dans les racines. Les champignons mycorhiziens sécrètent également des acides organiques qui désorbent les ions liés au sol. Certains, enfin, produisent des enzymes qui minéralisent le phosphate organique.

Dès lors, des comparaisons ont montré que des plantes mycorhizées, par rapport à des plantes identiques qui ne le sont pas, produisent nettement plus de biomasse. Planchette et al. (1983) ont déterminé que le pourcentage de dépendance de la plante à la mycorhization[261], est souvent élevé : 66 % pour la carotte, 58 % pour le poireau, 89 % pour le pois, 50 % pour la tomate ou 44 % pour la pomme de terre. Ce

---

[260] Exportations = rendement (tonne) × Masse sèche (tonne/tonne) × kg élément / tonne de masse sèche.

[261] (masse sèche de plants mycorhizés – masse sèche de plants non mycorhizés) / masse sèche de plants mycorhizés. Tous les plants disposent de la même quantité de phosphore disponible, ici 100 µgP (disponible) par gramme de sol.

coefficient de dépendance varie en fonction de la quantité de phosphore disponible. En gros, il est très élevé lorsque le niveau de phosphore disponible est bas dans le sol, mais diminue jusqu'à s'annuler dans un sol très riche. C'est pourquoi la réponse à la fertilisation phosphatée est différente entre une plante mycorhizée et la même qui ne l'est pas (*cf.* Figure 91).

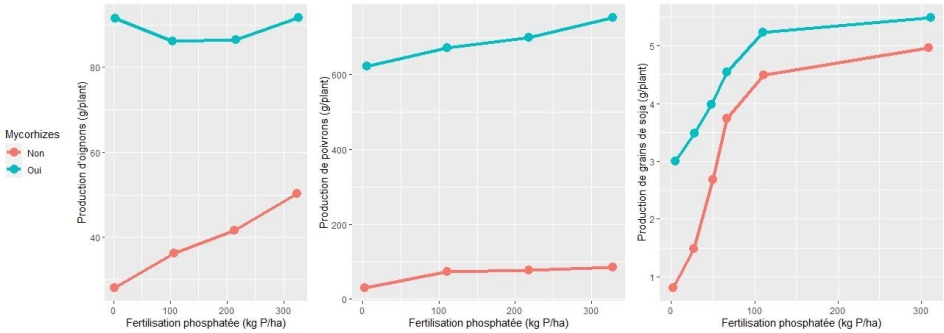


Figure 91 : Comparaison de l'effet d'une fertilisation phosphatée sur des légumes mycorhizés ou pas (Données tirées de Elbon & Whalen, 2015).

En fait, les populations de champignons mycorhiziens baissent avec la richesse du sol en phosphate. Cela est dû à la plante-hôte, qui peut alors recueillir suffisamment de phosphore, sans l'aide de personne, et n'a pas besoin de partager une partie de son carbone avec un associé inutile (Elbon & Whalen, 2015).

Une des conclusions de tout cela, est que les mycorhizes peuvent compenser une faible fertilisation phosphatée. Comment s'y prendre ? Une première méthode est d'inoculer ces champignons (du genre *Glomus*), ce qui se fait dans certaines cultures sous serre. Il est plus raisonnable, pour le jardinier amateur, de miser sur des souches indigènes. Il est donc clair qu'il ne faut pas exagérer la fertilisation phosphatée, qu'il convient de limiter les perturbations du sol, sol qui doit être cependant suffisamment aéré, humide et à une température confortable pour ces organismes. De rares familles, comme les brassicacées et certaines amaranthacées, ne sont pas mycorhizées : les cultiver trop souvent n'est pas favorable aux populations de tels champignons. Inversement, certaines plantes entretiennent très bien les champignons mycorhiziens, et peuvent être employées en culture de

couverture, en interculture ou dans des rotations avec les deux familles précédentes. Il est possible, pour des semis indirects, d'inclure dans le substrat des mycorhizes[262], qui pourront démarrer dès la plantation ; le procédé semble particulièrement efficace avec les alliacées.

6.7 Quelques réflexions sur la fertilisation organique

La fertilisation, en agriculture biologique, est basée sur les matières organiques. Selon les approches, les contraintes sont parfois encore plus fortes, et ces matières doivent alors, impérativement, être issues de la ferme, ou au moins produites localement. Les produits à minéralisation lente, comme les fumiers et le compost, sont favorisés, suivant le principe que cette fourniture indirecte au sol et à ses organismes, va permettre une meilleure qualité des cultures et maintenir, à long terme, la fertilité du sol.

Le premier problème est que ces amendements ont un taux très faible de nutriments par rapport à leur masse fraîche, et que leur rapport C/N est souvent élevé. Or, les légumes ont de gros besoins en azote (par rapport aux céréales), et plusieurs cultures peuvent se succéder dans l'année, multipliant cette demande. Primo, ces produits ont souvent un faible contenu en azote, parce que ce sont des *résidus*[263], parce que leur compostage a entraîné une grande perte (40-60 %) et parce que l'épandage en surface des fumiers, voire des résidus d'engrais verts, entraîne des volatilisations importantes en ammoniac. Secundo, la part de l'azote total qui est rendue disponible est, elle aussi, faible la première année (25-35 % pour les composts, et un meilleur 50-70 % pour les fumiers, selon leur provenance). Cet azote disponible peut être, lui-même, ce n'est pas propre aux fertilisants organiques, nitrifié ou lixivié, si les conditions ne sont pas optimales (compaction du sol, fortes pluies). Tertio, ce qui n'a pas été rendu disponible a de fortes

---

[262] Un peu de sol, d'une partie cultivée avec des plantes mycorhizées, peut faire l'affaire.

[263] Pensez-vous que l'arbre laisse beaucoup de nutriments dans les feuilles mortes, dont il se débarrasse, et que nous ramassons à la pelle ?

chances de disparaître pendant l'hiver ; même si des cultures pièges à nitrates sont mises en place, ce qui est récupéré n'est lui-même que disponible à 40 % l'année suivante, et donc largement perdu. On voit, d'une part, que des quantités considérables doivent être apportées pour parvenir, difficilement, à combler les besoins des cultures[264], ce qui explique, en partie, les rendements inférieurs de l'agriculture biologique. D'autre part, des quantités considérables vont s'échapper dans l'air ou dans l'eau, avec d'importantes conséquences environnementales. Les seules méthodes pour combler ce déficit sont d'utiliser des rotations avec des légumineuses (ce qui reste assez complexe dans la culture de légumes), ou des produits commerciaux à haute teneur en azote (plumes, sang, os...) qui proviennent souvent d'élevages industriels, ce qui n'est guère compatible avec l'esprit de l'agriculture biologique. Certaines approches nouvelles, qui n'auront pas forcément bonne presse biologique, peuvent aider : utilisation de la partie liquide des fumiers, des vinasses, des produits d'ensilage...

L'autre problème est que ces produits contiennent, par rapport à l'azote, des teneurs importantes en phosphore (et potassium, soufre...), si on les compare aux besoins des cultures. Il est à noter que, selon la nourriture fournie aux animaux d'élevage, le contenu des différents minéraux (dont l'azote) peut énormément varier. Or, ces éléments subissent beaucoup moins de pertes, et par rapport à la quantité totale apportée, ils seront complètement disponibles sur le long terme. On se retrouve donc avec un profond déséquilibre dans le sol, avec des quantités de phosphore très importantes. Ceci peut abaisser la qualité de la récolte (déficience en zinc), mais aussi entraîner des

---

[264] « many of the vegetables grown (e.g. cabbage, zucchini, celery, etc.) have a very high N demand which is nearly impossible to cover with solid farmyard manure and green manures » (Mömmer, 2018). Je sais que d'aucuns s'esbaudissent de la production des maraîchers de Paris au dix-neuvième siècle, mais citons-en un passage : « Ces chevaux sont employés à mener les légumes à la halle, de grand matin, et, en revenant, ils ramènent *une voiture de fumier : quelquefois, ils retournent en chercher plusieurs voitures dans la même journée* » dans Moreau, J. G., & Daverne, J. J. (1846). Manuel pratique de la culture maraîchère de Paris. Vve Bouchard-Huzard (page 30).

ruissellements, voire des lixiviations, très dommageables. Il arrive aussi que les amendements en fumier et compost augmentent largement le pH, ou que certains apports amènent beaucoup de soufre qui acidifie le sol. Enfin, comme évoqué précédemment, dans un sol très riche en phosphore, les plantes font moins appel aux mycorhizes. Dès lors, le sol est « moins vivant », et divers autres avantages procurés par les mycorhizes ne sont plus présents, comme la protection contre des champignons ou des nématodes pathogènes (Amarasiri, 1990).

Quel est le futur d'un système qui, structurellement, conduit à un déséquilibre en nutriments de son sol et à des pertes importantes en azote et en phosphore ? Möller termine son article sur « In conclusion, in highly specialized organic vegetable production systems in Northern and Central Europe, some of the core ideas of organic soil fertility management need re-design as current approaches, *based on ideas developed about 100 years ago*, are not appropriate if sustainable production is the goal ».

6.8 Changement climatique et santé chimique du sol

L'élévation du CO_2 dans l'atmosphère, avec un possible effet fertilisant, l'augmentation certaine des températures et de la variabilité des précipitations, vont demander des adaptations des pratiques agronomiques, afin de diminuer de probables impacts négatifs sur la production. Lehmann et al. (2013) étudient l'effet possible des pratiques de fertilisation azotée et d'irrigation, sur le rendement et le profit[265], d'une culture d'hiver (le blé) et d'été (le maïs), dans deux sites suisses, se différenciant essentiellement par leur régime de précipitations.

Il s'agit d'une modélisation complexe, mêlant modélisation de croissance des cultures, simulations de scénarios climatiques, modèle économique ; modélisation calibrée sur des données réalistes qui

[265] Mais aussi un compromis (utilité) entre le profit attendu et les risques entraînés par sa variabilité.

présentent nombre de limites[266], et je ne m'attarderai pas très longtemps sur le résultat, car le plus intéressant est le cadre conceptuel. L'effet du changement climatique va dépendre, premièrement, de l'importance de ce changement, qui va être différencié selon les lieux. Deuxièmement, il ne va pas impacter toutes les saisons, et toutes les cultures d'une saison, de la même façon. Troisièmement, toutes les pratiques agronomiques ne vont pas changer forcément de façon identique. Les résultats indiquent, par exemple, que, pour le maïs, l'irrigation va devenir fondamentale, particulièrement sur certains sites, alors que ce n'est pas le cas pour le blé d'hiver. En ce qui concerne la fertilisation azotée, elle aurait plutôt tendance à baisser dans l'ensemble des scénarios, mais les deux décisions ne sont évidemment pas indépendantes. En tout cas, leur gestion devra être encore plus raisonnée, en s'ajustant par exemple aux années pluvieuses ou à celles plus fraîches... qui devraient encore se produire. Quatrièmement, le modèle prend en compte les coûts : installer des systèmes d'irrigation, arroser, fertiliser restent des décisions à prendre en regard des bénéfices attendus (et des rivalités dans les usages de l'eau, mais aussi des rivalités dans les usages des énergies fossiles).

Globalement, les prédictions du modèle sont plutôt sombres, même en réagissant de façon optimale (ce qui n'est pas garanti) : la production et le profit baissent, pour tous les sites et toutes les saisons (et cultures). Et les auteurs indiquent qu'il va peut-être falloir soutenir financièrement les agriculteurs. Au niveau du potager, les conclusions sont que les pratiques du jardinier marseillais et du jardinier brestois vont sans doute devenir encore plus différentes, que la notion même de culture de saison est à repenser, et qu'une gestion plus fine des irrigations et fertilisations, basées sur des modèles inspirés des professionnels, mais simplifiés, ne restera peut-être pas qu'une marotte de scientifique maniaco-dépressif.

---

[266] Que seront les futurs progrès génétiques, les prix des inputs et des produits, les stress biotiques...

6.9 Références

Albornoz, F. (2016). Crop responses to nitrogen overfertilization: A review. *Scientia Horticulturae*, *205*, 79-83.

Balba, M. A., & Bray, R. H. (1956). The application of the Mitscherlich equation for the calculation of plant composition due to fertilizer increments. *Soil Science Society of America Journal, 20*(4), 515-518.

Boroujerdnia, M., & Ansari, N. A. (2007). Effect of different levels of nitrogen fertilizer and cultivars on growth, yield and yield components of romaine lettuce (Lactuca sativa L.). *Middle Eastern and Russian Journal of Plant Science and Biotechnology, 1*(2), 47-53.

Brevik, E. C. (2018). *A brief history of the soil health concept*. Soil Science Society of America: Madison, WI, USA.

Bruulsema, T. (2018). Managing nutrients to mitigate soil pollution. *Environmental Pollution, 243*, 1602-1605.

CA Bretagne (2008). *Fertilisation des légumes frais en plein champ*. Guide pratique.

COMIFER (2013). *Calcul de la fertilsation azotée*. Éditions COMIFER.

COMIFER (2017). *Guide de la fertilisation raisonnée* (2ème édition). France Agricole Éditions.

Cossani, C. M., & Sadras, V. O. (2018). Water–nitrogen colimitation in grain crops. *Advances in Agronomy, 150*, 231-274.

De Neve, S., & Hofman, G. (1996). Modelling N mineralization of vegetable crop residues during laboratory incubations. *Soil Biology and Biochemistry, 28*(10-11), 1451-1457.

Dhanoa, M. S., Sanderson, R., Cardenas, L. M., Shepherd, A., Chadwick, D. R., Powell, C. D., ... & France, J. (2022). Overview and application of the Mitscherlich equation and its extensions to estimate the soil nitrogen pool fraction associated with crop yield and nitrous oxide emission. *Advances in Agronomy, 174*, 269-295.

Dumas, J. L. (1965). Liebig et son empreinte sur l'agronomie moderne: Biographie sommaire de Liebig. *Revue d'hHistoire des Sciences et de leurs Applications, 18*(1), 73-108.

Elbon, A., & Whalen, J. K. (2015). Phosphorus supply to vegetable crops from arbuscular mycorrhizal fungi: a review. *Biological Agriculture & Horticulture, 31*(2), 73-90.

Elser, J. J., Bracken, M. E., Cleland, E. E., Gruner, D. S., Harpole, W. S., Hillebrand, H., ... & Smith, J. E. (2007). Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems. *Ecology Letters, 10*(12), 1135-1142.

Espinoza, L., Norman, R., Slaton, N., & Daniels, M. (????) *The nitrogen and phosphorus cycle in soil.s*. University of Arkansas, Division of Agrigulture, FSA-2148.

Fernandes, A. P. G., Machado, J., Fernandes, T. R., Vasconcelos, M. W., & Carvalho, S. M. P. (2021). Water and nitrogen fertilization management in light of climate change: Impacts on food security and product quality. In V. Kumar, A.K.Srivastava and P. Suprasanna (Eds.), *Plant nutrition and food security in the era of climate change* (p. 147-178). Academic Press. .

Fowler, D. B. (2003). Crop nitrogen demand and grain protein concentration of spring and winter wheat. *Agronomy Journal, 95*(2), 260-265.

Gheysari, M., Mirlatifi, S. M., Bannayan, M., Homaee, M., & Hoogenboom, G. (2009). Interaction of water and nitrogen on maize grown for silage. *Agricultural Water Management, 96*(5), 809-821.

Hartemink, A. E., & Barrow, N. J. (2023). Soil pH-nutrient relationships: the diagram. *Plant and Soil, 486*(1), 209-215.

Johnston, A. E., & Poulton, P. R. (2019). Phosphorus in agriculture: A review of results from 175 years of research at Rothamsted, UK. *Journal of Environmental Quality, 48*(5), 1133-1144.

Julien, J. L., & Tessier, D. (2021). Rôles du pH, de la CEC effective et des cations échangeables sur la stabilité structurale et l'affinité pour l'eau du sol. *Etude et Gestion des sols, 28*(1), 159-79.

Jaillard, B. (2001). *Flux de protons dans la rhizosphère et acidification des sols*. INRA, UMR Sol & Environnement

Lawlor, D. W., Lemaire, G., & Gastal, F. (2001). Nitrogen, plant growth and crop yield. In P. Lea and J.F. Morot-Gaudry (Eds.), *Plant nitrogen* (p. 343-367). Springer.

Lehmann, N., Finger, R., Klein, T., Calanca, P., & Walter, A. (2013). Adapting crop management practices to climate change: Modeling optimal solutions at the field scale. *Agricultural Systems, 117*, 55-65.

Machet, J. M., Dubrulle, P., Damay, N., Duval, R., Julien, J. L., & Recous, S. (2017). A dynamic decision-making tool for calculating the optimal rates of N application for 40 annual crops while minimising the residual level of mineral N at harvest. *Agronomy, 7*(4), 73.

Möller, K. (2018). Soil fertility status and nutrient input–output flows of specialised organic cropping systems: a review. *Nutrient Cycling in Agroecosystems, 112*(2), 147-164.

Mugwe, J., Ngetich, F., & Otieno, E. O. (2021). Integrated soil fertility management in sub-Saharan Africa: Evolving paradigms toward integration. Zero Hunger. In W. Leal Filho (Ed.), *Encyclopedia of the UN Sustainable Development Goals* (p.1-12). Springer.

Nawaz, M. A., Imtiaz, M., Kong, Q., Cheng, F., Ahmed, W., Huang, Y., & Bie, Z. (2016). Grafting: a technique to modify ion accumulation in horticultural crops. *Frontiers in Plant Science, 7*, 1457.

Neina, D. (2019). The role of soil pH in plant nutrition and soil remediation. *Applied and Environmental Soil Science, 2019*(1), 5794869.

Néron, F. & Alletto, L. (2023). *Petit précis d'agronomie*. Éditions France Agricole.

Neuweller, R., & Krauss, J. (2017). Fertilisation des cultures maraîchères - Agroscope. *Recherche Agronomique Suisse, 8* (6).

Plenchette, C., Fortin, J. A., & Furlan, V. (1983). Growth responses of several plant species to mycorrhizae in a soil of moderate P-fertility: I. Mycorrhizal dependency under field conditions. *Plant and Soil, 70*, 199-209.

Schmidhalter, U. (2005). Development of a quick on-farm test to determine nitrate levels in soil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 168*(4), 432-438.

Seghouani, M., Bravin, M. N., & Mollier, A. (2024). Crop response to nitrogen-phosphorus colimitation: Theory, experimental

evidences, mechanisms, and models. A review. *Agronomy for Sustainable Development, 44*(1), 3.

Sinclair, T. R., & Park, W. I. (1993). Inadequacy of the Liebig limiting-factor paradigm for explaining varying crop yields. *Agronomy Journal, 85*(3), 742-746.

Sinclair, T. R., & Rufty, T. W. (2012). Nitrogen and water resources commonly limit crop yield increases, not necessarily plant genetics. *Global Food Security, 1*(2), 94-98.

Sperfeld, E., Raubenheimer, D., & Wacker, A. (2016). Bridging factorial and gradient concepts of resource co-limitation: towards a general framework applied to consumers. *Ecology Letters, 19*(2), 201-215.

Spurway, C.H. (1941). Soil Reaction (pH) Preferences of Plants. *Michigan State University Agricultural Experiment Station, Special Bulletin, 306* (35 pages).

Stirbet, A., Lazár, D., Guo, Y., & Govindjee, G. (2020). Photosynthesis: basics, history and modelling. *Annals of Botany, 126*(4), 511-537.

Tei, F., De Neve, S., de Haan, J., & Kristensen, H. L. (2020). Nitrogen management of vegetable crops. *Agricultural Water Management, 240*, 106316.

Tonitto, C., David, M. B., & Drinkwater, L. E. (2006). Replacing bare fallows with cover crops in fertilizer-intensive cropping systems: A meta-analysis of crop yield and N dynamics. *Agriculture, Ecosystems & Environment, 112*(1), 58-72.

Vanlauwe, B., Bationo, A., Chianu, J., Giller, K. E., Merckx, R., Mokwunye, U., ... & Sanginga, N. (2010). Integrated soil fertility management: operational definition and consequences for implementation and dissemination. *Outlook on Agriculture, 39*(1), 17-24.

Vigil, M. F., & Kissel, D. E. (1991). Equations for estimating the amount of nitrogen mineralized from crop residues. *Soil Science Society of America Journal, 55*(3), 757-761.

Waggoner, P. E., & Norvell, W. A. (1979). Fitting the Law of the Minimum to Fertilizer Applications and Crop Yields 1. *Agronomy Journal, 71*(2), 352-354.

Wallace, A. (1994). Soil acidification from use of too much fertilizer. *Communications in Soil Science and Plant Analysis, 25*(1-2), 87-92.

Yan, Z., Liu, P., Li, Y., Ma, L., Alva, A., Dou, Z., ... & Zhang, F. (2013). Phosphorus in China's intensive vegetable production systems: overfertilization, soil enrichment, and environmental implications. *Journal of Environmental Quality, 42*(4), 982-989

6.10 Ctrl-R

```
#####################################
########## CALCUL DE JOURS NORMALISES
#####################################

f<-function(T){
exp(0.115*(T-15))
}
f(c(5,15,25))

g<-function(W){
0.2+0.8*(W/100)
}
g(c(60,80,100))

f(c(5,15,25))*g(60)
f(c(5,15,25))*g(80)
f(c(5,15,25))*g(100)

require(nasapower)
daily_data <- get_power(
 community = "ag",
 lonlat = c(4.6633554,45.8179161),
 pars = c("T2M_MIN", "T2M_MAX", "T2M"),
 dates = c("2010-01-01", "2022-12-31"),
 temporal_api = "daily")
daily_data<-as.data.frame(daily_data)

Tm<-tapply(daily_data[,10],daily_data[,6],mean)

# culture de printemps
require(lubridate)
d1<-as.Date("15-03-1992" , format = "%d-%m-%Y")
dd1<-yday(d1)
d2<-as.Date("15-05-1992" , format = "%d-%m-%Y")
dd2<-yday(d2)
```

```
JN1<-sum(f(Tm[dd1:dd2]))*g(80)
JN1

# culture de printemps avec couverture (+2°C)
sum(f(Tm[dd1:dd2]+2))*g(80)

# culture d'été

d3<-as.Date("01-08-1992" , format = "%d-%m-%Y")
dd3<-yday(d3)
d4<-as.Date("01-10-1992" , format = "%d-%m-%Y")
dd4<-yday(d4)


JN2<-sum(f(Tm[dd3:dd4]))*g(70)
JN2

### Calcul Mr version COMIFER (2017)
Km<-function(A,Ca){
22750/((110+A)*(600+Ca))
}
Km(200,10)

tNorg<-function(pcNt,BD=1.4,h=25){
pcNt*BD*h
}

percentNt<-function(pMO=3){
pC<-pMO/2
pN<-pC/9
pN}

pcN<-percentNt(3)
pcN
tNorg(pcN,1.4,25)
tNorg(pcN,1.4,25)*Km(200,10)*JN1

tNorg(pcN,1.4,25)*Km(200,10)*JN2


### Keq en fonction des jours normalisés pour quelques PRO
Mpro<-function(t,N0,k,l,a,b,c){
N0*(a-b*exp(-k*t)-c*exp(-l*t))
}

t<-0:180
x<-rep(t,5)
y<-c(Mpro(t,100,0,0.01,0.2,0,0.2),
Mpro(t,100,0.025,0.0015,1,0,1),
Mpro(t,100,0.117,0.008,0.21,-0.4,0.56),
Mpro(t,100,0.86,0.0121,0.57,0.23,0.34),
Mpro(t,100,0.86,0.0121,0.7,0.21,0.49))
PRO<-rep(c("CDV","FBD","FBP","FIV","VIN"),rep(181,5))
dataset<-data.frame(x,y,PRO)
```

```
require(ggplot2)
ggplot(data=dataset)+aes(x=x,y=y,color=PRO,group=PRO)+
theme_gray()+
ylab("% mineralisation N organique ( ~Keq)")+
geom_line(lwd=2.5)+
xlab("Jours normalisés JN")

# Keq pour JN1=28.4 (exemple laitue) avec CDV, FBD et FIV
Mpro(28.4,100,0,0.01,0.2,0,0.2)
Mpro(28.4,100,0.025,0.0015,1,0,1)
Mpro(28.4,100,0.86,0.0121,0.57,0.23,0.34)
```

7 Santé biologique du sol

7.1 Biodiversité du sol

Il reste une composante du sol que nous n'avons, jusqu'alors, fait qu'évoquer : les êtres vivants qui l'habitent. Anthony et al. (2023) pointent la nécessité de compter la vie, six pieds sous terre, comme seule façon de saisir ses éventuelles variations. Variations à un niveau global : il s'agit de savoir si l'extinction massive des espèces se produit aussi dans le sol. Variations au niveau du potager : elles vont nous renseigner sur sa « santé ».

Mais compter, cela permet surtout de se rendre compte que... nous n'y connaissons pas grand-chose ! Rien d'étonnant à cela, étudier la vie du sol est difficile : elle est « cachée » et majoritairement microscopique. Moins de 3 % de la littérature scientifique en écologie lui est consacrée (Pritchard, 2011) ! Le décompte le plus simple s'appelle la richesse spécifique : il s'agit tout bonnement d'énumérer le nombre d'espèces présentes. La première difficulté est que le concept d'espèce le plus usité, celui d'espèce biologique, est lié à la reproduction sexuée. Or, de nombreux microbes du sol ont une reproduction asexuée. Pour les bactéries, par exemple, on doit finalement se baser sur des analyses de séquences d'ADN, afin de les différencier. Pire encore, pour les virus des bactéries, peut-être 1000 fois plus nombreux que ces dernières, la notion même d'espèce est discutée. Bref, ce sont surtout les espèces au-dessus du sol ou les espèces marines qui ont été étudiées : les estimations pour les virus, les bactéries et les protistes du sol sont probablement très loin du compte.

Si on met de côté ces *difficultés mineures*, les résultats sont étonnants : pour les microbes, on estime ainsi[267] (Anthony et al., 2023) à 430 000 000 le nombre d'espèces chez les bactéries, à 5 600 000 chez les champignons, à 36 000 chez les archées et à 83 000 chez les

[267] Les nombres, *in extenso*, donnent, à mon sens, une meilleure idée que les puissances de dix... À noter que la biodiversité des sols est mal échantillonnée dans certaines parties du monde, et dans le profond sous-sol qui pourrait aussi nous réserver des surprises.

protistes. Bien entendu, seule une petite partie de ces espèces est effectivement identifiée, voire « cultivée » ! On ne les a donc pas comptées directement... mais par le truchement de techniques statistiques ; la biodiversité microbienne du sol n'est en fait apparue, dans toute son ampleur, que très récemment : à l'avènement du séquençage moléculaire. Pour les macrobes, nous en sommes à 2 100 000 espèces chez les arthropodes, 465 000 chez les nématodes, 34 000 chez les mollusques, 6 770 chez les annélides et 250 espèces chez les mammifères (quand même !). Je n'y ajoute pas les plantes, ni les virus. Au total, 59 % des espèces de la planète Terre vivraient dans le sol !

Mais qu'en est-il de l'abondance de ces groupes ? Là, cela dépasse les compétences numériques humaines : pour les bactéries, c'est de l'ordre de 2 000 000 000 par centimètre cube ! Même si les vers de terre sont environ 500 par mètre carré, ce sont bien les microbes (et les racines) qui constituent, et de loin, la plus grande part de la biomasse vivante du sol (Figure 92).

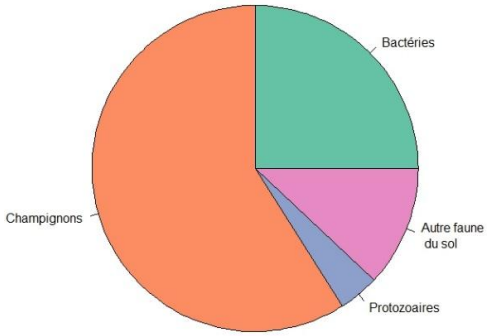


Figure 92 : Biomasse (%) des principaux groupes d'organismes du sol, d'après Gobat et al. (2010).

On classe parfois les organismes du sol en fonction de leur taille, en séparant la microflore (bactéries et champignons), la microfaune (protistes et nématodes), la mésofaune (collemboles, acariens et quelques vers) et la macrofaune (carabes, lombriciens, mammifères, etc.). On utilise également la place dans le réseau trophique (Nielsen

et al., 2015) qui permet de distinguer trois grands groupes d'espèces : celles de la détritusphère décomposent la matière organique ; celles de la rhizosphère sont en interaction avec les plantes, et leur fournissent le produit de la décomposition minéralisée, fixent directement l'azote atmosphérique ou participent à leur défense ; enfin, celles qui régulent l'abondance des deux premiers groupes, en les prédatant.

Tous ces groupes participent, à leur manière, aux grands cycles biogéochimiques : du carbone, de l'azote et du phosphore. C'est à ce titre que nous allons à présent tenter de les mieux connaître et de savoir *qui fait quoi dans le sol*.

7.2 Fonctions assurées par la biodiversité du sol

Notons que nous n'évoquerons ici que les organismes bénéfiques, et que les pathogènes seront décrits dans un chapitre ultérieur, consacré aux bioagresseurs[268]. On n'abordera pas non plus le rôle de la mésofaune[269].

7.2.1 Bactéries

Êtres microscopiques (~1 µm), généralement unicellulaires, en forme de sphère ou de bâtonnet, les bactéries sont des procaryotes (sans noyau dans la cellule). Elles sont le plus souvent aérobies, mais peuvent être anaérobies. Certaines, comme les cyanobactéries, sont

---

[268] Certains auteurs, comme Pritchard (2011), soulignent que la dichotomie « bénéfiques versus pathogènes » est une grossière simplification. Ainsi, les symbioses des plantes avec les champignons et les bactéries, forment un continuum entre parasitisme et mutualisme.

[269] Je renvoie le lecteur à 1/ Rusek, J. (1998). Biodiversity of Collembola and their functional role in the ecosystem. *Biodiversity & Conservation*, *7*, 1207-1219. 2/ Gulvik, M. E. (2007). Mites [Acari] as indicators of soil biodiversity and land use monitoring: a review. *Polish Journal of Ecology*, *3*(55). 3/ Pelosi, C., & Römbke, J. (2016). Are Enchytraeidae (Oligochaeta, Annelida) good indicators of agricultural management practices?. *Soil Biology and Biochemistry*, *100*, 255-263.

autotrophes[270]. Les bactéries se reproduisent de façon asexuée, par division, et à un taux invraisemblable. Leur biomasse peut en effet doubler en 20 minutes, ce qui explique leur facilité à reconquérir un milieu perturbé, tel qu'un sol labouré.

Les bactéries fixatrices d'azote atmosphérique (genre *Rhizobium*) peuvent vivre en symbiose avec certaines plantes. Elles sont responsables d'entrées très importantes d'azote (65 % d'après Hayat et al., 2011). Les fabacées sont ainsi employées pour récupérer cet azote, et le mettre à disposition des cultures suivantes ou même des cultures voisines (typiquement les céréales[271]).

D'autres bactéries fixatrices d'azote sont libres (genres *Azotobacter*, *Azospirillum*...) et vivent dans la rhizosphère. Encore d'autres bactéries (genres *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Paenibacillus*...) visent, elles, à solubiliser le phosphore minéral, souvent immobilisé, et à le rendre disponible aux plantes ; certaines minéralisent également le phosphore organique. De nombreuses bactéries de la rhizosphère produisent des composés (auxine, gibbérelline, acide abscissique...) permettant aux plantes de croître plus facilement, en développant leurs racines en particulier. Enfin, certaines aident les plantes à mieux résister aux pathogènes et sont employées par les agronomes dans des stratégies de biocontrôle.

Des bactéries sont occasionnellement inoculées dans le sol, comme pour le soja qui ne possède pas, en Europe, les symbiotes indigènes adéquats. Dans le cadre de la production de plants, cette inoculation peut se faire au sein du substrat, ce qui leur donne un « coup d'avance ». Il existe aussi des expérimentations où des graines sont directement inoculées.

Quelles sont les conditions de vie convenant aux bactéries ? Pour commencer, elles sont particulièrement sensibles au pH. Ensuite, Pietikäinen et al. (2005) montrent que le taux de croissance des bactéries est minimal vers -8 °C, optimal autour de 25-30 °C et

---

[270] Je n'en parlerai pas, par la suite, de même que des algues, eucaryotes autotrophes. Ces organismes participent surtout à la formation du sol en altérant des minéraux et en produisant des colles biologiques.

[271] De manière générale, les effets des bactéries ont surtout été étudiés sur les plantes de grandes cultures, et rarement pour les légumes.

retourne au minimum vers 45 °C. Les champignons ont la même plage optimale d'activité, mais ils sont plus tolérants au froid, avec un minimum à -12 °C, et moins tolérants au chaud avec un maximum à 40 °C. À la louche, l'activité microbienne, tant bactérienne que fongique, est dix fois plus élevée dans la plage optimale qu'à 0 °C.

La température du sol présente certes moins d'amplitude que celle de l'air, mais est « en retard » par rapport à celle-ci[272]. Ceci permet de comprendre pourquoi l'activité microbienne, réduite au printemps par ce facteur température, entraîne que le démarrage puisse être lent[273] chez les jardiniers se reposant uniquement sur ces microbes pour la fertilisation (méthodes dites de « sol vivant »). On saisit, dans ce cas, l'intérêt d'une fertilisation ponctuelle, dite « coup de fouet », ou d'un chauffage du sol par des techniques de bâchage ou de tunnels. Le problème de l'été repose sur un autre facteur essentiel de l'activité microbienne, qui est la présence d'humidité. Un jardinage sur sol vivant fonctionnera alors moins bien sans irrigation, non seulement du fait du manque d'eau pour les plantes, mais également du manque d'eau pour les organismes qui les nourrissent ! En revanche, l'automne apparaît comme une saison privilégiée, en combinant naturellement les deux facteurs. Le principe du sol vivant est, non seulement de cultiver des légumes, mais de veiller, en même temps, à élever des organismes du sol, pour le faire correctement.

7.2.2 Champignons

Les champignons (eumycètes) sont des eucaryotes unicellulaires ou pluricellulaires. Ils sont aérobies et hétérotrophes. Leur appareil végétatif, dit mycélium, est particulièrement ramifié, constitué de filaments très fins (les hyphes). Le mycélium peut s'étendre sur plusieurs mètres, voire plusieurs hectares (Bridge & Spooner, 2001). Ce réseau, très dense, leur permet d'explorer le sol plus complètement que

---

[272] L'activité majeure de ces organismes se déroule proche de la surface, ce qui atténue un peu cet effet de retard.

[273] Du fait du manque de minéralisation de l'azote, en particulier, nous y reviendrons.

ne le font les racines des plantes. Leur reproduction peut être sexuée ou asexuée, selon les espèces.

Trois groupes fonctionnels sont distingués (Frąc et al., 2018). Le premier sert à réguler l'écosystème, particulièrement en améliorant la structure du sol : soit au niveau des microagrégats par la production de glomaline (colle biologique), soit au niveau des macroagrégats en les maintenant par le réseau des hyphes. Le deuxième groupe est responsable des décompositions et transformations de la matière organique : ce sont les champignons saprophytes, certains étant les seuls adaptés à la décomposition de la lignine, et donc à fournir un humus stable (qui améliore encore la rétention de l'eau, des nutriments et la structure du sol). Le troisième groupe sert au contrôle biologique : en particulier les champignons mycorhiziens qui sont en étroite relation avec les plantes, et qui leur fournissent des nutriments, de l'eau et des protections contre divers pathogènes. On trouvera dans Christensen (1989) une description plus complète, avec une vingtaine de fonctions que remplissent les champignons. Mais, pour conclure, en termes de chaîne alimentaire, les champignons constituent la nourriture de base de protistes ou de nématodes.

La biodiversité des champignons est principalement affectée par la communauté végétale (son importance et sa composition[274]), l'humidité du sol (donc l'irrigation) et diverses pratiques agronomiques. Ainsi, l'intensité du travail mécanique du sol détruit les réseaux d'hyphes, qui s'en remettent moins rapidement que n'y parviennent les bactéries : ces dernières dominent alors la place. L'apport de matière organique plus carbonée a, en revanche, tendance à les avantager. La fourniture d'engrais phosphatés diminue la mycorhization.

Diverses expérimentations ont montré que l'inoculation de champignons mycorhiziens était bénéfique. De plus en plus de combinaisons d'inoculations, sont mises au point, comme des bactéries

[274] Il y a certains champignons qui sont spécialistes pour les mycorhizations, et certaines plantes cultivées, comme les brassicacées ou certaines amaranthacées, qui n'ont pas de mycorhizes.

solubilisant le phosphore (ou fixatrices d'azote), couplées avec des champignons mycorhiziens.

7.2.3 Protistes

Bienvenue en terre inconnue : nous avons vu que la biodiversité du sol ne nous était pas familière, mais les protistes sont sans doute les plus ignorés[275]. Ceci explique le silence, presque absolu, des ouvrages agronomiques ou de jardinage, à leur sujet.

Les protistes sont des organismes microscopiques, le plus souvent unicellulaires, et sont des eucaryotes. Ils contiennent les branches les plus simples des plantes, des animaux et des champignons, ce qui en fait un groupe paraphylétique incroyablement diversifié : formant, en tout cas, le gros de la biodiversité eucaryote. Les variations sont morphologiques, mais aussi physiologiques ; on trouve dans ce groupe aussi bien des autotrophes, des hétérotrophes (les protozoaires), que des mixotrophes. Leur reproduction peut être sexuée ou asexuée. Au total, le nombre d'espèces du groupe est estimé à plusieurs millions !

Un groupe aussi abondant que diversifié doit bien servir à quelque chose... ce qu'exposent, de façon très convaincante, Geisen et al. (2020) dans « Soil protist life matters! » Les protistes autotrophes du sol fixent du carbone, ils sont très importants en sol non-couvert ou en sol pauvre. La plupart des protistes du sol sont en fait des consommateurs de bactéries, mais aussi de champignons. Ils régulent ces groupes et libèrent pour les plantes des nutriments immobilisés (dans la flore microbienne). Pour continuer sur le réseau trophique, ils sont consommés par la mésofaune. Mais il arrive aussi que la petite bête mange la grosse, et beaucoup de protistes sont des parasites redoutables qui influent sur les populations du sol et... sur les êtres humains, comme avec la malaria, causée par le protiste *Plasmodium falciparum*. Enfin, certains sont des pathogènes des plantes, le plus célèbre étant le mildiou de la pomme de terre (*Phytophthora infestans*).

Au regard de notre niveau de connaissance, il est prématuré d'envisager « d'utiliser », pour des stratégies agronomiques, les

[275] C'est moins vrai pour les protistes marins, qui ont été plus étudiés.

protistes du sol. Une chose est sûre : ils ont, avant toute chose, besoin d'un milieu humide. Ils semblent être les organismes les plus sensibles à la qualité du sol et à la santé des plantes : c'est, par conséquent, en tant que bio-indicateurs qu'ils pourraient s'illustrer en premier. Geisen et al. (2020) concluent, en disant que deux autres importantes branches du vivant : les archées et les virus, méritent probablement plus d'attention, pour mieux saisir ce qu'est la biodiversité du sol.

7.2.4 Nématodes

Les nématodes sont des sortes de vers de couleur claire, passant par plusieurs stades larvaires, qui appartiennent au règne animal. Ils en forment d'ailleurs la composante la plus abondante. Ils ont été bien étudiés, car une partie d'entre eux (plus de 4 000 espèces) sont des parasites des plantes et sont responsables de 12 % de la perte de la production (Barker et al., 1994) ; mais aussi parce que leur taille a permis, dès le dix-neuvième siècle, des observations plus simples que pour les microbes. Les nouvelles techniques moléculaires autorisent cependant une exploration plus rapide et plus efficace. *La majorité des nématodes sont en fait bénéfiques* (Neher, 2001). Ils sont classés en cinq groupes trophiques : bactérivores, fongivores, prédateurs, omnivores[276], plus les fameux parasites des plantes. Ils sont également souvent répartis en fonction de leur cycle de vie, avec un cycle court et prolifique,pour certains (bactérivores, on parle de stratégie *r*), et un cycle plus long et à plus faible capacité reproductive pour d'autres (chez les plus grands de type prédateurs, on parle de stratégie *K*).

La plupart des nématodes sont bactérivores ou fongivores, et servent à réguler ces populations. Ils jouent donc un rôle dans la minéralisation, puisqu'ils mettent à disposition des plantes l'azote qui était immobilisé dans la flore microbienne. On considère que cela puisse représenter jusqu'à 19 % de l'azote minéralisé (Neher, 2001). Ils ont également un rôle dans la régulation des pathogènes : certains ont été utilisés pour le biocontrôle d'insectes ravageurs, en tant que parasites. Ils immobilisent également des nutriments, et sont enfin une nourriture intermédiaire importante dans le réseau trophique.

---

[276] On parle de nématodes libres pour ces quatre premiers groupes.

Ils sont très employés comme bio-indicateurs de la santé des sols (Lu et al., 2020), puisqu'abondants, bien connus, facilement observables (d'autant plus rapidement avec des techniques moléculaires), avec des fonctions bien établies et sont, de surcroît, sensibles aux modifications de la qualité du sol. Il existe ainsi tout un ensemble d'indicateurs qui permettent de repérer : si un sol est perturbé (les grands nématodes sont plus rares), ou s'il est dominé par les champignons ou les bactéries, avec les minéralisations qui s'en déduisent (rapport entre bactérivores et fongivores). Les systèmes de labour réduit ont une plus grande diversité de nématodes, mais souvent une plus grande abondance de nématodes pathogènes (Lazarova et al., 2021). Les systèmes fertilisés voient aussi le rapport bactérivores/fongivores augmenter. Enfin, ils sont de très bons indicateurs de la pollution des sols.

L'élimination, à l'aveugle, avec un nématicide, touche aussi les nombreux nématodes bénéfiques. Un travail du sol permet de contrôler les nématodes pathogènes des plantes ainsi, dans une moindre mesure, que l'apport de matière organique, comme du fumier (Lu et al., 2020). Si les nématodes ont grand besoin d'eau, ils sont toutefois bien plus résistants que les vers de terre à la sécheresse.

7.2.5 Vers de terre

Les vers de terre, ou lombriciens, sont des annélides. Près de 150 espèces sont présentes dans les sols français, où ils forment une biomasse importante. On les distingue en trois groupes écologiques : les épigés, de petite taille, vivent de la litière du sol, à sa surface ; les endogès, de taille moyenne, vivent au sein du sol, où ils se déplacent modestement, et se nourrissent de matière organique humifiée ; et les anéciques, de grande taille, qui se déplacent verticalement, en créant d'importantes galeries, qui enfouissent la matière organique de la litière, et qui produisent, à la surface, des déjections sous forme de turicules, mélange de minéraux, de matière organique décomposée et de microbes. On appelle drilosphère, la zone sous l'influence des vers de terre. Ils ont une bonne tolérance à l'acidité, et ne craignent que les terres très acides.

Le plus souvent, la reproduction des vers de terre est sexuée, mais ils sont hermaphrodites, ce qui permet une fécondation croisée. Si les

épigées, à cycle de vie court (quelques mois), produisent 300 cocons par an et sont capables de recoloniser rapidement un territoire, c'est moins le cas des anéciques, à cycle de vie long (quelques années), avec 15 cocons par an seulement.

La température et l'humidité du sol sont les deux facteurs clés du développement d'une population de vers de terre (Berry & Jordan, 2001), avec une source de nourriture, bien sûr. La température du corps des vers de terre est variable, selon leur environnement : ce sont des poïkilothermes. Ils cherchent donc à se réfugier dans des zones où elle est optimale (Singh et al., 2019). La plage de 15 °C à 20 °C semble la meilleure ; à 10 °C, ils sont moins gros, et vers 5 °C, leur activité est très diminuée ; au-delà de 25 °C, leur survie est compromise. Ils choisissent alors d'entrer en diapause ou en quiescence, et pour les anéciques, migrent vers des horizons plus profonds. Globalement, leurs activités se déroulent donc principalement au printemps et à l'automne.

On appelle les vers de terre les ingénieurs du sol, car ils contribuent fortement à sa structure : à la fois par effet de décomposition de la matière organique, de mélange des composants du sol et de création de galeries. L'effet de ces macroporosités, causées par les anéciques, sur l'infiltration de l'eau est largement démontré : ce qui contribue à limiter le ruissellement et l'érosion des sols. L'effet sur la rétention de l'eau est moins clair, car les macroporosités ont tendance à assécher, par évaporation, la surface du sol et à diriger l'eau en deçà des racines des plantes (et parfois à lixivier les nutriments). On considère, au final, l'effet des lombriciens sur la structure du sol et son fonctionnement hydraulique comme plutôt bénéfique.

L'effet, à court terme, des vers de terre sur le cycle des nutriments est souvent évoqué comme étant positif : avec des expériences où ils permettent de gagner 14 kg/h d'azote. Ils accélèrent la décomposition de la matière organique et la minéralisation, mais des résultats contradictoires existent (dénitrification et lixiviation observées, ralentissement de la minéralisation avec le temps), et sur le long terme, on ne sait pas vraiment, en définitive, si l'effet sur la matière organique et la disponibilité des nutriments est intéressant.

En présence de vers de terre, la production aérienne de biomasse augmente, mais pas la production racinaire. Ce, pour les raisons

précédentes sur la structure et la minéralisation, mais aussi parce qu'ils semblent encourager la production d'hormones de croissance des plantes et protéger leur santé. Ils paraissent avoir un effet de biocontrôle des ravageurs.

Les pratiques agricoles ont des retombées sur les lombriciens : le travail mécanique du sol, en premier lieu. Il a été montré que la houe rotative (une sorte de grand rotovateur) peut, en un seul passage, réduire leur population de 60 à 70 %, et que cinq années de labour entraînent une baisse de 80 % de leur population. C'est le fait de dommages directs, mais également de l'exposition aux prédateurs ou à des conditions difficiles, comme le gel ou le soleil. De plus, leurs galeries sont détruites, et la matière organique enfouie. Ce sont les anéciques et les juvéniles qui sont les plus touchés. En pratique, mieux vaut travailler le sol en hiver, plutôt qu'au printemps, pour la survie des vers de terre ; l'apport de matière organique a un effet positif ; les pesticides sont suspectés d'avoir un effet négatif, mais les études en plein champ sur le sujet manquent.

Vu leur lenteur de reproduction, les vers de terre sont parfois inoculés directement dans les parcelles ; ou alors avec une méthode particulière, dite Stockdill, qui consiste à prélever des blocs de terre dans des espaces fortement pourvus en lombriciens, puis à les insérer dans le sol. D'autre part, les vers épigés sont employés pour réaliser un vermicompostage ; le jus qui en est extrait est utilisé comme fertilisant dans la production de plants.

7.3 Respiration du sol

Les organismes du sol ne sont pas seulement appréhendés par leur nombre ou par les fonctions qu'ils assurent, mais également par l'intensité de leur activité. Il peut s'agir d'activité enzymatique, néanmoins, c'est d'ordinaire leur activité respiratoire qui est évaluée. Le dioxyde de carbone, relâché lors de la décomposition de la matière organique par les microbes, de la respiration des racines des plantes et de celle de la faune du sol, est un très bon indicateur de l'état biologique des sols (Bagnall et al., 2023). Il existe plusieurs méthodes

de mesure, mais la plus courante est l'incubation[277]. On parle, de façon plus imagée, de respiration du sol.

Si une faible respiration est l'indication, assez évidente, d'un sol qui ne fonctionne pas bien, une très forte respiration n'est pas forcément bon signe. Primo, un labour génère ainsi une explosion de la minéralisation par les bactéries, qui peut, d'une part, être lessivée, si elle n'est pas employée rapidement, et d'autre part, diminuer la matière organique stable sur le long terme. Secundo, la fertilisation peut rester immobilisée dans les organismes. Tertio, tous les organismes du sol ne sont, bien sûr, pas bénéfiques. Ces réserves, mises à part, voyons ce qui influe sur la respiration du sol.

En premier lieu, la température joue un rôle très important : on estime que la respiration du sol double, à peu près, tous les dix degrés (jusqu'à 35-40 °C). Conséquemment, la respiration du sol va suivre un cycle journalier et un cycle annuel (USDA-NRCS, 2014). Réchauffer plus rapidement le sol, au printemps, c'est « lancer » la minéralisation (*bis repetita*).

Sans surprise, l'eau intervient aussi, de façon primordiale, dans ce mécanisme biologique (Linn & Doran, 1984). La Figure 93 montre que la respiration est faible en terrain sec, est optimale vers la capacité au champ, puis baisse au-delà. Cette baisse provient d'un fait très simple : il vaut mieux avoir de l'oxygène pour respirer. Pire que cela, dans ce cas, les microorganismes utilisent les nitrates, plutôt que l'oxygène, vident le sol de ce nutriment essentiel, puis le rejettent dans l'atmosphère, parfois sous forme de gaz à effet de serre ! L'aération et la porosité du sol sont donc importantes. Les travaux de drainage ou l'irrigation ne sont pas destinés qu'aux plantes, mais aussi aux organismes qui structurent leur sol et leur fournissent des nutriments (*bis repetita*).

La quantité de matière organique augmente naturellement la respiration (Wang et al., 2003). Un sol bien pourvu, soit d'un fort pourcentage d'humus (minéralisation secondaire), soit par des apports de matière organique fraîche ou semi-décomposée (minéralisation primaire), générera plus d'activité respiratoire. Selon le rapport C/N

---

[277] Voir, par exemple, cette vidéo : https://www.youtube.com

des apports frais, ils seront plus ou moins rapidement décomposés, avec corrélativement une respiration plus ou moins intense.

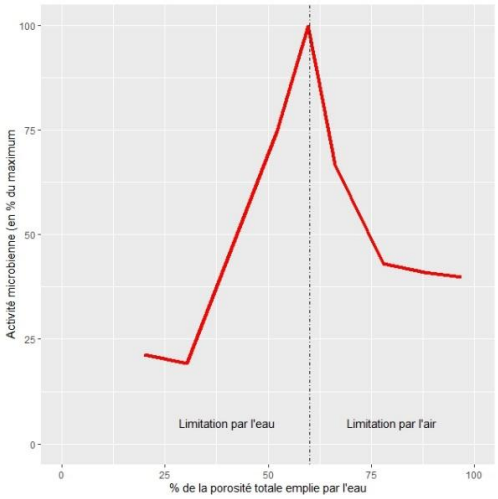


Figure 93 : Relation entre l'eau contenue dans le sol (en % de la porosité totale) et l'activité microbienne (en % du maximum). Données de Linn & Doran, 1984).

Au plan chimique, l'acidité (Adhikari et al., 2023) et la salinité (USDA-NRCS, 2014) ont un effet important sur l'activité microbienne, donc la respiration du sol, et par contre-coup, la disponibilité de nutriments pour les plantes. Les fertilisants de synthèse n'ont pas d'effets directs sur les organismes du sol, si ce n'est indirectement à travers l'acidification du sol (Bünemann et al., 2006). Mais ceci est contrebalancé par la plus grande production qui laisse donc plus de résidus, dont le bénéfice a été souligné.

La texture du sol, sur laquelle il est difficile d'agir, influence la respiration (USDA-NRCS, 2014) : les sols limoneux, avec leur plus grande capacité d'aération et de rétention d'eau, montrent usuellement la meilleure respiration ; elle est plus limitée en sol sableux (plus pauvre en eau et en nutriments) et en sol argileux (qui retient un peu trop bien les nutriments).

La respiration est également reliée à la structure du sol (diamètre pondéré des agrégats chez Adhikari et al., 2023), ce qui nous ramène à la porosité. C'est un problème central, traité en détail dans les sections suivantes, car s'ouvrent ici deux voies pour construire cette porosité : le travail mécanique du sol ou le travail biologique du sol (je n'aime

pas trop parler de non-travail du sol). Inversement, toute opération induisant de la compaction (travail sur un sol trop humide, passages répétés) va diminuer la respiration.

La Figure 94 représente, schématiquement, les facteurs influençant la qualité du sol comme habitat, et donc la respiration de ses habitants. Il est à noter que j'ai, jusqu'ici, essentiellement parlé de l'activité des microbes, mais la faune du sol qui se nourrit soit de la matière organique, soit des microbes (ou de leurs prédateurs), joue un rôle régulateur, et est très affectée par le travail mécanique du sol. Enfin, la présence de plantes a pour effet d'augmenter la respiration du sol, parce que leurs racines y respirent, bien sûr, mais aussi parce qu'elles entretiennent tous les organismes de la rhizosphère, qui respirent aussi.

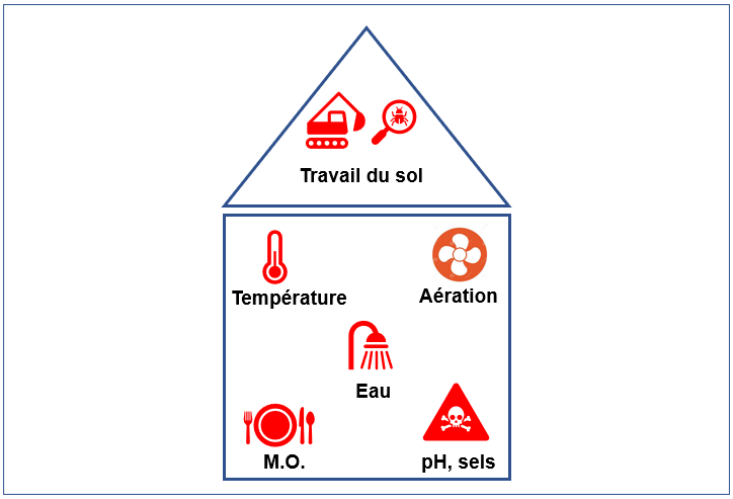


Figure 94 : Facteurs influençant la qualité de l'habitat des organismes du sol (M.O. = matière organique fraîche et décomposée). Même si nous mettons, ici, en avant les facteurs abiotiques, il est évident que les différents organismes du sol sont en interaction, et le rendent donc plus ou moins accueillant.

On ne peut faire l'impasse sur les effets des pesticides (Bünemann et al., 2006) : si celui des herbicides reste limité sur les organismes du sol, celui des insecticides est reconnu comme plus préoccupant (modification des abondances de bactéries et de champignons et réduction des collemboles) ; mais ce sont les fongicides qui ont l'effet le plus toxique, ils diminuent indistinctement les populations de champignons, y compris celles des très nombreux champignons

bénéfiques. Une réduction très nette des populations de vers de terre a également été observée avec l'utilisation de produits à base de cuivre, ce dernier restant, en outre, pour une longue durée, présent dans le sol.

7.4 Qu'est-ce que la santé biologique du sol ?

À un premier niveau, la biodiversité a déjà, en elle-même, un intérêt. Bien que peu *charismatique* (Albert et al., 2018), celle du sol représente tout de même près de 60 % de la biodiversité totale : la mesurer est donc cruciale. Nous avons vu que l'évaluation de l'état biologique du sol pouvait reposer : primo, sur la richesse spécifique, l'abondance ou la biomasse ; secundo, sur l'activité des organismes, comme leur respiration ; et tertio, sur une série d'indices, en combinant par exemple l'abondance de divers groupes de nématodes, pour approcher la biodiversité fonctionnelle.

À un deuxième niveau, il s'agit de déterminer ce qu'est un *bon sol*. La Société des Sciences du Sol Américaine a défini la qualité des sols comme « la capacité d'un type spécifique de sol à fonctionner, dans les limites d'un écosystème naturel ou un agrosystème, pour soutenir la productivité des plantes et des animaux, maintenir ou améliorer la qualité de l'air et de l'eau, et supporter la santé et l'habitat des êtres humains (Karlen et al., 1997) ». La qualité d'un sol est évaluée sur les fonctions qu'il remplit, et dès lors, ce sont à la fois l'état physique, l'état chimique et l'état biologique qui sont mesurés. Dans cette perspective, les organismes du sol sont donc des bio-indicateurs, signalant l'état de fonctionnement du système sol. Ils permettent de comparer diverses pratiques de gestion du sol, et de vérifier que l'agrosystème va dans la *bonne* direction.

Plusieurs problèmes existent cependant concernant ces mesures de qualité biologique. Premièrement, il convient de les standardiser, ainsi que leur protocole de collecte, pour permettre des comparaisons d'une étude à l'autre. Deuxièmement, il faut établir des limites entre l'acceptable – il faut bien gérer les cultures - et ce qui nuit réellement à la réalisation des fonctions du sol. Domsch et al. (1983), par exemple, considèrent une baisse de 30 % de l'activité biologique comme négligeable, et même une baisse de 90 % comme acceptable, si elle est suivie par une récupération dans les deux mois. Troisièmement, ces

mesures sont, de toute façon, complexes, car il y a une grande variabilité spatiale et temporelle de la présence de ces organismes, due à des facteurs édaphiques ou climatiques, sans compter la diversité même de ces organismes ! Enfin, si une augmentation des organismes du sol est généralement vue comme positive, nous avons souligné que cela peut entraîner des immobilisations des nutriments, mais aussi que les organismes pathogènes augmentent corrélativement, des phénomènes qui ne simplifient pas l'interprétation des résultats...

En tant que jardiniers amateurs, nous n'allons pas, à l'évidence, réellement mesurer la qualité biologique de notre sol, mais seulement prendre en considération les résultats scientifiques, montrant quelles pratiques ont été prouvées bénéfiques pour la biodiversité du sol, et donc pour sa qualité.

À un troisième niveau, les organismes du sol remplissent *effectivement* des fonctions essentielles du sol (décomposition, nutrition des plantes, structuration du sol), ils ne doivent plus seulement être considérés comme des bio-indicateurs, mais comme des *éléments moteurs* de la gestion de l'agrosystème : cette gestion prendra alors une tout autre tournure. On parle plutôt, dans cette optique, de santé du sol, car « elle envisage le sol comme *un système dynamique vivant*, dont les fonctions sont assurées par des organismes vivants, et qui demande une gestion et une conservation (Doran & Zeiss, 2000) ».

Dans les chapitres précédents, les choix de gestion (lumière, température, eau, vent, santé physique et santé chimique des sols) ont été volontairement présentés de façon assez utilitariste : ce qui fonctionne et ce qui ne fonctionne pas *pour la production*. Mais, quand on en vient à parler du sol et de ses habitants, on ne peut faire l'économie d'une discussion sur les conséquences plus globales de l'agriculture, et à notre petit niveau, du jardinage. La section qui suit porte sur le modèle agricole moderne, puis sur les modèles alternatifs qui ont été proposés : agriculture de conservation des sols, agriculture biologique ou agroécologie... L'une des oppositions fondamentales entre ces approches réside justement dans la façon dont le sol est considéré : est-il un sol-substrat ou un sol vivant ? C'est un peu caricatural, j'en conviens, les sociologues ont heureusement une astuce de langage pour le cacher : ils parlent plus volontiers de paradigmes.

7.5 Paradigmes terrestres

7.5.1 Agriculture conventionnelle

Beus et Dunlap (1990) exposent clairement comment, à cette date, la supériorité de l'agriculture moderne commence à être sérieusement remise en cause aux États-Unis. Bien qu'elle ait contribué à procurer une nourriture peu chère et abondante, et qu'elle participe favorablement à la balance commerciale, des critiques s'élèvent, disant qu'il y a de nombreuses externalités négatives qui sont oubliées et qui ternissent ce bilan. Au-delà d'une aimable controverse économique, se cache en fait un combat politique, de croyances et de valeurs, entre deux camps irréconciliables.

À ma droite, l'agriculture conventionnelle est « intensive en capital, à grande échelle, largement mécanisée, reposant sur des monocultures, avec un usage extensif de fertilisants, herbicides et pesticides artificiels, et sur l'élevage intensif ». À ma gauche, l'agriculture alternative est une constellation très diversifiée de mouvements, dans laquelle on peut toutefois repérer une philosophie commune. Au cœur, il y a généralement le remplacement des intrants artificiels par des pratiques plus biologiques ; mais ceci se prolonge par des considérations sur une technologie plus minimaliste, des économies d'énergie, une agriculture à échelle humaine et en circuit court. Historiquement, certains de ces arguments sont ceux, classiques, de l'agrarisme, mais il y a une nouveauté incontestable : celle de la critique environnementale, issue des mouvements écologiques des années soixante.

Beus et Dunlap (*op.cit.)* en viennent à opposer deux paradigmes de l'agriculture, déclinés sur les dimensions suivantes : centralisation vs. décentralisation, dépendance vs. indépendance, compétition vs. communauté, spécialisation vs. diversité, exploitation vs. limites, et surtout, la dialectique qu'ils considèrent comme la plus fondamentale du débat : domination de la nature vs. harmonie avec la nature. Dans ce dernier couple, ils évoquent, en termes de gestion, que la production avec des intrants chimiques est opposée à la production « durable en développant des sols sains ». Dans leur conclusion, les deux auteurs s'attendent à voir le débat passer de l'arène sociale et politique, aux instituts de recherche, d'enseignement et de conseil en agriculture (à

l'époque largement considérés comme acquis à l'agriculture conventionnelle).

Depuis, beaucoup d'eau pleine de nitrates a coulé sous les ponts, les impasses de l'agriculture conventionnelle ont été largement documentées : érosion et perte de matière organique dans les sols, qualité des eaux de surface et souterraines, émission de gaz à effet de serre et de polluants, perte de biodiversité, résistance des maladies et ravageurs aux traitements, risques liés aux pesticides (en premier lieu pour les agriculteurs), dépendance aux énergies fossiles (Malézieux, 2012).

Pour en sortir, en parvenant malgré tout à nourrir dix milliards d'êtres humains, d'ici peu (Foley et al., 2011), il est souvent suggéré de s'inspirer des écosystèmes naturels, de leur circuit fermé en nutriments, de leur étagement (arbres, arbustes, plantes herbacées...) et de leur complexité (multiples cultures, inclusion de l'élevage...). Mais comme se le demande Vendermeer (1995) : quelles sont les bases écologiques de ces propositions ? Et pour le citer : « Comprendre ces mouvements est similaire à comprendre la critique sur laquelle ils sont fondés, toujours éclectique, parfois contradictoire, trop souvent romantique, de temps à autre dénuée de sens, et à l'occasion, brillante ».

7.5.2 Agriculture de conservation des sols

C'est le *Dust Bowl* américain des années 30, et son érosion dramatique, qui a lancé l'agriculture de conservation[278] (des sols). Les pratiques peuvent être diversifiées, mais en théorie, trois principes sont à sa base : premièrement, travail minimal du sol ; deuxièmement, couverture permanente du sol (culture, culture de couverture, mulch) ; et troisièmement, rotation des cultures. Ce sont des méthodes qui sont surtout employées pour la production de céréales, et moins de légumes.

La technique s'est fortement répandue, particulièrement parmi les grandes exploitations, dans les années 80-90, grâce à des innovations majeures : des herbicides efficaces, des cultures génétiquement

[278] Ou sous d'autres noms : agriculture sans labour, techniques culturales simplifiées, culture en semis direct...

modifiées résistant aux herbicides, des engins permettant de semer à travers un mulch ; mais aussi les économies de carburant réalisées (moins de labour) et... les subventions distribuées. Même si la santé du sol est améliorée (moins de perturbations, protection par les couvertures, recyclage de la matière organique, rotations), il faut bien saisir que nous sommes loin de ce que certains peuvent considérer comme un modèle alternatif ; le but de l'agriculture de conservation est de réduire la dégradation des sols et les coûts de production (Giller et al., 2015), *ce qui est le cas*[279].

La méthode, fortement soutenue par la FAO et suscitant beaucoup d'intérêt dans le monde de la recherche, a été adoptée dans de nombreux pays en voie de développement, au sein d'exploitations de plus petite taille. Cependant, des critiques s'élèvent sur sa capacité réelle en termes de productivité (10 % inférieure chez Pittelkow et al., 2015 ; sur 5 643 comparaisons, mais à nuancer selon la culture, l'application complète des principes et le climat). L'impact sur la séquestration du carbone n'est pas évident. L'un des effets attestés est la plus grande capacité de rétention en eau du sol, ce qui est un avantage pour les climats chauds, où la productivité peut alors s'avérer satisfaisante. Il convient sans doute de ne pas se contenter de recycler les résidus de culture, mais d'utiliser aussi des fixateurs d'azote et une fertilisation complémentaire (Giller et al., 2015) : il existe très peu de systèmes où il ne faut pas importer des nutriments de l'extérieur, qu'ils soient organiques ou artificiels. Les rotations sont intéressantes pour la fertilité et la réduction des ravageurs et maladies ; mais c'est un résultat établi, qui n'est pas propre à l'agriculture de conservation. De plus en plus, il est suggéré qu'une solution plus intéressante est un mélange d'élevage et de culture en rotation ; mais en réalité, dans beaucoup de systèmes dits d'agriculture de conservation, il y a une même monoculture en continu, ce qui exige dès lors un emploi accru de pesticides. Le labour, qui a un bénéfice net sur la gestion des mauvaises herbes, des ravageurs et des maladies, est ici absent : ce qui renforce encore le recours aux pesticides.

---

[279] Même si, mal géré, le système peut conduire à une érosion catastrophique...

L'agriculture de conservation finit par devenir majoritaire, en Australie par exemple. Elle est intéressante pour des fermes fortement mécanisées, pouvant acheter des herbicides, car elle entraîne des économies de temps de travail et de coûts, permettant d'augmenter la surface travaillée, et même si la productivité est un peu moindre, d'augmenter les revenus. Pour les petits fermiers et les pays en voie de développement, le succès est moins au rendez-vous, entre autres à cause des problèmes de temps de travail accrus, dus au désherbage, et à des arbitrages difficiles sur la destination de la matière organique produite, entre l'élevage et la fertilisation. Le chaînon manquant serait paradoxalement une fourniture complémentaire d'engrais artificiels, pour augmenter la fertilité du système !

Giller et al. (2015) concluent en disant que les principes ne collent pas à toutes les situations et qu'ils doivent être assouplis. Le dogme du non-labour absolu ne résiste pas à la constatation de compaction des sols, de concentration de la matière organique dans les premiers centimètres et de la difficulté de gestion des ravageurs, des maladies et des mauvaises herbes. Le problème de la productivité est pour eux au cœur de cette alternative, car le terme même de conservation indique, au mieux, un *statu quo*. Or, le sujet à l'ordre du jour est plutôt celui d'une intensification durable, au vu d'une population d'êtres humains en croissance et des contraintes environnementales.

7.5.3 Agriculture biologique

L'agriculture biologique est définie par sa certification ; ceci dit, il existe environ 300 certifications possibles dans le monde... Toutes ont en commun le rejet des engrais de synthèse, des pesticides de synthèse et des semences génétiquement modifiées. En général, elles favorisent[280] la qualité des sols, les processus biologiques, la diversité des cultures et leur rotation. Dans le monde, 1 % des surfaces agricoles sont concernées, alors que c'est 11 % en France (et 14 % des fermes, INSEE, 2024 *Transformations de l'agriculture et des consommations alimentaires*).

[280] Je ne parle pas ici de ce qui concerne l'élevage.

Les positions sur son intérêt sont fortement polarisées, y compris au sein de la communauté scientifique ; je vais essayer de présenter les arguments des deux bords. En ce qui concerne la productivité au moins, il semble acquis qu'elle soit inférieure de 25 % (selon Seuffert, 2012) dans des comparaisons entre des exploitations conventionnelles et biologiques, *toutes utilisant des niveaux importants de fertilisation*. Un argument souvent entendu, mais que je peux difficilement accepter, est que certaines fermes organiques sont tout aussi productives que les conventionnelles... oui, mais si on prend aussi les plus productives des exploitations conventionnelles... Il vaut mieux se demander, comme le fait Connors (2013), si cela vient de la gestion des mauvaises herbes, des ravageurs et maladies ou de problèmes de fertilisation (les « bonnes proportions » des différents éléments nutritifs étant plus difficiles à trouver avec des produits organiques). Il semble, en outre, que des semences spécifiquement adaptées à l'agriculture biologique pourraient occasionner quelques progrès[281].

En termes environnementaux, Reganold et Wachter (2016) avancent que les sols de l'agriculture biologique présentent moins d'érosion et contiennent plus de matière organique. Les fermes biologiques ont aussi plus de diversité cultivée et non-cultivée, et plus de microbes et plus de faune. Pour le lessivage des nitrates et phosphates, les choses sont moins claires, cela dépend si on raisonne par surface ou par plante. Ces fermes utiliseraient aussi moins d'énergie fossile. Le bilan écologique semble donc meilleur, et lorsqu'on réalise des calculs d'externalités, les gains environnementaux compensent la moindre production (mais voir un peu plus loin).

En ce qui concerne la profitabilité des fermes, elle est meilleure pour l'agriculture biologique, grâce à la *premiumisation* des produits (+30 % sur le prix que sont prêts à payer leurs consommateurs), mais elle est plus faible si on considère des prix égaux (–7 %).

---

[281] Cela étant, la sélection reste plutôt orientée vers le conventionnel qui « risque » lui aussi de progresser...

Pour la santé des agriculteurs, l'association des pesticides avec certains cancers est claire[282], mais les pesticides ne sont pas absents de l'agriculture biologique, c'est l'épithète qui change : ce sont des pesticides *biologiques*, et ils ne sont pas sans danger (Trewavas, 2001). On imagine d'ailleurs mal un pesticide efficace et totalement anodin... La question est plutôt celle de la bonne dose et des bonnes conditions d'application.

> Du côté de chez Stéphane : Sur la qualité des produits, Reganold et Wachter (2016) disent que les conclusions de 15 méta-analyses comparatives ont montré *quelques preuves* que l'agriculture biologique est plus nutritive. J'avoue en avoir parcouru une seule (Lima & Vianello, 2011), et leurs conclusions sont que les différences nutritionnelles ne sont pas encore établies (et les tests consommateurs, à l'aveugle, ne plébiscitent pas non plus les produits biologiques selon Trewavas, 2001). Mais ce qui me paraît intéressant, c'est une de leurs remarques de conclusion : il faut améliorer ces études comparatives pour conclure et le faire soigneusement, car plusieurs *autres facteurs* peuvent altérer la qualité nutritive de la nourriture, comme la maturité, le temps écoulé depuis la récolte, le climat, le sol, le cultivar, la méthode de cuisson... En tant que statisticien, une lumière rouge s'allume : c'est que la différence entre conventionnel et organique doit être bien faible, si l'on a besoin de contrôler tous ces éléments avant de l'exhiber. Et ma première conclusion, en tant que jardinier, c'est que je dois d'abord faire attention à ces *autres facteurs*. Ma seconde est qu'il faut peut-être plus envisager les choses comme un continuum entre organique et conventionnel, et agir de façon adaptée selon le contexte.

---

[282] Silva, J. F., Mattos, I. E., Luz, L. L., Carmo, C. N., & Aydos, R. D. (2016). Exposure to pesticides and prostate cancer: systematic review of the literature. *Reviews on Environmental Health*, *31*(3), 311-327.

> Il n'en reste pas moins que les risques de traces de pesticides sont en théorie[283] écartés avec les produits biologiques, mais qu'ils peuvent, en revanche, présenter des problèmes sanitaires, à cause de fumiers mal gérés ou de champignons (Lima & Vianello, 2011).

Il y a un dernier élément de controverse : la pertinence d'une agriculture mondiale entièrement biologique. Je n'ai pas la prétention d'avoir une idée sur la question, mais j'avoue que les deux petites pages[284] de la communication de Connors (2013) présentent un argument troublant, qui tient dans sa réponse à la question : *d'où viendrait la matière organique fertilisante* ? Il démontre, sur deux cas très convaincants, que la restitution ne suffit pas[285] et qu'il faut aller chercher ailleurs une fertilité complémentaire. En laissant des animaux paître le jour sur des prairies ou forêts voisines, pour les ramener la nuit sur les parcelles, où leurs déjections fertilisent les cultures, c'est son exemple basé sur des données médiévales ; ou en version plus moderne, en transférant des fourrages des pays sous-développés vers des élevages intensifs des pays développés, et en exploitant leurs fumiers. Mais ces espaces extérieurs, l'eau employée et le travail nécessaire ne sont pas comptabilisés[286] dans la comparaison entre agriculture conventionnelle et agriculture biologique, sinon elle serait catastrophique pour cette dernière. Il dit que l'agriculture biologique ne peut que rester cantonnée à des régions où il est possible de correctement se fournir en de tels fertilisants, et où les consommateurs

---

[283] *cf.* les remarques au-dessus au sujet de l'innocuité des pesticides biologiques.

[284] Disponibles en ligne.

[285] J'en étais aussi arrivé là, dans ma propre réflexion sur le circuit fermé. On exporte des nutriments, pour simplifier, de l'azote, du phosphore et du potassium. Même en remettant le maximum dans le sol, le compte n'y est pas. Il est possible, grâce à une rotation avec un fixateur d'azote, de corriger le problème pour cet élément, mais en ce qui concerne le phosphore et le potassium ? Est-ce que l'altération des roches et l'eau d'irrigation peuvent combler ce déficit ? Un article faisant les bilans en phosphore et potassium dans une ferme en circuit fermé montre que ce n'est pas le cas (Nolte & Werner, 1994).

[286] Un peu dans les coûts de ces produits, quand même, mais pas du tout dans leurs impacts environnementaux.

sont prêts à en payer le surcoût. À une échelle mondiale, avec de surcroît une population en croissance, il ne reste plus assez de terres inexploitées pour de tels transferts de fertilité, et *volens nolens*, l'auteur conclut que l'emploi de fertilisants artificiels est incontournable. Troublant, je l'avais dit...

7.5.4 Agroécologie

Ce qui ne va pas nous faciliter la tâche, c'est que, d'une part, le mot agroécologie désigne à la fois une discipline scientifique, des mouvements politiques et des pratiques agricoles (Wezel et al., 2009) ; et que, d'autre part, l'histoire française, marquée par la figure de Pierre Rabhi (Bellon et Ollivier[287], 2012), n'est pas forcément très représentative.

L'agroécologie, comme science, commence dans les années 1930 avec l'idée d'appliquer des notions écologiques à la situation agricole. C'est en particulier la notion d'interaction entre les plantes et les autres êtres vivants[288] « au champ », qui a donné les prémisses du contrôle biologique, et qui reste aujourd'hui un des éléments distinctifs des pratiques agroécologiques. À partir des années 1960, poussée par les mouvements écologistes et en réponse à la Révolution Verte, l'agroécologie scientifique se penche sur les problèmes environnementaux et le développement rural, et participe à la naissance de l'agriculture durable. Elle innove en étudiant, sur le mode participatif, des systèmes traditionnels d'agriculture, plus spécifiquement en Amérique Centrale et du Sud. Dans une vision systémique, la ferme devient un agrosystème, où l'on construit la fertilité des sols de manière proche de celle de l'agriculture biologique ; où l'on privilégie la diversité culturale (supposée plus stable), avec une attention particulière aux cultures traditionnelles ; et où l'on conserve soigneusement les ressources (plutôt rares dans ces contextes). L'idée est d'établir, à long terme, une sécurité alimentaire à échelle humaine :

---

[287] Que je vais donc peu décrire, mais pour le lecteur intéressé, l'article est disponible en ligne : https://horizon.documentation.ird.fr

[288] En n'oubliant pas les autres interactions, avec l'environnement et avec le fermier...

celle de la ferme familiale. Une autre innovation est une participation de plus en plus grande des sciences sociales, économiques et politiques, pour envisager l'insertion de ces fermes familiales dans le territoire. À partir des années 2000, une partie de l'agroécologie scientifique change d'échelle, et s'intéresse au système alimentaire dans son ensemble (production, distribution et consommation). La discipline, assez bien reconnue académiquement dans quelques pays, est encore récente et ses méthodes sont en construction, mais elle peut apporter un réel renouveau à l'agronomie classique : surtout pour sa préoccupation envers les « fermiers pauvres dans un environnement marginal (Altieri, 2002) ». Je reconnais, avec plaisir, ma dette envers Gliessmann (2015) que j'ai lu avec grand intérêt, et dont le plan de l'ouvrage m'a fortement inspiré pour construire les présentes « Notes de lectures scientifiques au sujet du potager ».

Qu'en retenir pour la culture de nos légumes ? Je pense que toute personne intéressée par une production diversifiée, avec une économie de ressources, trouvera des exemples à méditer dans une telle approche systémique. En tant que consommateur, l'agroécologie donne également matière à réflexion. D'autre part, les potagers traditionnels de nos campagnes, parfois bien décriés, méritent d'être considérés comme un modèle respectable, dont il est loisible de s'inspirer (cultivars régionaux, inscription dans le paysage avec des murets de pierres locales, cabanes de jardin, outils traditionnels, puits...) avant de copier les pratiques de peuples premiers, dont le climat, le sol et la biocénose sont profondément différents des nôtres, sans parler de leur culture ! Bref, cela offre une bonne occasion de discuter avec ses vieux voisins... Pour finir, monter un système basé sur les interactions des communautés d'êtres vivants, demande de se frotter à la botanique, la microbiologie, l'entomologie : ce qui procure, en outre, le plaisir de connaître, puis de reconnaître, nos colocataires au potager !

7.5.5 Autres courants alternatifs

Biodynamie

En 1924, Rudolf Steiner, docteur en philosophie, donne une série de conférences, appelée « Cours aux agriculteurs », à des personnes proches de la société d'anthroposophie - qu'il a créée – et intéressées

par les questions agricoles. Il s'agit de répondre à des interrogations concernant la qualité de la nourriture et des semences, en ces débuts de modernisation de l'agriculture.

Steiner n'a ni formation, ni expérience dans le domaine agricole, mais fonde ses réponses sur des intuitions, obtenues suite à des méditations. C'est une technique qui élargit les résultats scientifiques, d'une part en prenant en compte des forces cosmiques et terrestres, inédites jusqu'alors dans la physique ou l'astronomie, et d'autre part, parce qu'elle ne nécessite pas de vérification expérimentale, elle est intrinsèquement juste. Différentes préparations, le respect d'un calendrier lunaire, des méthodes phytosanitaires originales[289], confèrent à la production agricole ainsi obtenue, les forces cosmiques et terrestres recherchées, permettant à ceux qui les consomment d'atteindre le plein développement spirituel (Kirchmann, 1994). Suite à Steiner, des procédés de cristallisation ont été développés en biodynamie, pour vérifier la qualité de cette nourriture. Grosso modo, il s'agit d'extraire du jus des aliments, d'ajouter du chlorure de cuivre, ce qui, après évaporation, dessine des formes, qui sont interprétées selon leur régularité. À mon sens, *le cas Steiner relève plus de la psychiatrie que de l'agronomie*.

Aujourd'hui, l'agriculture biodynamique est certifiée par un label. Elle a progressivement intégré les pratiques de l'agriculture biologique, qui sont complétées par les propositions de Steiner. Après de nombreux tests, plus ou moins bien réalisés, il s'avère qu'il n'y a tout simplement pas de différences consistantes entre la biodynamie et l'agriculture biologique (Santoni et al., 2022). Les différences relevées avec l'agriculture conventionnelle sont les mêmes que les différences observées entre l'agriculture biologique et l'agriculture conventionnelle. Les tests plus limités concernant uniquement l'efficacité des propositions de Steiner, *qui sont la spécificité de la biodynamie*, ne sont guère concluants[290] (Chalker-Scott, 2013).

---

[289] Il s'agit ainsi de brûler des ravageurs ou des mauvaises herbes, et de répandre leurs cendres dans le champ, ce qui les éloigne.

[290] On trouvera plus de détails dans le chapitre « Calendrier lunaire ».

Permaculture

Que trouve-t-on généralement dans un potager en permaculture ? Son emplacement est usuellement proche du lieu d'habitation. Divers dispositifs concernent la gestion de l'eau (lignes de niveau, mare, oyas...), voire de l'énergie, comme des panneaux solaires. Les formes du potager sont souvent assez courbes, et il peut y avoir des installations peu classiques comme des buttes, des spirales aromatiques, des jardins mandalas, des jardins en trou de serrure... Les arbres, ou du moins les arbustes, côtoient des plantes pérennes et des herbacées, dans une forte diversité alpha (un fouillis diraient certains), mais des haies peuvent aussi structurer l'espace. Les espèces végétales rares y sont paradoxalement assez courantes... et les canards coureurs[291]. Le sol est le plus souvent paillé et peu travaillé ; les couvertures de sol ou de culture en plastique sont bannies.

Ces *stéréotypes* passent à côté de l'essentiel : *pourquoi est-ce comme cela* ? Parce que, derrière ce décor, il y a en théorie un design, c'est-à-dire un effort pour organiser, de façon systémique et inspirée par la nature (avec des boucles, des interactions, des redondances et des multifonctionnalités), l'espace de vie, y compris le potager, et ce, de façon durable. La permaculture est née de la critique de la société de consommation et de son inconscience par rapport à la limite des ressources, particulièrement pétrolières ; ainsi que de considérations écologistes. Fondée par deux Australiens, Bill Mollison et David Holmgren, ce mouvement, à présent international, veut proposer une autre société, plus en harmonie avec la nature, par la prise de responsabilités de chacun pour limiter son impact et atteindre une relative autosuffisance, avec initialement une focalisation sur l'agriculture. Les fondateurs proposent une éthique de vie et une série de principes, sortes de guide pour l'action, permettant de développer un système biologiquement diversifié et économe en intrants. Au final, la méthode repose sur des considérations écologiques (pas toujours actualisées), comme en particulier l'hypothèse de diversité-stabilité[292],

---

[291] Un « truc », très mis en avant pour gérer les limaces, mais qui souligne l'importance de mêler animaux et plantes dans la permaculture.

[292] Nous y reviendrons dans le chapitre sur l'adiversité.

et une analyse rationnelle, mais elle assume aussi une subjectivité non dénuée d'aspects intuitifs, moraux, esthétiques ou spirituels (Morel et al., 2019). L'observation sensible occupe une place centrale dans l'adaptation au site ; les auteurs australiens ne cachant pas d'avoir été grandement inspirés par le rapport à la nature des Aborigènes.

Le mouvement s'est développé en réseaux peu structurés, grâce à des formateurs qui apportent leurs connaissances à des groupes locaux intéressés par ces thématiques. La personnalité de ces formateurs fait qu'on a parfois plus l'impression d'avoir affaire à des permacultures, qui ont du mal à cumuler leurs connaissances. Il existe une certification en design permaculturel. En revanche, il ne s'agit pas du tout d'une formation technique pour apprendre comment faire un potager : on peut lire plusieurs ouvrages sur la permaculture (ce que j'ai fait) et n'en savoir pas plus sur la culture du radis.

Suite à son succès public, la permaculture a été fortement critiquée, car ses zélateurs énoncent des résultats de productivité non prouvés et probablement exagérés. Les fermes en permaculture peuvent tirer une bonne part de leur revenu de formations ou de services, plus que de leur production propre ; celles franchement orientées sur la production finissent par ressembler à des fermes en polyculture biologique ou agroécologique, voire bio-intensive (Ferguson & Lowell, 2017), avec nombre de « compromis ». La permaculture attire souvent des néophytes, avec un bagage limité en sciences naturelles et agricoles, et une vision très optimiste du fonctionnement des écosystèmes. Dès lors, ils multiplient les naïvetés[293] scientifiques, agricoles, voire politiques... Mais on peut au moins reconnaître à la permaculture le mérite d'avoir su donner, à beaucoup de personnes : un espoir face à la situation environnementale très sombre, l'envie de se prendre en main et de faire un potager, ne serait-ce que sur son petit balcon !

> Du côté de chez Stéphane : Le lecteur aura noté ma réticence à prendre au sérieux certains courants de l'agriculture alternative. Toutefois, malgré ces *agacements*, je dois

[293] Bien sûr, si je ne me trompe pas, des erreurs, nous en faisons tous... Je parle de mettre en avant des théories pseudo-scientifiques, de donner des leçons à des agriculteurs de profession... ce que j'ai régulièrement entendu.

concéder que ces agriculteurs différents ont (comme les autres) le courage de faire un métier complexe, rude physiquement, risqué financièrement, peu valorisé par notre société (alors qu'ils la nourrissent !). Dans le marché des producteurs, où j'achète ce qui me manque, j'ai un jour aperçu, sur le tee-shirt de l'un d'entre eux, le slogan suivant : « Les hommes naissent tous égaux, mais les meilleurs deviennent agriculteurs ». Je n'ai rien à y ajouter... à part les femmes... et les autres !

7.6 Gérer la santé biologique du sol

La Figure 94 montre les éléments à prendre en compte pour que le sol soit un habitat favorable aux organismes qui y vivent[294]. Nous avons largement évoqué, dans les chapitres sur la température, l'eau, la santé physique du sol (porosité et humus) et la santé chimique du sol (pH), comment s'y prendre avec ces différents paramètres. Aussi, nous allons maintenant nous concentrer sur trois autres facteurs : le travail du sol, la matière organique apportée et les cultures de couverture. .

Ce sont précisément les trois éléments au centre de la méta-analyse de Norris et Congreves (2018) qui cherchent, en ce qui concerne la culture de légumes, ce qui améliore les indicateurs de la santé du sol (et qui, par conséquent, réduit les impacts environnementaux), tout en conservant une production satisfaisante. L'agriculture de conservation a fait ses preuves, mais elle reste essentiellement limitée aux grandes cultures de céréales et d'oléagineuses, et son application à la culture de légumes, plus exigeante (plus d'irrigation, de fertilisants et de travail du sol), ne va pas de soi. L'agriculture biologique, largement employée dans la culture maraîchère, présente des atouts pour la santé du sol, mais elle souffre d'une sous-production par rapport aux méthodes conventionnelles (-33 % pour les légumes, Seufert et al., 2012). Leur proposition est de regarder si les techniques alternatives précitées

[294] Un tout autre moyen est évoqué par Bertrand et al. (2015), il s'agit de sélectionner des cultivars qui soient adaptés aux interactions avec la biodiversité du sol...

peuvent être incorporées aux pratiques conventionnelles, sans forcément verser dans une transition complète. Ils conseillent, par ordre d'importance : 1/ d'inclure des pratiques de rotations, 2/ d'apporter des d'amendements de carbone organique, 3/ d'introduire des cultures de couvertures et 4/ de réduire l'intensité du travail du sol. Ils commencent par les rotations, car elles ont largement démontré leur intérêt[295] ; et si elles ne sont pas incluses dans leur étude comparative, c'est que *toutes* les expériences réunies la pratiquent *de fait*.

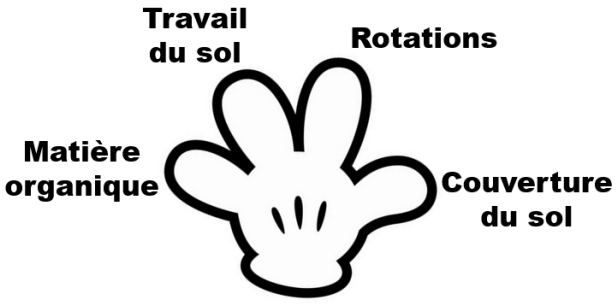


Figure 95 : La santé du sol est entre nos mains.

En ce qui concerne les amendements en carbone organique, ils améliorent très clairement les conditions physiques, chimiques et biologiques du sol ; il reste qu'il existe beaucoup d'amendements possibles, avec des objectifs très différents, ce qui méritera un développement plus loin. Les cultures de couverture semblent avoir un effet sur la santé biologique, mais plutôt en termes de diversification des microbes que de leur abondance. Nous avons vu dans un chapitre précédent qu'elles sont intéressantes pour la structure physique du sol. Elles réduisent aussi clairement les mauvaises herbes, mais leur effet sur la santé chimique du sol et la production n'est pas toujours positif. Il faut donc détailler leur emploi, ce que nous allons faire un peu plus avant. Nous leur adjoindrons les couvertures de sol que sont les paillages ou les bâches, qui partagent avec elles la fonction de

[295] Nous y reviendrons dans le chapitre sur les bioagresseurs et comment cela peut s'appliquer au potager.

protection du sol. Enfin, pour la diminution du travail mécanique du sol, la santé biologique, estimée par la respiration du sol, est clairement améliorée (pas forcément sur le court terme), mais les auteurs conviennent que son introduction reste complexe pour les cultures légumières, et que des essais progressifs avec des modifications de fréquence, de profondeur et de *timing* des opérations sont, sans doute, préférables à une conversion brutale. En somme, si le bilan est globalement positif, une grande variation existe selon les modes d'application de ces alternatives, et nous allons à présent entrer dans le détail, particulièrement en ce qui concerne le travail du sol.

7.6.1 Apport de matière organique

C'est un sujet que nous avons déjà bien abordé dans les deux chapitres précédents, aussi, je ne soulignerai, ici, que ce qui influe sur la santé biologique du sol.

S'il s'agit de nourrir les décomposeurs, fournir de la matière organique peu décomposée s'impose. Selon le rapport C/N de cette matière organique, ce seront les bactéries ou les champignons qui en profiteront le plus. Une nourriture très carbonée, comme la paille, ou plus encore, le bois raméal fragmenté, entraîne toutefois des risques de faim d'azote, d'immobilisation des nitrates, et donc un problème de fertilité. Un accompagnement, par des tontes de gazon par exemple, tempère ce risque de blocage. Une nourriture plus azotée est sans doute la bienvenue au printemps, où la minéralisation secondaire, du fait de la température, est modérée, la minéralisation primaire d'un tel apport, « très vert », pouvant alors l'amplifier.

Je vais me répéter dans ce paragraphe, mais si la température est vraiment basse, comme en fin d'hiver, les organismes du sol sont trop peu actifs et il faut soit préalablement utiliser des systèmes pour réchauffer le sol, soit se résoudre à apporter, en plus, des formes d'azote directement utilisables par les plantes. En été, l'eau devient le facteur limitant pour l'activité des organismes du sol, on irrigue donc non seulement pour les plantes, mais également pour les organismes qui vont garantir la fertilité. Il convient d'anticiper le fait que la transformation de la matière organique en nutriments n'est pas instantanée, et par exemple, dans le cas des engrais verts ou des résidus

de culture, il faut compter quelques semaines de délai, entre l'apport et l'effet fertilisant.

Le compost, s'il a un faible effet en tant qu'engrais à court terme, reste un apport très intéressant : pour l'humus, et donc la bonne structure du sol, essentielle pour ses habitants (eau, air et CEC) ; et par conséquent, la fertilisation à long terme.

La matière organique est plutôt à laisser en surface du sol, où exercent la plupart des décomposeurs, évitant en même temps un travail mécanique du sol qui leur est dommageable. Les fumiers frais sont, en revanche, à enfouir au plus vite, car ils peuvent générer d'importantes émissions d'ammoniac.

Enfin, on peut s'inquiéter de la qualité des matières organiques : les métaux lourds, traces de traitements vétérinaires et autres fongicides peuvent s'avérer durs à avaler.

7.6.2 Couvertures de sol

De la même façon que pour les apports organiques, nous ne reviendrons pas sur les effets des couvertures concernant l'état physique et chimique du sol[296].

Pour ce qui est des couvertures de sol, tout dépend de la couleur, de l'épaisseur et du matériau. En général, elles vont constituer une sorte de « toit » pour les habitants du sol et mettre ce dernier, avec eux, à l'abri des intempéries. Ensuite, il y a souvent un effet tampon sur la température (mais qui peut aussi devenir, selon le type choisi, un effet d'accélération au printemps) et sur l'évaporation de l'eau : deux stress abiotiques majeurs pour la biodiversité du sol. Les couvertures organiques (mulch), souvent moins performantes sur les points précédents qu'une couverture artificielle bien adaptée, présentent en revanche l'avantage décisif de constituer une nourriture (et de se recycler).

Pour ce qui est des cultures de couverture, elles ont aussi différents buts. Elles sont principalement employées en automne, ce qui permet de travailler le sol grâce à leurs racines, de piéger les nitrates pour en

[296] Ni sur l'un de leurs principaux intérêts : limiter l'enherbement pendant leur culture, et ensuite comme paillage.

disposer au printemps suivant, d'entretenir la rhizosphère et de protéger le sol et ses habitants, des intempéries et de l'érosion. Le problème étant de bien régler la fin de la couverture, avec le début de la culture de légumes. Pour renforcer l'effet de fertilisation azotée, une proportion de fixateurs d'azote est recommandée.

7.6.3 Travail du sol

Effet comparé du labour et non-labour sur les organismes du sol

Le travail mécanique du sol a un effet sur les habitants du sol, un effet complexe cependant. Globalement, il réduit les populations, mais à des niveaux différents selon la taille des organismes.

En ce qui concerne la microflore, les différences sont assez minimes, toutefois les champignons sont nettement plus touchés, en particulier les champignons mycorhiziens ; et les bactéries peuvent même voir leur nombre augmenter. On assiste d'ailleurs souvent à une explosion bactérienne, juste après le travail du sol. Encore faut-il différencier selon les profondeurs : dans les quinze premiers centimètres, il y a plus de microorganismes dans les systèmes non labourés, mais cela s'inverse dans les centimètres suivants (Doran, 1980). Cela semble dû à la matière organique qui est enfouie plus profondément avec le labour.

En ce qui concerne la microfaune, protozoaires et nématodes, les effets sont très variables. Le travail du sol qui favorise les bactéries, joue aussi en faveur de leurs prédateurs principaux : les protozoaires. Pour les nématodes qui se nourrissent de façons très diverses (plantes, bactéries, champignons et prédation), aucun résultat convergeant ne se dégage.

Chez la mésofaune, la situation est également diversifiée. Les populations de collemboles ont tendance à diminuer, mais les acariens répondent de façon très différente et souvent extrême. L'effet du travail du sol est : de les tuer parfois directement, de détruire leur habitat dans sa continuité, d'enfouir la matière organique plus profondément (or il s'agit soit de leur nourriture, soit de la nourriture de ceux qu'ils mangent), et enfin, de les exposer à leurs prédateurs. Quelques annélides ont, eux, tendance à être stimulés par le labour.

En général, c'est sur les plus grands organismes, donc la macrofaune, que l'effet du travail du sol est le plus dommageable (Kladivko, 2001).

Comme pour la mésofaune, les causes en sont la mort directe, la rupture des habitats et l'enfouissement de la litière en profondeur. Les araignées, carabes et vers de terre anéciques deviennent rares en terrain régulièrement labouré.

Toutefois, il n'est pas toujours mauvais de réduire les populations : ainsi, le labour a un effet positif pour réguler les limaces et certains champignons pathogènes (Roger-Estrade et al., 2010).

Différents types de travail mécanique du sol

Entre le labour et le non-travail, existe toute une panoplie de techniques, dont on peut simplement dire que les résultats sur la biodiversité du sol sont... intermédiaires (Kladivko, 2001).

Il existe déjà des différences sur la profondeur du travail, que nous avons évoquées : travail très profond (60 cm), travail profond (30 cm), travail superficiel (15 cm) et travail de surface (5 premiers centimètres). Il est possible de réaliser, par exemple, un travail en profondeur à l'automne, puis des travaux superficiels pour chaque implantation. Certains font des labours par rotation, en labourant pour le maïs, mais pas pour le soja qui suit. Le mode de labour a aussi son importance, il peut ainsi conserver la matière organique en surface, avec une sorte de griffage ou de hersage, ou bien l'enfouir ; il peut aussi remuer la terre comme un rotovateur. Il existe également des systèmes de planches permanentes, où le travail du sol se fait depuis l'extérieur, ce qui limite les risques de compaction. Il y a du travail de sol par sillon, c'est-à-dire que seule la ligne sur laquelle vont être semées ou plantées les cultures va être travaillée, mais les inter-rangs vont rester intacts, et souvent couverts par un paillage. En ce qui concerne les résidus de culture, ils peuvent être enfouis par le travail, enlevés et compostés (puis réintégrés), ou laissés en surface.

7.6.4 Système intégré de gestion du sol pour le maraîchage

L'étude de Jackson et al. (2004) est intéressante, car elle porte sur le maraîchage intensif (laitue et brocoli) et teste simultanément : un travail de sol plus ou moins intense, et un apport de matière organique

couplant compost[297] et culture de couverture d'hiver. On observe comme réponses la masse microbienne, le potentiel lessivage des nitrates, la production et le retour économique net. L'apport de matière organique augmente durablement la biomasse microbienne et limite le risque de lixiviation des nitrates. En ce qui concerne la production, c'est la combinaison d'un apport et de travail intense, qui donne le meilleur résultat, mais... pas le plus profitable, car les coûts sont plus élevés. Le labour moins intense semble améliorer la structure du sol, réduire la lixiviation des nitrates, mais diminue la production ; au final, il est intéressant économiquement, grâce à une réduction des coûts. Certaines maladies, non présentes dans cette expérience, ont toutefois été dans d'autres études mieux maîtrisées avec un labour intense. La conclusion des auteurs est qu'il faut réfléchir à des *compromis*, permettant de limiter les risques sur plusieurs plans simultanément. Des apports de matière organique réguliers, avec des labours parfois intenses, mais le plus souvent réduits, leur semblent constituer une solution raisonnable.

Plus généralement, cette expérimentation souligne qu'on ne peut séparer les rotations, le travail du sol, sa protection (par paillage, bâche ou culture de couverture) et les apports en matières organiques. Leurs effets présentent des interactions et doivent être évalués d'après plusieurs critères. La Figure 95 illustre que ces quatre interventions sont *unies comme les quatre doigts de la main*. C'est donc plutôt un système intégré de gestion du sol qui doit être mis en place. Je propose à présent de comparer comment trois auteurs reconnus s'y prennent.

7.6.5 Trois systèmes intégrés concrets de gestion du sol pour le maraîchage

John Jeavons

Le *Biointensive Sustainable Mini-Farming* est un système proposé par John Jeavons (2001), qui tente de répondre à la problématique de l'empreinte écologique. Il s'agit de produire le plus possible sur une petite surface, correspondant à celle disponible à chacun sur Terre

[297] Loin d'être massif, seulement 3.6 kg/m^2 sur deux ans.

(évaluée par l'auteur à 836 mètres carrés de terre arable, à diviser par deux pour conserver des espaces sauvages).

En ce qui concerne la gestion du sol dans cette méthode, elle est caractérisée par un retournement annuel très profond (60 cm), appelé double-bêchage, jusqu'à ce que la structure du sol soit améliorée : un travail superficiel sur 5 cm deviendra alors suffisant. Des planches permanentes sont mises en place, souvent de 1.20 mètre de largeur pour 7.5 de longueur[298]. Le piétinement est proscrit et des plateaux (qui servent en outre au double-bêchage) sont employés s'il faut passer sur la planche.

La matière organique est presqu'entièrement fournie sous forme de compost de déchets verts, produit *in situ*. L'objectif est d'atteindre une autonomie en intrants, ce qui est fait en cultivant des céréales qui visent, d'une part, à produire des graines, et d'autre part, du carbone avec les résidus. Le compostage n'est pas réalisé en surface, mais en pile. Un fait notable est l'addition systématique de sol dans la confection du compost (50 % de la matière sèche), en comptant sur un effet d'entraînement des organismes contenus dans ce sol. Grosso modo, ce compost est épandu sur 1 à 2 centimètres de hauteur annuellement[299].

Il existe des rotations, mais un peu particulières, car il s'agit surtout de gérer la fertilité. Des cultures d'hiver produisant soit de la biomasse carbonée, soit des fixateurs d'azote, alternent avec des cultures d'été. Les cultures d'hiver sont parfois intercalaires, mixant des plantes carbonées et des fixateurs d'azote[300]. On essaie aussi d'éviter que la même culture revienne tous les ans sur la même planche.

La méthode vise l'autonomie alimentaire annuelle, pour un régime végétarien, sur environ 400 mètres carrés : 60 % de la surface est réservée aux céréales, qui font donc aussi office d'engrais verts ; 30 % à des cultures de sept légumes-racines, qui apportent le plus de calories

---

[298] Au total 4×25=100 pieds carrés, environ 9.3 mètres carrés.

[299] Soit 5 à 10 kg/m^2, selon mes calculs.

[300] Les parties aériennes des fixateurs d'azote sont parfois cueillies avant la maturité, pour éviter que les grains ne tirent une grande partie de l'azote : ce sont alors de simples engrais verts ajoutés au compost. Les racines sont toujours laissées dans le sol.

possibles (salsifis, poireau, pomme de terre...) ; et les 10 % restant confèrent des vitamines et sels minéraux (tomates, laitues, etc.).

Le sol n'est pas protégé par un paillage, mais par les cultures. Les espacements entre plantes sont particulièrement réduits pour exploiter au maximum la surface, pour produire rapidement une canopée qui va protéger le sol et pour limiter l'enherbement (usuellement, un seul désherbage suffit par culture).

> Du côté de chez Stéphane : L'autonomie est véritablement au cœur du projet, car s'ajoutent de l'autoproduction de graines, des serres autoconstruites, le remplacement des contenants en plastique par des bacs en bois dans lesquels les semis indirects sont pratiqués, souvent suivis d'un repiquage à racines nues (exercice que je trouve difficile et pas forcément concluant). Enfin, dans cette volonté de recyclage systématique, celle des excrétions humaines est évoquée. L'ouvrage est donc à conseiller à tous ceux qui sont tentés par l'autosuffisance. Pour ma part, il y a certains passages qui dégoulinent de poésie *new-age* dont je me serais volontiers passé (cycles lunaires, compagnonnage entre les plantes et anthropomorphisme, inspiration biodynamique, hypothèse d'équilibre-biodiversité...). Je n'aimerais pas forcément manger à la table de Jeavons, vu les cultures proposées[301], mais il a le mérite incontestable d'essayer de penser une agriculture durable au niveau individuel.

Jean-Martin Fortier

L'objectif de Jean-Martin Fortier est de créer des mini-fermes rentables s'accommodant des contraintes environnementales. Cela passe d'abord par une grande rationalisation des activités.

Le plan de rotation, en particulier, est présenté comme très important pour le long terme et est soigneusement décortiqué. Il s'étale sur dix ans et repose sur une organisation spatiale très sophistiquée. Primo, toutes les planches de culture font 75 cm sur 30 m (avec des allées de 45 cm, les planches sont permanentes et non piétinées). Ce

[301] Comment, par exemple, récolter et préparer toutes ces céréales ?

format unique va faciliter la gestion des travaux : nombre de plants nécessaires, quantité des amendements, calculs des rendements, standardisation des outils et des couvertures... Ces (160) planches sont regroupées en dix parcelles ; sur une parcelle, va pousser un type de légume, correspondant souvent à une seule famille botanique ; une culture peu exigeante suit une culture qui l'est ; et la rotation va avoir lieu au niveau des parcelles.

Fortier avoue que sa stratégie initiale de fertilisation était de mettre un maximum de matière organique (du compost) dans le sol. Progressivement, il en est venu à réaliser des analyses de sol et à ajuster la fertilisation en fonction des besoins des légumes, de la culture précédente et de la vitesse de disponibilité des apports fournis. Son plan de fertilisation repose à présent toujours sur du compost, facile à épandre ; compost toutefois secondé par un engrais de volaille (décomposé, en granulés, en concentration 4-4-2). Cet engrais, dont une partie est immédiatement disponible, sert en particulier de starter au printemps, lorsque la vie du sol minéralise trop faiblement. En ce qui concerne les quantités, les planches de cultures exigeantes (solanacées, cucurbitacées et choux) vont recevoir 8 kg/m^2 de compost et 150 g/m^2 de fumier de volaille ; et les autres seulement 200 g/m^2 de fumier[302]. Pour Fortier, la qualité du compost est essentielle (assez riche en nutriments donc fertilisant, stérilisé et sans graines), et vu la difficulté de le réussir (et des travaux de retournement que sa confection réclame) en quantité suffisante, il préfère employer un compost commercial, plutôt que de le produire lui-même.

Bien qu'il en reconnaisse la difficulté pour un planning serré, il introduit des engrais verts dans sa rotation, pour la moitié des parcelles ; plutôt par demi-planche et à deux moments. À l'automne, en fin de culture, même si la biomasse produite n'est pas énorme, car ils sont généralement installés trop tard ; et au printemps, avec des engrais verts à croissance très rapide, avant de passer à la véritable culture. Ces cultures de couverture et de fertilité sont un mélange de

[302] À part pour les alliacées, de culture longue, avec 240 g/m^2, et les fabacées qui ne sont pas fertilisées. En définitive, vu le plan de rotation, chaque parcelle (et planche) reçoit une année une fertilisation forte avec compost et engrais, puis la suivante une fertilisation allégée (simplement engrais).

céréales et de fixateurs d'azote. Pour occuper le sol, les « vraies » cultures sont densifiées : afin de créer une canopée qui limite à la fois l'exposition aux intempéries et le désherbage.

Fortier dit s'être inspiré d'Eliot Coleman (2020), en se dirigeant dorénavant vers un travail minimal du sol[303], après avoir été adepte du motoculteur, car le maraîchage exige des planches propres, en particulier pour les semis directs. Il commence, lorsqu'il y a des engrais verts ou des résidus de culture, par les détruire (à la tondeuse) ; puis il bâche pendant trois semaines, ce qui fait disparaître résidus et adventices ; un coup de grelinette permet d'aérer le sol, suivi d'un travail superficiel sur cinq centimètres (avec un outil dédié) et terminé par un aplanissement au râteau. Si Fortier est croyant, il n'est pas toujours pratiquant : divers éléments, comme le temps disponible ou une terre difficile et froide au printemps, conduisent parfois le motoculteur à reprendre du service.

> Du côté de chez Stéphane : Outre la gestion du sol, il y a bien d'autres raisons de lire ou de regarder[304] Fortier : le choix des légumes et des variétés qu'il cultive, en particulier l'hiver, avec des notes détaillées ; ses techniques d'extension de la saison ; sa pratique du semis indirect ; et le désherbage... En ce qui me concerne, c'est son insistance sur la planification annuelle des successions et leur distribution spatiale qui m'a marqué : *la saison au potager commence dans un fichier Excel*.

Dominique Soltner

Il s'agit, ici, d'adapter les méthodes de l'agriculture de conservation des sols au potager. Dans Soltner (2018), le paillage n'est plus seulement destiné à protéger le sol des intempéries, limiter les adventices et réduire l'évaporation en été : il devient pleinement *un outil de travail du sol et de fertilisation*. D'épais paillages permettent,

---

[303] Mais aussi pour l'emploi d'outils manuels sophistiqués, comme des semoirs de précision ; et l'extension de la saison en hiver, pourtant rude au Canada.

[304] Il y a eu une série documentaire télévisée canadienne qui lui est consacrée, et montre l'apprentissage du maraîchage.

à l'automne, de préparer une terre ameublie, au printemps, dans laquelle il est possible de planter ou de semer les graines de gros calibre directement, en replaçant le mulch au plus vite. Pour le semis direct des graines plus petites, du compost de déchets verts est étalé sur le sol, les graines sont semées et recouvertes à nouveau par du compost. Le seul travail mécanique est le creusement d'étroits sillons pour installer pommes de terre, poireaux ou bulbes.

Les apports organiques proviennent essentiellement de végétaux, avec du foin, des feuilles mortes, des tontes et des résidus de culture pour constituer les mulchs ; et de compost de déchets verts issu de plateformes pour réaliser les semis directs. Il n'y a pas de compostage domestique en pile (considéré aussi par Soltner comme étant de trop piètre qualité) : c'est un compostage en surface, plus stimulant pour la biologie du sol, qui est pratiqué. Le bois raméal fragmenté est la seule matière organique incorporée au sol, mais son emploi demande des précautions, à cause des risques de faim d'azote : il est soit disposé longtemps à l'avance, pour que le sol puisse le digérer ; soit accompagné d'un apport azoté ; soit employé pour une culture comme des fabacées, pouvant être autonomes en fourniture d'azote. La stratégie visant à concentrer la fertilité sur le potager, en récupérant le plus de matière organique possible dans l'ensemble du jardin (et à l'extérieur, si nécessaire), est manifeste.

Les engrais verts ont une place importante. Ils sont inclus, soit après pommes de terre ou bulbes, pour une implantation d'hiver, destruction de printemps et installation de la culture suivante ; soit en implantation de printemps, destruction de fin d'été et installation d'une culture d'hiver (ou bien pour augmenter l'autonomie dans les approvisionnements de matière organique). L'intérêt de leurs autres fonctions (travail du sol, piégeage des nitrates, désherbage) est bien souligné par Soltner. Les rotations (sur trois ans) ne sont pas exposées en détail, mais sont aussi un élément du système, au moins pour les engrais verts.

Le sol reste couvert en permanence : par des cultures, des engrais verts, du compost de déchets verts, des résidus (paillage) et parfois des bâches. Des planches permanentes évitent de piétiner le travail de la biodiversité du sol.

Soltner expose clairement les fondements agronomiques de son approche et l'ouvrage a une forme un peu particulière : il ressemble à un roman-photo qui détaille visuellement les étapes des différentes opérations. L'auteur insiste beaucoup sur la fatigue évitée par ce système qui permet aux personnes dotées d'une santé défaillante ou aux personnes vieillissantes, de continuer à profiter des joies et des produits du jardinage. Didier Helmstetter (2019) présente une méthode très proche, avec une description soignée, mais très vivante de la biodiversité du sol. De façon plus générale, sur le rôle du sol, je conseille la lecture instructive et fort agréable de Selosse (2021).

Références à consulter

Coleman, E. (2020). *Maraîchage biologique - la méthode d'Eliot Coleman, techniques et outils de culture*. Actes Sud éditions.

Fortier J.M. (2012). *Le jardinier maraîcher. Manuel d'agriculture biologique sur petite surface*. Ecosociété éditions.

Jeavons, J. (2001). Biointensive sustainable mini-farming: I. The challenge. *Journal of Sustainable Agriculture, 19*(2), 49-63.

Jeavons, J. (2017). *How to Grow More Vegetables:(and Fruits, Nuts, Berries, Grains, and Other Crops) Than You Ever Thought Possible on Less Land with Less Water Than You Can Imagine*. Ten Speed Press.

Helmstetter, D. (2019). *Le potager du paresseux : produire en abondance des légumes plus que bio : sans compost, sans travail du sol, sans buttes travailler moins pour ramasser plus*. Tana éditions.

Selosse, M.-A. (2021). *L'origine du monde, une histoire naturelle du sol à l'intention de ceux qui le piétinent*. Actes Sud éditions.

Soltner, D. (2018). *Guide du nouveau jardinage sans travail du sol et sur couvertures et composts végétaux* (7ème édition). Sciences et Techniques Agricoles éditions.

Mais aussi :

http://growbiointensive.org

https://www.jeanmartinfortier.com

https://soltner.fr

7.6.6 Culture de compromis et d'adaptations

Le problème du choix d'une gestion du potager

Les trois exemples précédents ont montré qu'il y a, pour la gestion du sol, plusieurs façons de bien s'y prendre. Et probablement de mal s'y prendre également.

Au fil des chapitres, il est apparu que de nombreuses pratiques coexistent pour gérer la lumière, la température, l'eau, le vent et le sol. Pour mieux étayer ces différents choix, un cadre de réflexion s'avère nécessaire, si on ne veut simplement pas se contenter de copier une démarche. Ce cadre permettrait aussi de prendre du recul sur ses propres pratiques et de les rendre plus satisfaisantes.

C'est ce qu'essaie d'offrir la permaculture, à travers son éthique et ses dix principes de *design*.

Modélisation de la prise de décisions u potager

Pour ma part, j'ai trouvé plus intéressant le travail de Morel et Léger (2016), qui est consacré à des professionnels du maraîchage, mais peut, à mon sens, se transférer assez aisément au jardinier amateur (ce que je vais m'efforcer de faire à présent).

Il s'agit d'une étude basée sur 14 micro-fermes maraîchères, dont les exploitants ne sont pas issus du monde agricole, mais sont plutôt des personnes de bon niveau culturel en reconversion. Toutes et tous ont un projet de vie qui consiste, certes, à vivre de ce métier, mais avec des priorités sociales et environnementales dans son exercice.

Les auteurs disent que leurs choix stratégiques sont déterminés par des aspirations et par une perception de la situation.

Les aspirations concernent l'autonomie (par exemple sur l'alimentation), la charge de travail acceptable, la qualité de vie (connexion avec la nature, esthétique[305]), le sens de l'activité, la volonté d'engagement (local, social, environnemental) et... un revenu décent, ce que le jardinier amateur interprètera comme il le souhaite.

[305] J'ai ajouté quelques motivations proposées dans McFarland et al. (2018).

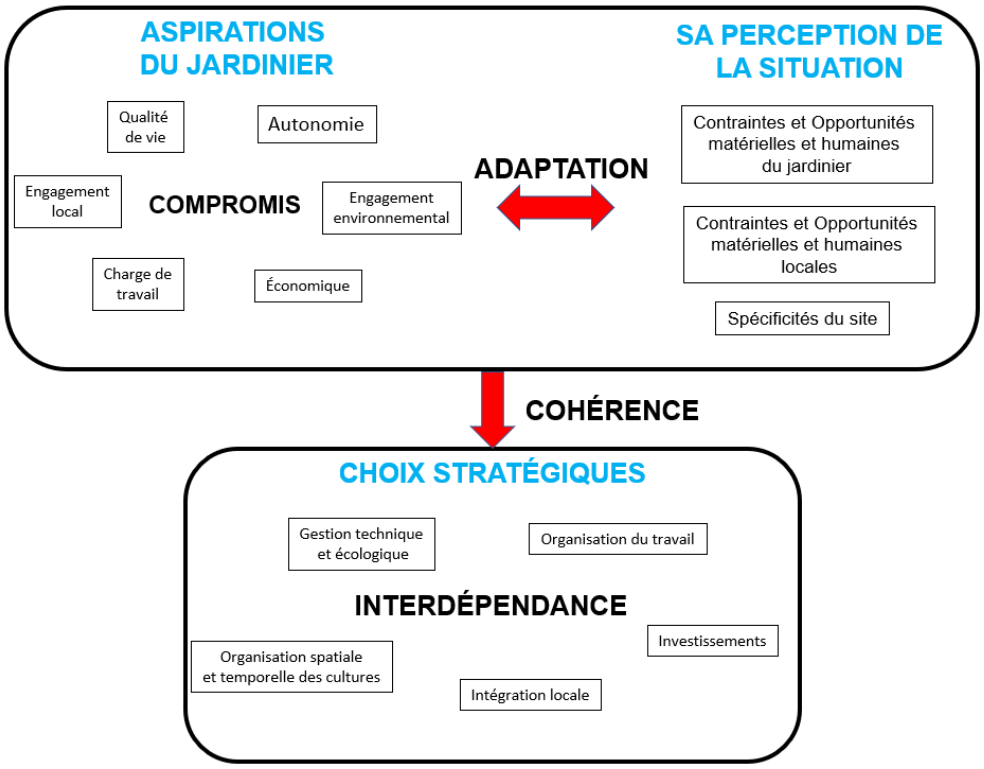


Figure 96 : Modèle conceptuel de Morel et Léger (2016) transféré à la prise de décisions du jardinier amateur : décisions qui sont déterminées par ses aspirations et sa perception de la situation.

Tableau 14 : Aspirations pour un jardinier amateur.

Dimensions	Aspirations
Autonomie	Autosuffisance alimentaire, en matériel et en énergie
Qualité de vie	Connection avec la nature, esthétique, plaisir, créativité, intérêt intellectuel, alimentation saine, santé physique et mentale, nostalgie
Charge de travail	Heures de travail, dureté du travail
Engagement local	Participation à la vie locale, échanges, variétés locales
Engagement environnemental	Préservation des ressources, diversité cultivée, biodiversité en général
Économique	Charges et production

La perception de la situation est, à la fois, personnelle (connaissances, capacités physiques...), propre au site d'installation (taille, histoire du lieu, accès à l'eau...) et fonction des moyens matériels et humains de l'entourage et de la communauté locale (plate-forme de compostage, outils partagés avec des voisins...).

Tableau 15 : Perceptions de la situation pour un jardinier amateur.

Dimensions	Perceptions de la situation
Contraintes et opportunités matérielles et humaines du jardinier	Compétences et connaissance de l'activité, santé, aisance financière, équipements existants
Contraintes et opportunités matérielles et humaines locales	Ressources locales en matière organique, voisins avec des connaissances ou du matériel, entourage pouvant aider
Spécificité du site	Histoire du site, propriété du terrain, surface, qualité du sol, climat, topographie, accès à l'eau, écologie du paysage, distance au domicile

C'est à travers des compromis, entre les aspirations et des adaptations à la situation, que sont effectués avec cohérence les choix stratégiques. Ces différents choix portent sur l'organisation du travail, les choix techniques et écologiques (choix des cultures, des méthodes de fertilisation, de protection du sol...) et l'organisation spatiale et temporelle des cultures, toujours complexe dans une telle ferme ou un potager avec une grande diversité de légumes et des successions de récoltes dans l'année.

Ces choix sont interdépendants, dès que la ferme est vue comme un système.

Je ne reprendrais que trois exemples de cet article sur les compromis et adaptations : 1/ malgré les aspirations écologiques, des bâches en plastique sont employées, pour limiter la charge de travail du désherbage ; 2/ le choix de légumes à forte valeur ajoutée et en mini-monoculture, donc générant moins de biodiversité, vise à prouver aux sponsors s'étant investis que ce type de ferme est bien viable ; 3/ une plus grande surface de serre est utilisée, même si c'est plus cher, afin de pouvoir inclure des cultures de couverture dans la rotation.

Tableau 16 : Choix stratégiques dans des jardiniers amateurs[306].

Dimensions	Choix stratégiques
Gestion technique et écologique	Productivité de l'espace (successions ininterrompues, densité de plantation, culture hivernale avec divers équipements), productivité du travail (travail limité du sol, outils performants, plantation dense pour éviter le désherbage), cultures (à forte valeur ajoutée, nutritive, de conservation, variétés hybrides), qualité du sol (travail de sol réduit, couverture de sol en plastique, paillage, planches permanentes), fertilité du sol (résidus des cultures en place, compostage domestique, cultures de couverture, utilisationd des matières organiques du jardin dans son ensemble, apports gratuits ou payants de l'extérieur, achat de fertilisants), gestion des adventices (aucune, densité de plantation, faux semis, manuel, outils et écartements spécifiques, paillage), gestion des bioagresseurs (rotations, création d'habitats spécifiques, traitements fait maison, traitements commerciaux biologiques ou non).
Organisation spatiale et temporelle des cultures	Intégration d'arbres, d'élevage et d'ornementales, association ou cultures séparées, regroupements des cultures choisies (par familles ou besoins divers), mise en place de rotations, planification annuelle complète ou partielle des cultures
Organisation du travail	Rythme de travail, aide du partenaire de vie, aide occasionelle de l'entourage pour de gros travaux
Investissements	Achat de matériels, plants ou graines, autoconstruction ou autoproduction
Intégration locale	Visites du jardin, prêt de matériel entre voisins, conseils de voisins, support local (mise à disposition du terrain, achats groupés, dons ou échanges de légumes)

7.7 Santé biologique du sol et changement climatique

Au bout de ce chapitre, il est clair que les organismes du sol ont un rôle bien plus important que celui qui leur était auparavant attribué, mais que nous les connaissons encore bien mal. Aussi, il va être très

[306] J'ai inclus quelques éléments de pratiques repérés par de Kirkatrick et Davidson (2018).

difficile de prédire comment le changement climatique va les impacter, et par ricochet, influencer les cycles du carbone et de l'azote, mais également, en retour, comment ils peuvent contribuer à en amortir les effets.

Néanmoins, de nombreuses expériences ont été menées en laboratoire, en enrichissant l'atmosphère en dioxyde de carbone, pour étudier quelle est alors la réponse des plantes et des organismes du sol. Si cette augmentation n'a pas une influence directe sur ces derniers, elle permet en revanche, *en conditions non-limitantes*, d'augmenter la photosynthèse. Dès lors, plus de litière va être disponible dans la détritusphère et plus de rhizodéposition va affluer vers la rhizosphère. Notons que les racines et leur architecture ont tendance à croître plus que les parties supérieures dans ces expériences d'enrichissements, et, vu leur renouvellement rapide, à apporter encore plus de matière organique à décomposer. Ce sont essentiellement les bactéries et les champignons qui en bénéficient en première instance, mais le taux de C/N des apports sera en théorie plus élevé : ce qui est supposé avantager les champignons. Il est effectivement observé qu'ils deviennent souvent dominants et que les champignons mycorhiziens augmentent plus particulièrement. Toutefois, la masse bactérienne augmente aussi et on note que les bactéries fixatrices d'azote sont parmi les plus favorisées. Les nématodes herbivores profitent également de la nourriture plus abondante. La masse microbienne plus importante va se répercuter aux niveaux trophiques supérieurs (protozoaires, nématodes, puis arthropodes...). Au total, la respiration du sol augmente, indiquant une activité plus élevée, la minéralisation croît et plus de carbone est consommé. Le résultat, malgré un plus grand apport en carbone, est qu'il n'y a généralement pas, au bilan, plus d'humus.

Le réchauffement attendu risque également d'avoir un effet d'amplification de l'activité des organismes du sol. Directement, car la température agit de façon positive sur eux, jusqu'à un certain seuil ; mais aussi sur la croissance des plantes qui les influencent indirectement. Pour ce qui est du niveau des précipitations, nous avons vu qu'il était difficile à prédire, c'est pourtant également un élément moteur de la respiration. Au long de l'année, il se peut que le réchauffement climatique bloque, par un effet de température trop

élevée et de sécheresse, l'activité du sol en été, mais au contraire, la stimule en hiver.

Toutefois, le sol ne contient pas que des organismes bénéfiques aux plantes. Certains suggèrent que des organismes pathogènes pourraient dorénavant survivre plus facilement à l'hiver, et infester massivement les plantes. La modification du climat va aussi jouer sur les espèces invasives. Du côté des végétaux, on assiste à une remontée de nouvelles espèces, des mauvaises herbes entre autres, vers les pôles, qui peuvent influencer la composition des communautés du sol. Ces plantes génèrent en effet une litière différente, des architectures racinaires différentes, des mutualismes différents, des exsudats différents, qui sont parfois pathogènes. Elles amènent également leurs propres pathogènes.

En bref, de tous ces changements, on peut attendre une augmentation des organismes du sol. Il est, en revanche, difficile de prédire ceux qui en bénéficieront le plus et donc de savoir si, par les fonctions qu'ils assurent, cela sera favorable à la production. Une voie de recherche actuelle est d'ailleurs de dénicher ou de modifier génétiquement des organismes du sol, comme des champignons mycorhiziens, des bactéries fixatrices d'azote ou d'autres microbes bénéfiques, qui permettraient aux plantes de mieux résister aux températures élevées et aux sécheresses. Au final, et sans véritables garanties, l'espoir réside aussi dans la conservation, grâce à des systèmes intégrés de gestion du sol comme ceux que nous avons pu décrire, d'une forte diversité vivante dans les sols, diversité capable de tamponner les effets délétères du changement climatique.

7.8 Références

Adhikari, K., Anderson, K. R., Smith, D. R., Owens, P. R., Moore Jr, P. A., & Libohova, Z. (2023). Identifying key factors controlling potential soil respiration in agricultural fields. *Agricultural & Environmental Letters, 8*(2), e20117.

Albert, C., Luque, G. M., & Courchamp, F. (2018). The twenty most charismatic species. *PloS one, 13*(7), e0199149.

Altieri, M. A. (2002). Agroecology: the science of natural resource management for poor farmers in marginal environments. *Agriculture, Ecosystems & Environment, 93*(1-3), 1-24.

Anthony, M. A., Bender, S. F., & van der Heijden, M. G. (2023). Enumerating soil biodiversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *120*(33), e2304663120.

Bagnall, D. K., Rieke, E. L., Morgan, C. L., Liptzin, D. L., Cappellazzi, S. B., & Honeycutt, C. W. (2023). A minimum suite of soil health indicators for North American agriculture. *Soil Security, 10*, 100084.

Barker, K. R., Hussey, R. S., Krusberg, L. R., Bird, G. W., Dunn, R. A., Ferris, H., ... & Schmitt, D. P. (1994). Plant and soil nematodes: societal impact and focus for the future. *Journal of Nematology, 26*(2), 127.

Bellon, S., & Ollivier, G. (2012). L'agroécologie en France : l'institutionnalisation d'utopies. In F. Goulet, D. Magda, M. Girard and V. Hernandez (Eds.), *L'agroécologie en Argentine et en France. Regards croisés* (p. 55-90). Paris, l'Harmattan.

Berry, E. C., & Jordan, D. (2001). Temperature and soil moisture content effects on the growth of Lumbricus terrestris (Oligochaeta: Lumbricidae) under laboratory conditions. *Soil Biology and Biochemistry, 33*(1), 133-136.

Bertrand, M., Barot, S., Blouin, M., Whalen, J., de Oliveira, T., & Roger-Estrade, J. (2015). Earthworm services for cropping systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development, 35*, 553-567.

Beus, C. E., & Dunlap, R. E. (1990). Conventional versus alternative agriculture: The paradigmatic roots of the debate. *Rural Sociology, 55*(4), 590-616.

Bridge, P., & Spooner, B. (2001). Soil fungi: diversity and detection. *Plant and Soil, 232*, 147-154.

Bünemann, E. K., Schwenke, G. D., & Van Zwieten, L. (2006). Impact of agricultural inputs on soil organisms—a review. *Soil Research, 44*(4), 379-406.

Chalker-Scott, L. (2013). The science behind biodynamic preparations: A literature review. *HortTechnology, 23*(6), 814-819.

Christensen, M. (1989). A view of fungal ecology. *Mycologia, 81*(1), 1-19.

Connor, D. J. (2013). Organically grown crops do not a cropping system make and nor can organic agriculture nearly feed the world. *Field Crops Research, 144*(20), 145-147.

Domsch, K. H., Jagnow, G., & Anderson, T. H. (1983). An ecological concept for the assessment of side-effects of agrochemicals on soil microorganisms. In F.A. Gunther (Ed.), *Residue Reviews vol. 86* (p. 65-105). New York, NY: Springer.

Doran, J. W. (1980). Soil microbial and biochemical changes associated with reduced tillage. *Soil Science Society of America Journal, 44*(4), 765-771.

Doran, J. W., & Zeiss, M. R. (2000). Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. *Applied Soil Ecology, 15*(1), 3-11.

Ferguson, R. S., & Lovell, S. T. (2017). Livelihoods and production diversity on US permaculture farms. *Agroecology and Sustainable Food Systems, 41*(6), 588-613.

Foley, J. A., Ramankutty, N., Brauman, K. A., Cassidy, E. S., Gerber, J. S., Johnston, M., ... & Zaks, D. P. (2011). *Solutions for a cultivated planet. Nature, 478*(7369), 337-342.

Frąc, M., Hannula, S. E., Bełka, M., & Jędryczka, M. (2018). Fungal biodiversity and their role in soil health. *Frontiers in Microbiology, 9*, 316246.7

Geisen, S. A., Lara, E., Mitchell, E. A., Völcker, E., & Krashevska, V. (2020). Soil protist life matters!. *Soil Organisms, 92*(3), 189-196.

Giller, K. E., Andersson, J. A., Corbeels, M., Kirkegaard, J., Mortensen, D., Erenstein, O., & Vanlauwe, B. (2015). Beyond conservation agriculture. *Frontiers in Plant Science, 6*, 870.

Gliessman, S.R. (2015). *Agroecology, the Ecology of Sustainable Food Systems*. CRC Press.

Gobat, J. M., Aragno, M., & Matthey, W. (2010). *Le sol vivant: bases de pédologie, biologie des sols*. PPUR Presses polytechniques.

Hayat, R., Ali, S., Amara, U., Khalid, R., & Ahmed, I. (2010). Soil beneficial bacteria and their role in plant growth promotion: a review. *Annals of Microbiology, 60*, 579-598.

Jackson, L. E., Ramirez, I., Yokota, R., Fennimore, S. A., Koike, S. T., Henderson, D. M., ... & Klonsky, K. (2004). On-farm assessment of organic matter and tillage management on

vegetable yield, soil, weeds, pests, and economics in California. *Agriculture, Ecosystems & Environment, 103*(3), 443-463.

Karlen, D. L., Mausbach, M. J., Doran, J. W., Cline, R. G., Harris, R. F., & Schuman, G. E. (1997). Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation (a guest editorial). *Soil Science Society of America Journal, 61*(1), 4-10.

Kladivko, E. J. (2001). Tillage systems and soil ecology. *Soil and Tillage Research, 61*(1-2), 61-76.

Kirchmann, H. (1994). Biological dynamic farming—An occult form of alternative agriculture?. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics, 7*, 173-187.

Kirkpatrick, J. B., & Davison, A. (2018). Home-grown: Gardens, practices and motivations in urban domestic vegetable production. *Landscape and Urban Planning, 170*, 24-33.

Lazarova, S., Coyne, D., Rodriguez, M. G., Peteira, B., & Ciancio, A. (2021). Functional diversity of soil nematodes in relation to the impact of agriculture—a review. *Diversity, 13*(2), 64.

Lima, G. P., & Vianello, F. (2011). Review on the main differences between organic and conventional plant-based foods. *International Journal of Food Science & Technology, 46*(1), 1-13.

Linn, D. M., & Doran, J. W. (1984). Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and nontilled soils. *Soil Science Society of America Journal, 48*(6), 1267-1272.

Lu, Q., Liu, T., Wang, N., Dou, Z., Wang, K., & Zuo, Y. (2020). A review of soil nematodes as biological indicators for the assessment of soil health. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering, 7*, 275-281.

Malézieux, E. (2012). Designing cropping systems from nature. *Agronomy for Sustainable Development, 32*, 15-29.

McFarland, A., Waliczek, T. M., Etheredge, C., & Lillard, A. J. S. (2018). Understanding motivations for gardening using a qualitative general inductive approach. *HortTechnology, 28*(3), 289-295.

Morel, K., & Léger, F. (2016). A conceptual framework for alternative farmers' strategic choices: the case of French organic market

gardening microfarms. *Agroecology and Sustainable Food Systems, 40*(5), 466-492.

Morel, K., Léger, F., & Ferguson., R.S. (2019). Permaculture. In B. Fath (Ed.), *Encyclopedia of Ecology*, 2nd edition, 4 (p. 559-567), Elsevier. hal- 0174215

Neher, D. A. (2001). Role of nematodes in soil health and their use as indicators. *Journal of Nematology, 33*(4), 161.

Nielsen, U. N., Wall, D. H., & Six, J. (2015). Soil biodiversity and the environment. *Annual Review of Environment and Resources*, *40*, 63-90.

Nolte, C., & Werner, W. (1994). Investigations on the nutrient cycle and its components of a biodynamically-managed farm. *Biological Agriculture & Horticulture, 10*(4), 235-254.

Norris, C. E., & Congreves, K. A. (2018). Alternative management practices improve soil health indices in intensive vegetable cropping systems: a review. *Frontiers in Environmental Science, 6*, 50

Pietikäinen, J., Pettersson, M., & Bååth, E. (2005). Comparison of temperature effects on soil respiration and bacterial and fungal growth rates. *FEMS Microbiology Ecology, 52*(1), 49-58.

Pittelkow, C. M., Liang, X., Linquist, B. A., Van Groenigen, K. J., Lee, J., Lundy, M. E., ... & Van Kessel, C. (2015). Productivity limits and potentials of the principles of conservation agriculture. *Nature, 517*(7534), 365-368.

Pritchard, S. G. (2011). Soil organisms and global climate change. *Plant Pathology, 60*(1), 82-99.

Qu, R., Liu, G., Yue, M., Wang, G., Peng, C., Wang, K., & Gao, X. (2023). Soil temperature, microbial biomass and enzyme activity are the critical factors affecting soil respiration in different soil layers in Ziwuling Mountains, China. *Frontiers in Microbiology, 14*, 1105723

Reganold, J. P., & Wachter, J. M. (2016). Organic agriculture in the twenty-first century. *Nature Plants, 2*(2), 1-8.

Roger-Estrade, J., Anger, C., Bertrand, M., & Richard, G. (2010). Tillage and soil ecology: partners for sustainable agriculture. *Soil and Tillage Research, 111*(1), 33-40.

Santoni, M., Ferretti, L., Migliorini, P., Vazzana, C., & Pacini, G. C. (2022). A review of scientific research on biodynamic agriculture. *Organic Agriculture, 12*(3), 373-396.

Seufert, V., Ramankutty, N., and Foley, J. A. (2012). Comparing the yields of organic and conventional agriculture. *Nature 485*, 229–232.

Singh, J., Schädler, M., Demetrio, W., Brown, G. G., & Eisenhauer, N. (2019). Climate change effects on earthworms-a review. *Soil Organisms, 91*(3), 114.

Trewavas, A. (2001). Urban myths of organic farming. *Nature, 410*(6827), 409-410.

USDA-NRCS. (2014). *Soil respiration: Soil health* — Guides for educators USDA-NRCS.

Vandermeer, J. (1995). The ecological basis of alternative agriculture. *Annual Review of Ecology and Systematics*, *26*(1), 201-224.

Wang, W. J., Dalal, R. C., Moody, P. W., & Smith, C. J. (2003). Relationships of soil respiration to microbial biomass, substrate availability and clay content. *Soil Biology and Biochemistry, 35*(2), 273-284.

Wezel, A., Bellon, S., Doré, T., Francis, C., Vallod, D., & David, C. (2009). Agroecology as a science, a movement and a practice. A review. *Agronomy for Sustainable Development, 29*, 503-515.

8 Interactions végétales

Il n'a été question, jusqu'à présent, que de la réponse d'une unique plante à son environnement climatique et pédologique, mais la plante est également en relation avec d'autres organismes vivants. Dans ce chapitre, nous considérerons seulement ses interactions avec les autres végétaux.

8.1 Interactions intraspécifiques

Un oignon est généralement planté, sur une planche, avec d'autres oignons ; et leur ensemble constitue ce qu'on appelle une population. Mais comment faut-il disposer ces oignons, et en particulier, à quelle densité ?

8.1.1 Densité et récolte

La production moyenne par plante (w), que l'on peut attendre suivant la densité de plantes *à la récolte* (n), est décrite par l'équation :

$$w = w_m \times (1 + a \times n)^{-b} \qquad \text{(Eq. 8.1)}$$

où w_m est la production moyenne d'une plante *isolée*, a est l'aire nécessaire pour obtenir une production de w_m et b décrit l'efficacité de l'utilisation des ressources par la population (Watkinson, 1980).

De là, on peut obtenir la production totale (Y) comme :

$$Y = w \times n \qquad \text{(Eq. 8.2)}$$

La Figure 97 montre, pour une production d'oignons, l'allure de ces deux courbes (pour w_m=190.6, a= 0.302 et b=1 ; dans Mead, 1970). La première constatation est la forme constamment décroissante de la courbe de production par plant. Or, pour certains types de légumes, il y a une taille de commercialisation : on s'attend à avoir des oignons d'un certain calibre ; si c'est le cas, il faut installer la population à la densité correspondante.

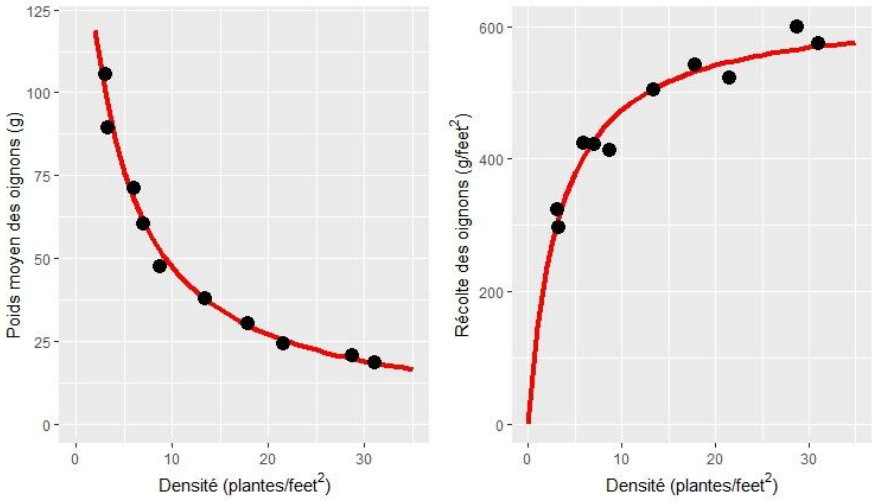


Figure 97 : Production d'oignons : à gauche, la moyenne par plant, et à droite, au total.

La deuxième constatation est la croissance continue de la courbe de production totale qui semble finalement limitée par une valeur maximale asymptotique. Ce phénomène se produit pour la valeur b=1 et s'appelle loi de la production finale constante. Dans ce cas, et s'il n'y a pas de contrainte de taille de commercialisation, des densités très importantes sont envisageables. Ainsi, en ce qui concerne le basilic cultivé pour le pesto, où la taille des feuilles n'est pas importante, des densités de l'ordre de 5 000 plants par mètre carré sont parfois utilisées, afin de maximiser la récolte totale (Garibaldi et al., 1997).

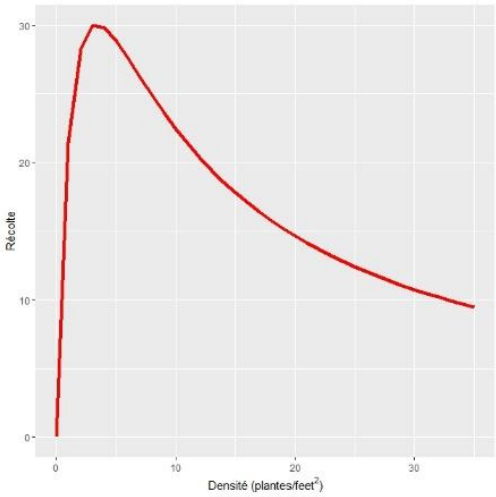


Figure 98 : Fonction de production totale ne suivant pas la loi de production finale constante (b>1).

Mead (1970) indique que la loi de la production finale constante s'applique à la plupart des légumes, mais quelques espèces, comme la betterave rouge, présentent des valeurs de $b>1$. L'allure de la fonction de production totale change alors (voir la Figure 98, où a été conservé a=0.302, mais où b= 2 et w_m=36.4). Dans ce cas, il existe une densité de plantation qui maximise la récolte totale et qu'il convient de favoriser.

8.1.2 Densité et survie

Dans le modèle précédent, n décrit la densité de plantes à la récolte. Toutefois, dans les hautes densités de plantation, se produit un phénomène appelé auto-éclaircissage, qui fait que seule une partie des plantes va survivre. La densité de plantes à la récolte est reliée à la densité initialement plantée (n_i), par l'équation :

$$n = n_i \times (1 + m \times n_i)^{-1}$$

avec $1/m$ qui est la densité maximum après autoéclaircissage, c'est-à-dire lorsque n_i tend vers l'infini (Yoda et al. 1963). Il est possible de coupler cette équation avec les précédentes afin de savoir, en fonction de la densité initialement semée ou plantée, à quel type de production on peut s'attendre.

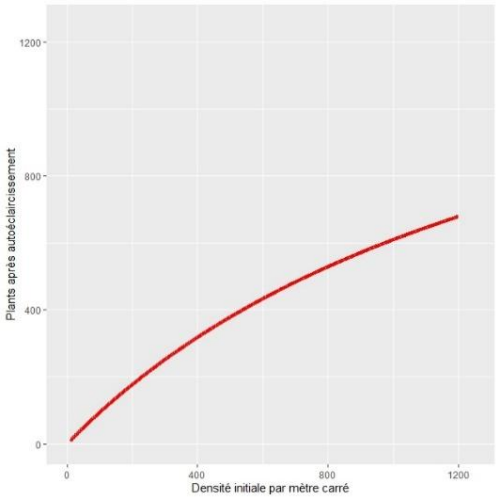


Figure 99 : Auto-éclaircissage dans le cas du Triticum (Firbank & Watkinson, 1985).

À partir d'un certain seuil, il va falloir beaucoup semer afin d'atteindre une survie supplémentaire, et donc une récolte supplémentaire ; et le jeu n'en vaudra peut-être pas la chandelle, selon le prix des graines. En fait, le problème se pose souvent de façon un peu différente : il est courant, par exemple avec des carottes, de semer densément, car la levée est capricieuse ; et de s'apercevoir, à l'émergence, si elle s'est bien déroulée, que la densité est élevée, et donc que l'on va, à la fois, perdre des plants et avoir une production moyenne faible ; il convient alors de procéder à un éclaircissage pour obtenir des calibres intéressants.

Les recherches agronomiques ne modélisent généralement pas la relation complète entre la récolte et la densité, mais essaient de déterminer, dans un petit groupe de densités situées près de l'optimum, ou pour des densités réalisables en pratique (*i.e.* pour des raisons de désherbage, de méthodes de semis...), celle qui permettra la récolte commercialisable maximum. Les recherches consistent également à voir comment l'effet de certains paramètres culturaux, comme l'intensité de l'irrigation ou de la fertilisation, se combine à la densité.

Cette relation complète doit toutefois nous guider dans nos choix d'espacements, qui sont *bien plus libres que ce que l'on pense généralement* ; et des densités plus élevées peuvent être intéressantes ; avec un résumé que l'on peut énoncer, en imitant la voix de Johnny Hallyday ; « Qui sème dru récolte menu, mais beaucu ! ».

8.1.3 À la recherche du temps gagné

Dans les modèles précédents, la production que nous mesurons est celle d'une récolte, lorsque les plants sont à maturité. Or, il est possible de choisir, par exemple avec des laitues, de récolter des jeunes pousses, ce qui permet d'augmenter très largement la densité initiale. Et de gagner du temps !

Il est également possible de sursemer, comme pour obtenir des jeunes pousses (*cf.* le paragraphe au-dessus), puis de faire une première récolte de la moitié de ces jeunes pousses, et ensuite, de laisser le reste parvenir à maturité pour une seconde récolte : ce qui augmente la production totale et permet une récolte anticipée.

Enfin, mais nous y reviendrons dans la partie sur la planification des cultures, certaines espèces - la laitue à nouveau - ne peuvent rester longtemps sur place, une fois à maturité, et de toute façon, cela bloque de l'espace. Ainsi, la question est plutôt de savoir combien nous souhaitons de laitues, pour une durée de 15 jours par exemple, et de minimiser l'espace correspondant, en maximisant la densité (sous contrainte éventuelle de taille).

8.1.4 Modes de semis en monoculture

Les résultats précédents de densité-dépendance offrent un cadre de réflexion, mais concrètement, comment faut-il planter les oignons ? Il existe, en gros, deux types d'approche : l'installation à la volée et l'installation en rangs.

Dans l'installation à la volée, on convient d'une densité, par exemple 5 000 graines de basilic pour un mètre carré, et on essaie de répartir uniformément ces graines, ce qui demande un certain savoir-faire... Il est également possible de réaliser un semis statistique : la technique consiste à mêler les graines, souvent petites dans ce cas de figure, à du sable ou de la semoule, à bien mélanger et à semer le tout à la volée. On obtient généralement un résultat plus régulier.

Dans l'installation en rangs, on définit une distance inter-rangs (R) et une distance intra-rangs (r), puis on sème ou plante (avec un cordeau ou un semoir multi-rangs chez les professionnels) de façon très régulière. Le but de cette technique est de faciliter le désherbage, en choisissant une distance inter-rangs qui corresponde à nos outils (mécanisés ou manuels dans un potager), et une distance intra-rangs qui maximise la production. Cependant, pour des cultures où le désherbage est vraiment un problème, une autre stratégie est possible : il s'agit de conserver la densité générale, mais d'écarter plus les inter-rangs et de serrer plus encore dans le rang ; le désherbage outillé, entre les rangs, est ainsi facilité et le désherbage manuel, dans le rang, est minimisé (Melander et al., 2005). Une dernière solution est de serrer les distances inter-rangs et intra-rangs pour réaliser, au plus vite, une canopée évitant de multiplier les désherbages.

Pour le voir autrement, on peut considérer l'organisation spatiale des légumes dans une planche, soit avec un espacement inter-rangs

différent de l'espacement intra-rangs, soit en utilisant le même espacement inter-rangs et intra-rangs, soit avec un système de quinconce. Pour se rendre compte de l'impact d'un tel choix, voici un exemple concernant la betterave rouge. En reprenant les propositions de Thorez et Lapouge-Déjean[307] pour ce légume, la distance inter-rangs est de R=30 cm et la distance intra-rangs de r=15 cm, ce qui fait une surface de 450 cm^2 par plante, et donc une densité au mètre carré de 22 (=10000/450). Si on utilise des espacements inter-rangs égaux aux espacements intra-rangs, la surface par légume est alors de 15×15= 225 cm^2, et la densité de 44. En passant en système de quinconce, cela conduit à $(\sqrt{3}/2)\times15\times15$=195 cm^2 par légume, soit une densité de 51 ! Bien entendu, le désherbage n'est pas facilité, mais pour une plante assez rapide et un peu couvrante, comme la betterave, l'effet de canopée doit limiter ce travail. Il n'empêche que l'irrigation et la fertilisation doivent suivre pour exploiter cette plus forte densité...

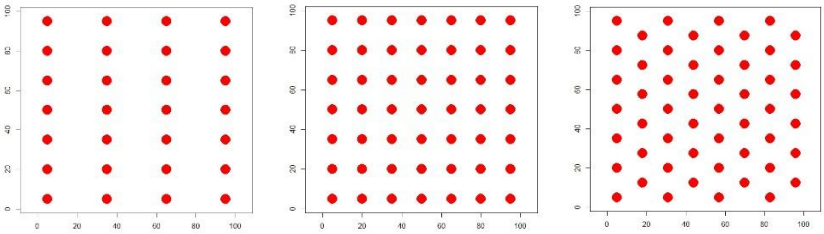


Figure 100 : Trois schémas d'implantation pour des betteraves. À gauche avec R=30 et r=15, au centre avec R=r=15, et à droite avec un système de quinconce pour r=15 (le nombre de plants sur le dessin ne correspond pas aux densités annoncées, qui sont des densités moyennes, en fait les plants débordent à l'extérieur du cadre ici)

8.2 Interactions interspécifiques

Il faut à présent s'interroger sur ce qui se passe, quand deux espèces ou plus sont présentes sur la même planche ; soit de façon involontaire, parce que des adventices finissent inévitablement par apparaître, soit de façon volontaire, lors d'un essai d'association de cultures.

---

[307] Thorez, J.-P., & Lapouge-Déjean, B. (2009) *Le guide du jardin bio*. Terre vivante.

8.2.1 Compétition, complémentarité et facilitation

Le modèle de récolte et densité (Eq. 8.1) est ici repris, pour définir la production moyenne de l'espèce A (w_A), en fonction de sa densité à la récolte n_A, mais aussi de la densité n_B de l'espèce B présente au même moment sur la même planche :

$$w_A = w_{mA} \times (1 + a_A \times (n_A + \alpha \times n_B))^{-bA}$$

avec un nouveau paramètre α qui est un coefficient de (la) compétition qu'exerce la présence de B sur la récolte de A (Firbank & Watkinson, 1985).

On peut, comme précédemment, modéliser la densité finale de A (n_A) par la densité initiale de A (n_{iA}) et la densité initiale de B (n_{iB}) :

$$n_A = n_{iA} \times (1 + m_A \times (n_{iA} + \gamma \times n_{iB}))^{-1}$$

avec γ qui est un nouveau coefficient de (la) compétition qu'exerce la présence de B sur la survie de A. On obtient, comme auparavant, la récolte totale par l'équation 8.2. On définit les équations concernant la récolte et la survie de l'espèce B, de façon exactement parallèle à celles de l'espèce A.

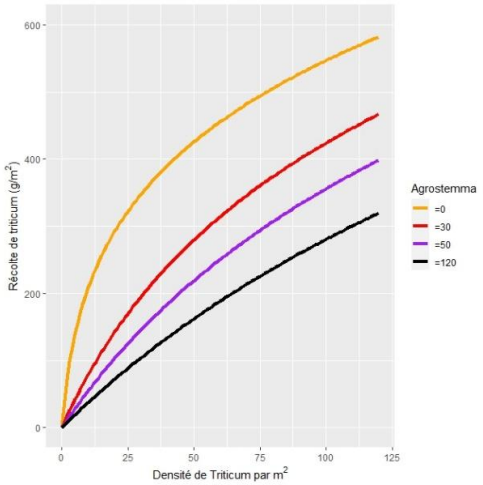


Figure 101 : Relation entre récolte et densité pour du blé tendre, lorsqu'il est en compétition avec de la nielle des blés.

Dans une modélisation de blé tendre (*Triticum aestivum* cv. Sicco) versus nielle des blés (*Agrostemma githago*), la relation de récolte et densité du blé est modifiée lorsque la nielle des blés se fait plus présente (Figure 101). Si la récolte de B (la nielle) ne nous intéresse pas, on constate clairement que la récolte de A (le blé) pâtit de sa présence. C'est ce phénomène de compétition qui va conduire à la gestion en tant que mauvaise herbe de B.

Il est possible également de produire un « graphique de remplacement », où l'on considère la quantité totale de graines comme fixée et où l'on fait évoluer la proportion de graines de blé (Figure 102). Le graphique de gauche montre, pour un total de 120 graines, que la nielle des blés seule produit de l'ordre de 750 g/m^2, alors que le blé tendre n'en produit que 600 g/m^2 en monoculture. De plus, aucune des combinaisons intermédiaires n'est capable de faire mieux au total que la monoculture de nielle : les deux cultures sont donc en compétition.

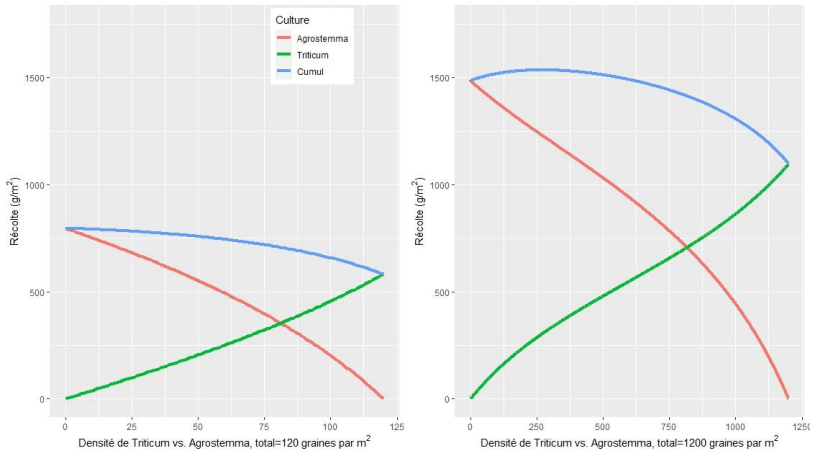


Figure 102 : Densité et récolte pour la culture simultanée de nielle des blés et de blé tendre. À gauche, pour 120 graines au total, un cas de compétition, et à , pour 1200 graines, un cas de complémentarité.

Le graphique de droite, sur un total de 1 200 graines, montre à nouveau la supériorité en monoculture de la nielle des blés, mais indique, pour une proportion intermédiaire de l'ordre de 1/3 de blé et 2/3 de nielle, qu'il est possible d'obtenir une récolte générale plus importante, et par conséquent, qu'une complémentarité intéressante entre les deux cultures est possible, voire une facilitation.

Ce phénomène se produit lorsque la compétition entre les espèces s'avère moins forte que la compétition au sein des espèces. On parle de principe de production compétitive (Vandermeer, 1989), et de là, naît l'idée d'association de cultures.

8.2.2 Ratio équivalent terre

En réalité, l'exemple précédent, avec le blé tendre et la nielle des blés, correspond à une situation de compétition avec des mauvaises herbes, plutôt qu'à une situation de complémentarité. En effet, on ne veut pas vraiment récolter les graines de nielle... De surcroît, il est rare, sauf par exemple en cas de mélange de variétés de blé, que l'on puisse directement comparer les deux productions et simplement les ajouter. Ainsi, dans une association volontaire entre tomate et basilic, on ne va pas ajouter le poids des fruits de l'une au poids des feuilles de l'autre[308] !

Afin de voir si l'association est intéressante, la méthode du ratio équivalent terre (LER, *land equivalent ratio*) est utilisée. Si on note $Y_{T,I}$ la production (en g/m^2) de tomate en interculture et $Y_{T,M}$ en monoculture (respectivement $Y_{B,I}$ et $Y_{B,M}$ pour le basilic), on a :

$$\text{LER} = Y_{T,I} / Y_{T,M} + Y_{B,I} / Y_{B,M}$$

Lorsque LER>1, il y a un avantage à réaliser une association, par rapport aux monocultures. Cependant, on jette généralement un coup d'œil aux LER partiels : c'est-à-dire aux $\text{LER}_\text{T} = Y_{T,I} / Y_{T,M}$ et $\text{LER}_\text{B} = Y_{B,I} / Y_{B,M}$. En effet, si l'une des deux cultures est vraiment plus importante pour nous, la tomate par exemple, ce qui compte est que son LER_T soit proche de 1 (et que LER>1 aussi ; la production de l'autre est alors un simple bonus. En revanche, si les deux productions comptent pour nous, les deux LER partiels devront être assez équilibrés.

Un petit exemple numérique, tiré de Bomford (2009), va nous permettre de mieux comprendre l'idée. La comparaison se fait entre

[308] Mais éventuellement le prix que chaque récolte apporte...

une monoculture de tomate en quinconce, avec 53 cm d'écart entre les plants, et une monoculture de basilic en quinconce, avec 30 cm d'écart entre les plants, contre une biculture en quinconce, avec 41.5 cm entre les plants et avec deux plants de basilic pour un plant de tomates. On obtient pour 2001 : LER=0.90 (13535/16058+254/4254), et pour 2002 : LER=1.24 (6884/6981+1865/7391). En 2001, la culture de tomate a un résultat partiel de LER_T=0.84 et le basilic un catastrophique LER_B=0.06. L'association ne s'avère pas intéressante. En 2002, en revanche, la tomate affiche un excellent LER_T =0.98, c'est-à-dire comparable à la monoculture sur la même surface, et le basilic permet de réaliser un surplus intéressant, avec LER_B=0.25. Toutefois, il faut noter qu'il est possible (même si c'est rarement fait en pratique) de calculer un intervalle de confiance pour ces LER et, ici, les données de Bomford indiquent que le premier résultat n'est pas significativement différent de 1, alors que le second l'est. L'association s'avère donc plutôt positive.

Une première remarque, essentielle, est que... les années ne se ressemblent pas : la production de tomates a été divisée par deux en 2002, que ce soit en monoculture ou biculture ; et le basilic a eu un comportement très différent[309]. On voit, à nouveau, toute l'importance de répéter, sur plusieurs années ou lieux, les dispositifs expérimentaux, pour rendre compte de la variabilité des résultats. Une seule expérience, sans mesures réelles, et avec un dispositif expérimental bancal, *ne saurait nous convaincre*. De surcroît, un bénéfice souvent espéré des bicultures est leur plus grande stabilité dans le temps : d'où la nécessité... de le confirmer.

Deuxième remarque : la culture de tomate est dominante par rapport au basilic, car son LER partiel est toujours fort, alors que celui du basilic est toujours faible.

Une troisième remarque est que le résultat de la comparaison peut dépendre des arrangements de départ, c'est-à-dire de la densité des monocultures (non testé ici) et de la façon dont les deux plantes sont associées (non testé non plus). On choisit ici de mettre deux plants de basilic pour un plant de tomates et d'utiliser une distance sur la

[309] Est-ce qu'il tire alors parti de la « faiblesse » de la tomate ?

biculture qui est la moitié des distances de monoculture (ce qui est la proposition de Jeavons, 2017). Bomford fait, par ailleurs, une autre proposition et fournit un calculateur automatique de cette autre distance.

Pour que la comparaison fonctionne bien, il faut, d'une part, que les monocultures soient dans leurs conditions de densité optimale, et d'autre part, que les conditions agronomiques (type de site, climat et mode de management) soient comparables. La biculture peut s'avérer, par exemple, plus avantageuse en conditions difficiles.

Notons que le LER a été étendu au ATER (*area*time equivalent ratio*) qui permet de prendre en compte la durée de cycle des cultures : on peut en effet coupler une culture longue avec une succession de cultures rapides, ce qui change la donne !

8.3 Malherbologie

Avant de développer les idées théoriques, nous allons commencer par un petit exemple permettant de saisir l'importance du problème.

8.3.1 Poireau et mauvaises herbes

Tursun et al. (2007) ont mis en place une expérience afin de connaître l'influence des mauvaises herbes sur la production de poireau, une plante de culture longue et aux feuilles peu recouvrantes. Sans entrer dans les détails du dispositif expérimental, la courbe en rouge sur la Figure 103 montre ce qui se passe en termes d'interférence des mauvaises herbes, c'est-à-dire le pourcentage de récolte conservé lorsqu'on laisse s'enherber la planche à partir d'une certaine date (post-plantation).

Première constatation : au temps zéro, donc si on ne désherbe jamais, on n'a que 5 % de la récolte, soit 95 % de perte. Dans ce cas, un comptage a été fait, et on finit avec 100 à 150 mauvaises herbes par mètre carré (et pas beaucoup de poireaux en vinaigrette !).

Deuxième constatation : si laisse s'enherber à partir du trentième jour, on conserve 50 % de la récolte. Il faut saisir que l'on double ici notre empreinte écologique, en utilisant deux fois plus de surface, pour la même production. Le désherbage, serait-il une activité écologique ?

Troisième constatation : si on laisse s'enherber à partir du quatre-vingt cinquième jour, on conserve 95 % de la récolte, ce qui est généralement satisfaisant, vu le travail supplémentaire occasionné par un désherbage tout au long de la culture (les poireaux sont récoltés au bout de 150 jours). On considère, dès lors, que la période critique pour cette culture est de 85 jours (dans ces conditions climatiques, pour ce sol et pour cette implantation).

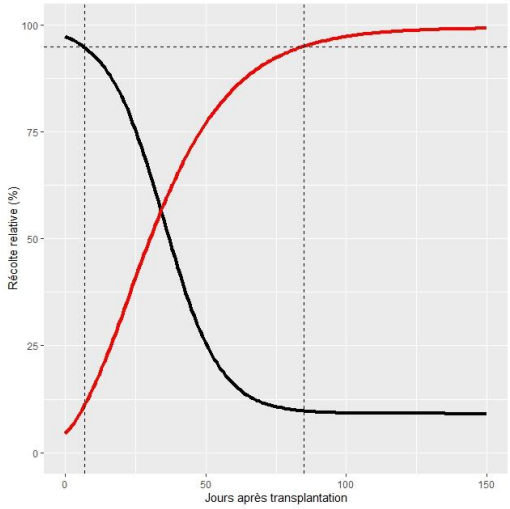


Figure 103 : Production relative de poireaux en fonction de différents modes de désherbage. La courbe en rouge est celle où l'on a laissé s'enherber la culture à partir du jour j (en abscisses), et la courbe en noir est celle où l'on a commencé à désherber à partir du jour j.

On complète parfois cette idée en cherchant à savoir s'il est vraiment nécessaire de commencer de suite le désherbage : l'idée étant de gagner un peu de temps de travail en limitant, là encore, les pertes de récolte. La courbe en noir indique le pourcentage de récolte conservé, si on commence le désherbage à partir d'une certaine date. On voit que l'on perd 5 % de récolte en démarrant le septième jour. La période critique de désherbage est dans ce cas un intervalle, de 7 à 85 jours.

8.3.2 Qu'est-ce qu'une mauvaise herbe ?

Définition de la « mauvaise herbe »

Je vais personnellement employer le terme de mauvaise herbe, plutôt que d'adventice ; pour la simple raison que j'adore le nom de la

science qui les étudie : la malherbologie. Je citerai quelques lignes de l'article de Fryer (1979), pour en donner une définition : « Dans la nature, il n'y a rien qui ressemble à une mauvaise herbe. Le concept ne prend du sens que *par rapport à l'homme*, et comment elle interfère avec ses activités ou sa santé... N'importe quelle plante peut constituer une mauvaise herbe, si elle pousse où elle n'est pas désirée. »

Existe-t-il des « bonnes herbes » ?

Chacon et Gliessman (1982) disent que les fermiers mexicains emploient le terme de « mauvaise *broussaille*[310] », mais également de « bonne *broussaille* ». Ils considèrent que ces dernières ont une utilité, par exemple comme culture de couverture pour limiter l'érosion, et décident de les laisser au milieu des cultures. Leur classement vient de la tradition, et si certains de leurs arguments sont discutables, il convient de conserver l'idée de « bonne herbe ». Sur le principe, ces plantes peuvent avoir de nombreuses fonctions intéressantes (biodiversité, comestible, médicinale, esthétique, bio-indication).

Comment les distinguer ?

Storkey (2006) part de l'idée que les herbes ne sont pas toutes équivalentes. Il identifie des groupes de plantes homogènes en fonction de traits écophysiologiques (taille des graines, hauteur, cycle de vie), ce qui lui permettra de rattacher ensuite d'autres herbes à ces groupes. Cela le conduit à sept groupes, qui sont évalués sur la base de leur compétitivité avec les récoltes et de leur apport à la biodiversité (ressources pour le niveau trophique supérieur, tel que des pollinisateurs ou autres auxiliaires). L'idée est de repérer des groupes qui soient peu gênants pour la culture, mais intéressants pour d'autres services écosystémiques. Dès lors, il pourrait y avoir un management différencié de l'enherbement. Deux groupes sur sept apparaissent intéressants, car peu compétitifs et assez utiles[311].

---

[310] Caramba ! Je traduis le Mexicain comme je peux...

[311] Le groupe 3 comprend : *Capsella bursa-pastoris, Cerastium fontanum, Lamium purpureum, Poa annua, Senecio vulgaris, Stellaria media, Veronica persica* et le groupe 5 comprend : *Chenopodium album, Fallopia convolvulus, Persicaria maculosa, Polygonum aviculare, Sinapis arvensis.*

Comment les utiliser ?

S'il est probable que laisser les mauvaises herbes s'avère délicat pour le potager en activité (sauf peut-être pour les deux groupes cités ci-dessus), elles peuvent néanmoins être employées dans des techniques de bandes fleuries, séparant les planches (Nentwig et al. 1998).

De même, une partie du potager, laissée durant l'hiver en jachère, peut y trouver des avantages (travail du sol par leurs racines, réduction de l'érosion, matière organique, fixation ou extraction des nutriments, nourriture des organismes du sol...).

Enfin, leur présence sur certaines zones semble possible : au pied des (vieux) arbres, des (vieilles) haies, dans certaines zones de pelouse où elles peuvent même constituer des friches intéressantes et assez esthétiques.

L'enherbement n'a pas à être partout, toujours, géré de la même façon. C'est pourquoi il est important (et instructif) de connaître ces herbes, de différencier a minima les annuelles, les bisannuelles et les vivaces. Ainsi, pour des annuelles, on se contentera de les maîtriser avant leur période de reproduction par graine ; mais pour les vivaces qui ont souvent, en plus, des techniques de reproduction végétative, le travail sera beaucoup plus systématique.

8.3.3 Laisser faire ?

Comme le dit Fryer (1979), puisqu'en théorie, les mauvaises herbes peuvent toujours être contrôlées, par exemple par élimination manuelle, elles ne semblent pas constituer un problème majeur, comme peuvent l'être, les ravageurs et les maladies. Mais, en pratique, en Inde par exemple, 37 % des pertes de récolte sont causées par les mauvaises herbes, 29 % par les insectes, 22 % par les maladies (et 12 % pour d'autres raisons ; Yaduraju, 2006). Il ne s'agit donc pas d'une préoccupation secondaire ! Les mauvaises herbes réduisent la quantité et la qualité des récoltes de légumes : *la production peut ainsi être diminuée de 45 à 95 %* (Mennan et al., 2020).

Les mauvaises herbes entrent en compétition avec les légumes pour le soleil, l'espace, le sol, l'eau et les nutriments. En termes de nutriments, il a été estimé que les mauvaises herbes prélèvent respectivement 90, 20 et 63 kg/ha d'azote, de phosphore et de

potassium. Il semble, de surcroît, y avoir également des effets d'allélopathie.

Pour résoudre le problème en agriculture biologique, il faut environ 150 h/ha (une petite minute par mètre carré) de désherbage manuel pour des cultures peu compétitives, telles que l'oignon, le poireau ou la carotte (Van Dar Weide et al., 2007). C'est une charge très importante qu'il convient de limiter.

L'agriculture naturelle de Fukuoka (1974), appliquée aux légumes, consiste en fait, non seulement à ne pas désherber, mais à jeter les graines sur un endroit enherbé (à un moment, certes, où les herbes sont moins vigoureuses... mais quand même installées). De façon intéressante, à la page 91, le traducteur, pourtant bienveillant, indique que la méthode proposée serait impraticable en Amérique du Nord. Je serai plus dur, mais juste, mais dur, en disant que : c'est se moquer des lecteurs qui débutent[312] et pourraient se sentir inspirés par cette approche, mixant bouddhisme et taoïsme (selon Fukuoka), mais pas agronomie... Pourtant, elle reste une référence pour le mouvement permaculturel et le mouvement indien *zero budget natural farming*.

8.3.4 Fonction de perte de récolte et variantes

Fonction de perte

Une fonction de perte permet de savoir quelle quantité de récolte disparaît selon la densité des mauvaises herbes présentes. Le modèle de Cousens[313] (1985) est :

$$W_L=(i\times n)/(1+i\times n/c)$$

où W_L est le pourcentage de perte, i est la pente initiale de la fonction, et c est la perte maximum lorsque n, la densité de mauvaises herbes, tend vers l'infini.

---

[312] Je le dis d'autant plus fermement, que j'ai commencé une expérience sur cette base, et en ai vu les conséquences... pas besoin de mesurer le résultat : zéro c'est zéro.

[313] Mais il en existe de nombreux autres, on peut d'ailleurs en construire à partir de l'équation 8.1 qui correspond au modèle n°11 dans Cousens (1985).

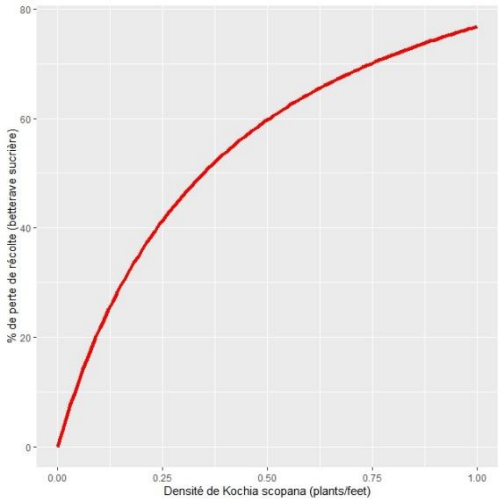


Figure 104 : Fonction de perte (en %) de betterave sucrière lorsque la densité de mauvaises herbes augmente (données tirées de Cousens, 1985).

Sur la Figure 104, on a la perte en % de récolte de betterave sucrière en fonction de la densité (nombre de plants sur un pied de longueur, soit 33 cm, pour une culture en ligne) de *Kochia scoparia*. Ce type de modèle permet de définir un seuil de perte acceptable, par exemple 10 %, et de donner une idée du nombre de mauvaises herbes qu'il est possible de tolérer[314].

Chacko et al. (2021) montrent, en l'absence de contrôle des mauvaises herbes, que le pourcentage de réduction des récoltes est de 50 % pour la pomme de terre, 40-80 % pour l'oignon, 45-80 % pour le chou, 90 % pour la carotte, 92-95 % pour la tomate, 95 % pour l'ail et 86 % pour le radis. Au moins, le lecteur qui débute sait, cette fois, à quoi s'attendre en cas de laisser-faire (*cf.* section 8.3.3).

Dates d'émergence respectives de la culture et des herbes

On peut, à partir de l'équation de perte, revenir sur la production :

$$Y = y_m \times (1-(i \times n)/(1+i \times n/c))$$

[314] Auld et Tisdell (1988) indiquent qu'il convient de se méfier d'un calcul de densité moyenne, puis d'une estimation de la perte, si la distribution des mauvaises herbes n'est pas uniforme, ce qui est généralement le cas. Il vaut mieux, dans ce cas, calculer la perte pour chaque densité et en réaliser la moyenne.

où y_m est la récolte maximale (quand il n'y a pas de mauvaises herbes).

Cousens et al. (1987) ont raffiné ce modèle, en y ajoutant un paramètre pour tenir compte des dates d'émergence respectives de la culture et des adventices :

$$Y = y_m \times (1-(i \times n)/(c^{dt} + i \times n/c))$$

t est le nombre de jours séparant les deux émergences et d un paramètre mesurant l'impact de cette différence.

Ce nouveau modèle permet de prendre conscience de la nécessité d'assurer à la culture un *avantage de compétitivité, en lui donnant un avantage temporel* ; ce qui suggère des stratégies diverses, comme la transplantation, le semis juste après un travail superficiel du sol (supprimant les herbes), le faux-semis ou l'emploi de variétés à émergence rapide...

Effet de la densité de culture (canopée)

Enfin, une autre variation (Maxwell & O'Donovan, 2007) prend en compte la densité de la culture, qui est fixée dans les modèles précédents. Elle montre que l'on peut réduire l'effet des mauvaises herbes et augmenter la récolte *en augmentant la densité de semis de la culture*. Il se produit alors, entre autres, un effet de canopée qui handicape les mauvaises herbes, particulièrement avec des cultures couvrantes.

$$Y = ((j \times N)/(1 + j \times N/y_m)) \times (1-(i \times n)/(1 + i \times n/c))$$

où N est la densité de plantation de la culture, et j l'équivalent pour la culture du paramètre i pour les mauvaises herbes.

8.3.5 Théorie du seuil économique de désherbage

Pour conclure, ces modèles de récolte et densité ont été employés pour définir un niveau *acceptable* de mauvaises herbes. Il s'agit d'un calcul de profit :

$$\pi(d) = P \times W(d) - C(d)$$

avec P le prix de vente unitaire de la culture, $W(d)$ la production en utilisant la méthode de désherbage d et $C(d)$ le coût de ce désherbage.

On en arrive, en couplant cette approche avec les modèles de récolte et densité, à la décision de contenir la densité des mauvaises herbes autour d'un certain seuil économique de désherbage, pour ne pas trop perdre de récolte, mais ne pas chercher non plus à les éradiquer, car le coût serait alors trop élevé.

D'une façon générale, les approches de seuil semblent difficilement applicables dans le cas du maraîchage, vu le nombre de légumes cultivés, le nombre de mauvaises herbes concernées et la dépendance des paramètres à de facteurs tels que, par exemple, la densité de la culture. Mais l'idée d'un *effort raisonnable*, soutenu par une petite optimisation, enlève la culpabilité d'avoir un potager pas complètement « propre ».

8.3.6 Théorie de la période critique

« La période critique de gestion de l'enherbement est une fenêtre dans le cycle de croissance de la culture, durant laquelle les adventices doivent être contrôlées, afin de prévenir une perte de récolte inacceptable » (Knezevic et al., 2002).

Cela doit dépendre de l'espèce cultivée, bien sûr, mais également, sans doute, du type de mauvaises herbes. En particulier, la présence d'adventices pérennes ou d'une grande banque de graines peut nécessiter un désherbage continu... L'environnement (température, eau, fertilité) compte aussi. Il peut donc y avoir une variabilité assez considérable des estimations de cette période critique d'une étude à l'autre. Par conséquent, il vaut mieux prendre les résultats obtenus comme de *simples indications*.

D'un côté, il va falloir, à partir de plusieurs dates[315], laisser s'enherber la culture jusqu'à la fin et observer le pourcentage de récolte en résultant, par rapport au maximum possible (celui obtenu en désherbant tout le temps). Un modèle logistique sera ajusté pour relier

[315] On peut utiliser le temps thermique plutôt que le temps usuel.

ce pourcentage de récolte au temps (courbe rouge sur la Figure 97). Cette courbe permettra de définir une date, à partir de laquelle on ne perdra qu'un faible pourcentage de récolte (souvent 5 %), qui servira de fin à la période critique. Inversement, on va, pour plusieurs dates, ne plus laisser s'enherber la récolte et observer le même pourcentage ; la relation sera cette fois modélisée par un modèle de Gompertz (courbe noire sur la Figure 97). Il permettra de définir une date de début de période critique, où le même (faible) pourcentage de récolte est perdu.

Rappelons, pour le poireau, que Tursun et al. (2007) indiquent une période critique s'étendant de 7 à 85 jours. La technique a été appliquée à de nombreuses autres cultures, et on peut trouver un résumé de ces résultats dans le Tableau 17, tiré de Chacko et al. (2021).

Lichtenhahn et al. (2005) en proposent une simplification, en distinguant quatre groupes de légumes : (1) ceux qui doivent être désherbés pendant la moitié de leur cycle de croissance (betterave, choux, haricot, laitue, carotte) ; (2) ceux qui doivent être désherbés deux semaines de plus (fenouil, céleri, bette) ; (3) ceux qui doivent être désherbés un mois de plus (poireau, oignon) ; et (4) ceux qui doivent être en permanence désherbés (épinard, mâche, persil).

Tableau 17 : Période critique de différents légumes.

Culture	Période critique
Chou	2-4 semaines après émergence
Carotte	3-6 semaines après émergence
Navet	15-20 jours après semis
Radis	25-30 jours après semis
Concombre	4 semaines après semis
Pois	1-2 mois après semis
Laitue	3 semaines après semis
Oignon	La saison complète
Pomme de terre	15-45 jours après plantation
Tomate	6 semaines après transplantation

La notion de seuil économique de désherbage a été étendue sur plusieurs années : il est alors démontré que tolérer un petit niveau de mauvaises herbes en respectant la période critique, même en fin de culture, si elles ont le temps de se ressemer, peut mettre en péril les récoltes des années suivantes. D'où une autre théorie : celle du zéro pluie de graines, qui consiste à désherber régulièrement, même au-delà

de la période critique, afin de diminuer sur le long terme la banque de graines.

8.4 Gestion des mauvaises herbes

Je vais principalement utiliser, dans cette section, la très bonne revue de Tei et Pannacci (2017) sur la gestion intégrée des mauvaises herbes (IWM, *integrated weed management*).

Il faut avoir conscience de l'efficacité considérable des herbicides : Bond et Brundy (2001) indiquent que le passage en agriculture biologique, sans herbicide, conduit en trois ans la banque de graines de 4 050 par mètre carré à 17 320 ! Il va donc falloir mettre sur pied une combinaison efficace de techniques pour gérer ce problème majeur, si on veut éviter l'emploi des herbicides, biologiques ou pas. En effet, pour rappel, les mauvaises herbes réduisent fortement la production, à cause de la compétition pour des ressources limitées : lumière, eau, éléments nutritifs, espace. Elles réduisent la qualité (*e.g.* taille) ou contaminent les légumes (salades à trier...). Elles augmentent les coûts d'entretien et de récolte. En outre, elles fournissent des habitats, aux ravageurs, aux maladies, comme aux auxiliaires d'ailleurs (en particulier, l'espèce sauvage, proche de la plante cultivée).

8.4.1 Connaître les mauvaises herbes

Cléments et al. (1994) soulignent qu'il est important de connaître la communauté de mauvaises herbes dans un potager : sa diversité, mais aussi les abondances et les fonctions de chacune. Ces fonctions peuvent directement nous renseigner sur des solutions quant à leur gestion : plantes indiquant des compactages, des manques d'azote... Les mauvaises herbes peuvent aussi être utilisées pour divers buts, comme nous l'avons déjà évoqué (protéger le sol...). Il est également important de connaître leur biologie (annuelle ou vivace, mode de reproduction...) Dans la production de légumes, la plupart des mauvaises herbes sont annuelles.

La composition des communautés de mauvaises herbes varie avec le climat, le sol, les pratiques culturales et la période de culture. Ce sont généralement des plantes indigènes, donc très adaptées aux conditions

pédoclimatiques du lieu, avec une très forte diversité qui les rend très compétitives, même en situation difficile (sol compacté, pauvre, sec...).

Il faut une approche intégrée en deux phases : l'une de management des populations de mauvaises herbes (mesures préventives et pratiques agronomiques) et l'autre de contrôle direct des mauvaises herbes (physique, mécanique, biologique et... chimique).

8.4.2 Management des populations de mauvaises herbes

Le management des populations de mauvaises herbes vise, d'une part, à augmenter la compétitivité de la culture (cultivar, méthode de plantation, espacement), et d'autre part, à gérer la banque de graines (rotation, labour, faux semis, limitation de la dissémination).

Augmenter la compétitivité de la culture

Les légumes sont généralement semés à une faible densité (par rapport aux mauvaises herbes qui sont, naturellement, très serrées), avec un large espace inter-rangs ; ils sont plus lents que les mauvaises herbes ; et souvent, d'une hauteur moindre.

Le fait d'avoir une densité plus grande permet une fermeture de la canopée de la culture plus rapide, mais il est vrai que cela complique parfois le désherbage, comme nous le verrons plus avant, et qu'il est donc nécessaire de trouver un compromis. De la même façon, le choix de la transplantation, plutôt que du semis direct, permet d'obtenir un avantage temporel et de réduire la période critique de désherbage.

Pour que les légumes soient compétitifs, il faut les placer en conditions optimales de croissance : une terre meuble, riche, humide, et en termes de température et d'ensoleillement, que la période soit favorable, c'est-à-dire qu'il importe de respecter les dates optimales de semis ou de transplantation (Bullar et al., 2015). Les méthodes d'irrigation ont également un impact : le goutte-à-goutte, en localisant très précisément les apports au pied de la culture, permet ainsi de maximiser la production de choux en limitant l'apparition des mauvaises herbes (Chacko et al, 2020). Enfin, il existe des cultivars qui sont plus compétitifs, car plus précoces ou bien plus couvrants.

Gérer la banque de graines

Au départ est la sélection de l'emplacement : inutile de choisir le terrain qui a le plus d'adventices résistantes (pérennes) et de placer d'emblée la culture en situation difficile.

Les rotations permettent d'éviter la domination de certaines mauvaises herbes, en fournissant un environnement et une compétition plus instables. Il s'agit d'alterner différents types de légumes (feuilles, racines...), de faire suivre des légumes peu compétitifs par d'autres qui le sont plus, d'inclure des engrais verts de type céréales et d'éviter, bien sûr, la répétition de la même famille botanique.

Les cultures de couverture peuvent s'employer en engrais verts dans des rotations, en interculture, en mulch mort ou en mulch vivant. Dans ce dernier cas, la mise en place est délicate, car la réussite dépend de nombreux facteurs. Dans une revue de littérature sur les cultures de couverture, Mennan et al. (2020) concluent que ce qui joue sur la perte de récolte, c'est la compétitivité des deux espèces, leur densité, leur date d'émergence et la durée de l'interférence... ce qui ressemble furieusement à notre introduction théorique sur les interactions entre deux espèces végétales ! Les engrais verts les plus classiques sont : les céréales pour leur travail du sol (et certains légumes-racines aussi comme les radis daïkons), les fabacées comme fixatrices d'azote et les brassicacées pour leur vitesse de pousse ; certains engrais verts ont également des propriétés allopathiques.

Les faux-semis consistent à préparer le lit de semences, puis à le laisser en jachère pendant deux à trois semaines, tout en l'arrosant pour encourager les mauvaises herbes à émerger ; elles sont alors supprimées par un léger sarclage, un bâchage, un désherbage thermique... et le véritable semis suit immédiatement. Cette technique très efficace, dont le seul inconvénient est la courte immobilisation de l'espace en question, s'avère largement utilisée pour les carottes, les oignons, les laitues, les choux.

L'importation de graines de mauvaises herbes dans les cultures doit être limitée, en contenant aux alentours les friches qui peuvent ressemer ; en continuant éventuellement le désherbage au-delà de la période critique, pour préférer une stratégie zéro pluie de graines ; et en surveillant les apports organiques de type fumier ou compost, qui cachent souvent leur lot de graines.

8.4.3 Contrôles directs des mauvaises herbes

Contrôle physique

Le mulch peut être organique ou non-organique. Pour ce qui est des mulchs organiques, l'épaisseur de la couche utilisée est fondamentale : Anzalone et al. (2010) suggèrent que 1 kg/m^2, soit une couche épaisse de 10 à 15 cm de mulch organique, est adéquate. Pour ce qui est des mulchs non-organiques, les bâches en plastique sont souvent très efficaces, celles de couleur noire en particulier.

Contrôle mécanique

Les outils (mécaniques[316], ou manuels chez les amateurs) fonctionnent surtout dans les inter-rangs qui doivent donc être dimensionnés à cet effet.

Ceci ne résout pas tous les problèmes, puisque les mauvaises herbes les plus proches sont justement celles qui sont les plus compétitives ! Alors on finit souvent à la main sur le rang, surtout pour les cultures les moins compétitives (carotte, poireau, oignon, céleri, épinard) ; ou avec un petit buttage à l'inter-rangs, qui permet à la terre de venir recouvrir l'intra-rangs.

Contrôle biologique

Il s'agit d'employer des herbivores, en particulier des insectes, ce qui n'est guère possible dans un potager, vu le nombre de cultures différentes et le nombre de mauvaises herbes différentes qui s'y trouvent. L'usage est plus courant dans des serres en monoculture.

Contrôle chimique

Il est de moins en moins autorisé, le marché pour les légumes de potager est petit, le cycle de vie des légumes est assez court et on les mange souvent frais... sans parler ni des effets sur l'environnement et les cultivateurs, ni des résistances...

---

[316] Il existe chez les professionnels des méthodes de désherbage par solarisation, par la vapeur ou thermique.

8.4.4 Efficacité des méthodes de management et de contrôle direct des mauvaises herbes

Quelle est l'efficacité de toutes ces méthodes ? Tei & Pannacci (2017) proposent un *jugement d'experts* de leur importance. Je ne peux donner l'intégralité de leur Table 2.6, mais simplement citer celles auxquelles ils accordent les meilleures notes :

- à l'heure actuelle, en agriculture biologique : sélection d'emplacements, rotation, faux-semis, cultures de couverture, transplantation, bâche biodégradable, désherbage mécanique et manuel ;
- dans le futur : cultivars compétitifs et herbicides à faible impact environnemental...

8.4.5 Gestion intégrée des mauvaises herbes

En fait, les méthodes proposées peuvent, selon les situations, se combiner, et il vaut sans doute mieux varier les stratégies, avec une gestion différenciée de l'enherbement (potager, pelouse, jardin d'ornement, friches, arbustes, haies, arbres, allées, etc.). Pour reprendre Fryer (1979) : « Ces plantes sont le reflet, d'une part, du sol et du climat, et d'autre part, du management passé et présent de la terre en question. Si ces éléments changent, les mauvaises herbes vont dynamiquement changer en conséquence. Aucune unique mesure de contrôle ne peut rester efficace sur le long terme, en face d'une telle adaptation. »

Une étude de Brown et al. (2019) compare, pour une culture d'oignons, différentes techniques sur sol nu (méthode de la période critique et méthode zéro pluie de graines) et sur sol couvert (mulch organique à 2 kg/m^2 et mulch plastique). Ils observent des charges de travail bien différentes entre les techniques, et plus ou moins réparties dans le temps (donc nécessitant de faire ou pas appel à de la main d'œuvre ponctuelle pour une grande surface), et une profitabilité différente : plus grande pour le mulch de foin (mais c'est dépendant du prix du foin) et le zéro pluie de graines, ce qui est surtout dû à la différence de production. En fait, ce travail plus important vaut le coup d'être fait ! Même si la technique de la période critique est la moins profitable, elle permet une économie de travail très intéressante, et

pour des cultures où la durée est moins grande (*e.g.* laitue), cette économie est encore plus flagrante. Si le mulch plastique n'a pas été très efficace en l'espèce, pour des cultures nécessitant beaucoup de chaleur et plus espacées (de type cucurbitacées), le résultat pourrait être bien différent. L'intérêt de cette étude n'est pas tant de déterminer la meilleure méthode, mais de faire comprendre comment chacune implique, de façon différenciée selon la culture considérée : un travail, des coûts de matériel, des avantages additionnels (moins d'irrigation avec un sol bâché ; pas de fertilisation avec le foin), une production correcte et une progression sur le long-terme.

8.5 Association de cultures

8.5.1 D'où vient l'idée de « plantes compagnes » ?

L'ouvrage le plus populaire à ce sujet est celui de Riotte (2010) « Les tomates aiment les carottes », mais on retrouve aussi ce thème, particulièrement traité dans Jeavons (2017). Il est important de donner quelques éléments de contexte, fournis par Bomford (2004) dans sa thèse de doctorat sur le sujet : « Avec un père astrologue et une mère herboriste... elle (Riotte) accumula le matériel nécessaire à son livre, à partir d'observations personnelles, du folklore, de la science horticole et des méthodes biodynamiques, traitant toutes ces sources comme également crédibles ». Ceci dit, pour chaque affirmation, on ne sait jamais vraiment de quelle source il s'agit. Pour ce qui est de la « science », il est fait essentiellement référence aux techniques de cristallisation sensible, proposées par Pfeiffer, élève de Rudolf Steiner...

On ne saurait donc imaginer une position plus éloignée de celle proposée dans les présentes notes de lectures scientifiques. Pour autant, cela ne nous dispense pas d'examiner la question de l'association de plantes ! Commençons par observer comment les choses sont présentées dans les ouvrages grand public de jardinage : il s'agit généralement de tableaux, croisant les légumes et indiquant s'ils sont en interaction positive ou négative (ou neutre). Malheureusement, si nous comparons, par exemple, les associations avec le chou dans les

ouvrages[317] de Thorez et Lapouge-Déjean (2009) et Alamy (2018), nous observons un certain nombre d'incohérences (*cf.* Tableau 18). À partir de là, on peut soit arracher les pages correspondantes, soit se dire que le problème est mal posé[318].

En quittant le vocabulaire amoureux de Riotte, il semble qu'il soit fait allusion à des associations qui permettent : 1) une meilleure production jointe, 2) une meilleure qualité des productions, 3) une réduction des ravageurs et maladies et 4) une diminution de la présence des mauvaises herbes. Bien qu'il existe des liens évidents entre certains de ces objectifs, ils sont fondamentalement différents et il reste à savoir de quoi nous parlons au juste ?

Tableau 18 : Associations positives (en vert), négatives (en rouge) ou neutres (en blanc) entre le chou et différents autres légumes dans deux ouvrages de jardinage.

	Ail	Asperge	Aubergi	Bettera	Carotte	Céleri	Chicoré	Concom	Courget	Echalott	Epinard	Fenouil	Fève	Fraisier	Haricot	Laitue	Mâche	Maïs	Melon	Navet	Oignon	Panais	Persil	Poireau	Pois	Pomme	Radis	Tomate
Chou (Thorez & LD)																												
Chou (Alamy)																												

8.5.2 Mélange des espèces en grandes cultures

À grande échelle, et de façon cette fois scientifique, le sujet a été bien étudié, pour tenter de résoudre les difficultés de certaines grandes monocultures et de tester l'effet d'une interculture. Jolliffe (1997), dans une méta-analyse, conclut à une augmentation de 13 % de la production. Dans une revue de littérature de l'effet sur les arthropodes ravageurs, Andow (1991) remarque une réduction du niveau d'infestation. Weston (1996) détecte un allègement de la compétition des mauvaises herbes. Malézieux et al. (2009) soulignent que de nombreux avantages sont *espérés* des cultures mixées par rapport aux monocultures : une plus grande stabilité des productions ; un supplément de revenus (pour des cultures pérennes longues à mettre en place, en ajoutant des cultures rapides ; en testant des marchés différents sur de petites surfaces déjà existantes) ; une plus grande

[317] Thorez, J.-P., & Lapouge-Déjean, B. (2009). *Le guide du jardin bio*. Terre vivante. Alamy, T. (2018). *Permaculture*. Hachette loisirs.

[318] Soit se dire que, dans toute démarche scientifique, il y a 5 % d'erreur... mais nous ne sommes pas, en l'espèce, dans une démarche scientifique.

productivité attribuée à une meilleure exploitation des ressources aériennes (soleil) et souterraines (eau nutriments), grâce à des complémentarités et des facilitations ; une plus grande durabilité (en utilisant moins d'inputs) ; voire une meilleure qualité, un effet sur les ravageurs (nématodes par exemple) et les maladies, ainsi qu'une réduction des mauvaises herbes. Ouf. D'autres services écosystémiques sont également *attendus* : augmentation de la diversité végétale et de la biodiversité associée, meilleur recyclage des cycles biochimiques, action sur la conservation du sol et sur la qualité de l'eau, séquestration du carbone, et également des services culturels (on ne peut nier que leur aspect esthétique, par exemple, est souvent séduisant avec leurs contrastes plus marqués). Les auteurs précisent toutefois systématiquement qu'*il ne faut pas généraliser ces avantages,* car il existe beaucoup de mélanges possibles, de spécificités de site à prendre en compte, et de techniques de management des cultures qui sont plus complexes à maîtriser. C'est d'ailleurs l'un des problèmes pour les généralisations scientifiques concernant les cultures mixées : pour l'instant, il s'agit plutôt d'études disparates et la compréhension de mécanismes généraux n'est pas encore à l'ordre du jour.

8.5.3 Et à l'échelle du jardin potager ?

Les résultats précédents sont donc encourageants ; il faut toutefois se garder de penser que ce qui se produit, par exemple, lorsqu'on passe d'une grande monoculture à une biculture en bandes, puisse s'extrapoler directement à de petits potagers, où la diversité culturale est déjà grande, et à petite échelle. Nous allons nous concentrer sur deux études, correspondant plus à nos situations d'amateurs : l'une traitant de l'augmentation de la production et l'autre de la réduction d'un ravageur spécifique.

Augmentation de la production

Bomford (2009) a mis en place des associations entre basilic et tomate, tomate et chou de Bruxelles, et chou de Bruxelles et basilic. Ses conclusions sont que le résultat de l'association dépend des plantes en jeu, *mais aussi* de leur densité de plantation, de leurs proportions respectives dans l'association et du timing de leur installation. Des

conclusions... complètement en accord avec les modèles d'interaction entre plantes que nous avons vu précédemment[319] !

C'est le principe de production compétitive, où la compétition inter-plantes s'avère moins forte que la compétition intra-plantes (du fait d'un décalage spatial ou temporel d'utilisation des nutriments par exemple) qui suggère une utilisation conjointe potentiellement intéressante. L'auteur propose également de réfléchir à la configuration de plantation de l'association, avec un logiciel (gratuitement disponible[320]), optimisant cette configuration et pointant que les densités peuvent être assez élevées. Il suggère, dans ses propres termes : de passer de la métaphore de l'amour de Riotte, à une version plus sadomasochiste, où dans une relation plante dominante (tomate) à plante dominée (basilic), il est possible de conserver une production identique à une monoculture pour la tomate et d'avoir un petit bénéfice avec le basilic (qui a, lui, plus de mal que dans la monoculture). On retrouve nos discussions sur les LER partiels... En revanche, entre deux plantes dominantes (tomate et chou de Bruxelles), il ne parvient pas à obtenir un avantage, pour le jardinier bien entendu.

Diminution de la pression des ravageurs

Finch et al. (2003) s'intéressent à la gestion de la mouche de la racine du chou (*Delia radicum*) et de la mouche de l'oignon (*Delia antiqua*). Ils s'interrogent, en particulier, sur le compagnonnage avec des plantes aromatiques, qui pourraient soit masquer l'odeur de la plante-hôte, soit avoir un effet répulsif. Ils élaborent une expérience avec 24 plantes compagnes différentes (aromatiques, adventices, autres légumes, plantes conseillées de type tagètes et plantes ornementales), mariées au chou et à l'oignon. Leurs observations recoupent des recherches précédentes sur la théorie de l'*atterrissage approprié*, en tout cas vis-à-vis des brassicacées. Dans un premier temps, l'insecte repère la plante-cible à l'odeur ; dans un deuxième temps, il atterrit sur une surface verte ; et dans un troisième temps, il goûte la surface verte. S'il se trouve que c'est une feuille de la plante qu'il recherche (il

[319] J'insiste une seconde fois, un peu lourdement, mais cela démontre en quoi des modèles peuvent nous aider à raisonner, dans des situations inédites.

[320] Bomford, M. (2023). Spacing Calculator for Biointensive Mixed Plantings.

peut faire éventuellement d'autres tests pour s'en assurer), il décide de pondre, sinon il s'envole. La présence des autres plantes introduit donc une confusion *essentiellement visuelle*. Il s'avère que les aromatiques ne semblent, dans cet essai, ni masquer l'odeur de la plante-cible (et donc les induire en erreur), ni les repousser. Toutes les plantes testées, sauf quatre, diminuent la ponte des ravageurs : les quatre exceptions sont soit de petite taille, soit de couleur de feuilles rouge ou grise. En fait, ce qui semble compter est la présence de surface verte (même du plastique vert ou des plantes artificielles fonctionnent !) et son importance.

De l'art difficile de l'association

De ces deux travaux, on peut, premièrement, tirer une explication des discordances observées dans les ouvrages de jardinage : si on ne précise pas les objectifs de l'association, le détail de sa mise en place, de son entretien, le résultat objectivé des observations, voire un mécanisme plausible de son explication (non-anthropomorphique), une même association peut aussi bien s'avérer positive, que neutre ou négative.

Deuxièmement, cela signifie, *pour chaque association de plantes et chaque insecte ou maladie associés*, qu'il va falloir tester des combinaisons gagnantes, avant d'espérer d'éventuelles généralisations par famille de plantes ou d'insectes. On peut, en passant, remarquer que certains tableaux d'associations comportent de l'ordre de 35 lignes et colonnes, ce qui nous fait environ six cents (595) associations différentes à vérifier... On imagine les difficultés supplémentaires en associant trois plantes, comme pour la milpa qui, pour le coup, est une institution au centre de l'Amérique Latine (Rodriguez et al., 2020).

Troisièmement, la pratique de cultures en association n'est pas pour faciliter la mise en place, l'irrigation, la fertilisation, l'entretien et la récolte.

Quatrièmement, sans faire une stratégie de l'association de plantes, rien n'empêche de saisir des opportunités : en comblant des échecs d'installation par une plante différente ; ou pour des raisons, ne seraient-ce qu'esthétiques, en ajoutant des ornementales ou en mélangeant des variétés de couleurs différentes de salades ou de bettes ?

Cinquièmement, l'association ne va pas régler tous les problèmes de ravageurs ou de mauvaises herbes : mieux vaut la coupler avec des techniques éprouvées (filet anti-insectes, irrigation au pied des cultures, mulch...).

Enfin, il est également important de s'interroger sur les plantes qu'il vaut mieux, à l'inverse, carrément éloigner les unes des autres : que ce soit dans le temps avec les rotations, ou dans l'espace, comme des plantes appartenant à la même famille[321].

Une association modèle : la milpa

La milpa est un système de polyculture traditionnel, issu de la civilisation maya (Rodriguez et al., 2020), qui repose sur la combinaison de maïs, haricots grimpants et courges[322], dont les bénéfices économiques et écologiques sont assez discutés. On rappellera aux nostalgiques, qu'il s'agit d'une agriculture itinérante sur brûlis, avec des jachères (car malgré la fixation d'azote des haricots et la restitution des résidus, il n'en reste pas moins que, comme pour toute culture, il y a épuisement du sol), souvent couplée à la chasse (pour compléter l'alimentation et protéger les cultures...) et qu'il conviendrait d'accomplir, en outre, quelques rituels pour devenir un véritable *milpero* : comme se faire pardonner des dieux de la forêt et invoquer celui de la pluie[323] (De Frece & Poole, 2008).

Gliesmann (2015) donne des statistiques montrant, sur une série d'études au Mexique, que la production de maïs est considérablement augmentée (LER=1.4), par rapport à une monoculture, dans cette association, alors que les deux autres (haricot et courge avec des LER de 0.18 et 0.19) sont nettement inférieures, ce qui fournit une production globale plus importante (LER général = 1.77), mais déséquilibrée. On ne peut pas tout avoir. (On le mettrait où ?)

---

[321] Bien que, personnellement, un petit semis de radis en association d'un début de culture de choux me permette de recouvrir l'ensemble du même filet anti-insectes...

[322] Mais Lopez et al. (2021) montrent qu'une grande diversité de combinaisons existe, en ajoutant aussi la pomme de terre, des arbres fruitiers ou divers légumes.

[323] Je ne me moque pas ici de ces paysans qui essaient de survivre, tant bien que mal, en faisant appel à toutes les ressources de leur culture traditionnelle...

Une autre combinaison complexe très intéressante est celle de Deb et Dutta (2022) qui mixent sept plantes, et obtiennent un LER=1.17 pour ces plantes en version polyculture en ligne, mais un LER>5, lorsqu'elles sont véritablement mélangées dans chaque ligne.

Quelques associations bien éprouvées

La piste des cultures mixées semble donc prometteuse, malgré un management plus difficile. On peut, sans doute, dans un premier temps, commencer par des méthodes qui ont fait leurs preuves depuis... 1846. Moreau et Daverne[324] proposent en effet des méthodes consistant à intégrer, dans des cultures lentes (carotte, persil), des tranplantations de laitues romaines, ou bien d'y mêler des semis de radis. De même, il est possible d'associer à des cultures à cycle long, comme les choux, tout en conservant leur espacement classique (50 cm), des laitues : on trouve une validation expérimentale, pour des brocolis, dans Yildirim et Turan, 2013, avec un LER=1.21. Dans ces exemples, la culture principale présente probablement un LER partiel de 1, dès lors, les plants additionnels sont tout bénéfice.

8.6 Association avec des arbres

8.6.1 Agroforesterie

Objectifs

L'agroforesterie consiste à combiner des arbres avec des cultures (et de l'élevage). C'est une pratique ancienne qui revient au goût du jour, dans un but de durabilité de l'agriculture. Ce sont des systèmes complexes, où la compétition doit être maîtrisée, afin de combiner productivité et durabilité. Il existe plusieurs systèmes traditionnels de ce type dans les tropiques, mais dans les zones tempérées, les expériences sont plus limitées ; et reposent sur des ceintures d'arbres entourant les cultures ou des coupe-vent, des cultures entre des allées d'arbres, de l'agriculture de forêt (*forest farming*) et des systèmes à petite échelle de type « forêt comestible ».

---

[324] Moreau, J. G., & Daverne, J. J. (1846). *Manuel pratique de la culture maraîchère de Paris*. Vve Bouchard-Huzard.

Les arbres sont de forts compétiteurs par rapport à des cultures annuelles, du fait de leur ombrage (en zone tempérée particulièrement), de leur capacité à mobiliser des ressources en nutriments ou en eau, et d'effets éventuels d'allélopathie. En revanche, ils permettent d'améliorer le microclimat en zone sèche, méditerranéenne par exemple, d'héberger plus de biodiversité, de maintenir la qualité de l'eau, de stocker du carbone, de conserver la qualité des sols, et d'abord, de produire des fruits ou du bois.

Résultats sur les cultures en allées

Jose et al. (2004) soulignent que les espèces, dans un système agroforestier, sont en interaction à la fois positive et négative. Ces espèces peuvent avoir des besoins différents, de différentes ressources, à différents moments et différents moyens de se les procurer. En clair : il s'agit de rechercher une séparation de niches écologiques. Il est alors possible que la production totale soit plus élevée que dans des productions séparées, mais les auteurs mettent en garde sur la *complexité de ces systèmes* et la possibilité réelle d'un échec.

En ce qui concerne les interactions aériennes, la présence des arbres modifie le microclimat, en termes de température (et le stress de chaleur associé), d'humidité et de vitesse du vent. L'effet de coupe-vent a tendance à diminuer l'évapotranspiration sur 10 à 15 hauteurs de coupure du vent. Plusieurs études ont montré une réduction de la récolte due à l'ombre des arbres ; il semble toutefois que les plantes en C3 s'en sortent mieux que celles en C4, du fait de la saturation plus rapide de leur photosynthèse. La séparation des allées a, bien entendu, un effet majeur : pour des pins taeda, une séparation de 5 mètres laisse passer 90 % de la lumière, alors qu'une séparation de 2.5 mètres n'en laisse passer que 45 %. Ceci dit, certaines études ont indiqué, si les nutriments et l'eau n'étaient pas limités, que l'ombrage jouait un rôle secondaire (*peut-être* même positif en été). La présence d'arbres augmente également la biodiversité des oiseaux et de différents insectes prédateurs : ce qui *pourrait* entraîner une meilleure maîtrise des ravageurs.

En ce qui concerne les interactions souterraines, les racines des arbres sont essentiellement présentes dans les trente premiers centimètres du sol, et donc en compétition directe avec les cultures. La

compétition pour l'eau est souvent la plus dure, particulièrement dans des zones plus sèches. Des barrières de contention des racines permettent de supprimer cette compétition et de donner une bonne récolte. Les zones pluvieuses s'en tirent mieux, sinon *il faut irriguer*. L'hypothèse de l'ascenseur hydraulique, qui ferait que les arbres remontent l'eau des profondeurs et que les cultures en bénéficient, reste à valider. Quant à la compétition pour les nutriments, elle est moins importante, car il faut savoir que ces systèmes sont fertilisés en zone tempérée, je préfère le souligner. Si les arbres améliorent la fertilité du sol, en relâchant de la matière organique (feuilles et branches), et si l'hypothèse du filet de sécurité suggère que les arbres sont à même de capturer des éléments (nitrates en particulier) qui seraient sinon lixiviés et de les réintroduire dans le système via leur litière, une partie des nutriments est néanmoins exportée, soit sous forme de récolte ou de taille : et donc il faut combler ce déficit, en azote particulièrement. Certaines études montrent cependant que des arbres fixateurs d'azote (aulne, robinier...) en transfèrent *une partie* à la culture adjacente. Inversement, des transferts des cultures associées vers les arbres semblent possibles, mais nécessitent une période de plusieurs années.

Dans une méta-analyse, Torrablba et al. (2016) montrent à nouveau que les bénéfices, en termes de productivité, sont inégaux. En revanche, l'agroforesterie, par rapport à l'agriculture conventionnelle, a un effet clairement positif sur la limitation de l'érosion des sols, la fertilité des sols (augmentation de la matière organique et concentration des nutriments) et la biodiversité, surtout celle des oiseaux. Les effets semblent particulièrement forts dans les régions de fortes températures et faibles précipitations.

Les clefs du succès

Même si la gestion temporelle et spatiale de ces systèmes est souvent complexe (établissement, fertilisation, irrigation, taille et récolte), on peut tirer des résultats ci-dessus certaines généralisations et envisager, avec succès, l'addition de haies ou d'allées d'arbres, que ce soit pour réaliser des coupe-vent, des ceintures ou un système de culture en allées.

La lumière est un facteur limitant, mais mineur si le *design* est bien géré (largeur et orientation nord-sud des allées ; choix des espèces selon

leur hauteur, leur volume, leur caducité ; densité de plantation intra-allées ; taille plus ou moins sévère des arbres).

La compétition pour les nutriments est minimale si les systèmes sont fertilisés de façon conséquente. Des fixateurs d'azote peuvent jouer un rôle, mais leur potentiel a été peu exploré. Il semble y avoir un rôle de filet de sécurité pour limiter les pertes de nutriments.

La compétition pour l'eau semble être le facteur limitant le plus important et il a été suggéré que la taille des arbres, qui a un effet sur les racines, la construction de tranchées et la mise en place de plastiques de contention sont des solutions possibles (voire la coupe des racines !). Mais l'irrigation reste indispensable avec les cultures associées, et également pour les jeunes arbres.

Le rôle de l'allélopathie, même avec des espèces « soupçonnées », reste ambigu : on évitera l'utilisation exclusive du noyer, pour lequel elle a été démontrée (et pour le pécan).

8.6.2 Forêt-jardin

Objectifs

On a affaire à des systèmes multi-strates (arbres, arbustes, plantes grimpantes, légumes, racines, champignons), avec de nombreuses plantes pérennes et une très grande diversité spécifique (beaucoup plus que dans l'agroforesterie).

Les objectifs sont de la nourriture de qualité, mais aussi des herbes médicinales[325], du bois de chauffage ou d'œuvre, de la fixation d'azote, de la nourriture pour des pollinisateurs, de la séquestration de carbone et l'amélioration du microclimat.

Résultats

L'étude de Björklund et al. (2019), sur 12 expériences, mérite vraiment d'être détaillée, car on y voit un retour d'expériences, sur des tentatives inspirées des ouvrages traitant de forêts-jardins. Les participants suggèrent d'abord d'éliminer les grands arbres (>10m). Pour les arbres intermédiaires, pommiers et noisetiers ne posent aucun

[325] Bien que, personnellement, j'ai plus *confiance* dans les lobbies pharmaceutiques pour me soigner.

problème, mais le caraganier de Sibérie (source de protéines) présente une limite, que l'on retrouve dans nombre de propositions issues des livres de forêts-jardins en optique permaculture : il faut améliorer les variétés, ce sont en effet, d'une part, des espèces rares, difficiles à trouver, et d'autre part, leur goût est diversement apprécié. On peut reprendre ces deux remarques pour la couche intermédiaire (chalef argenté, argousier, amélanchier et cognassier du Japon). Enfin, pour les herbacées pérennes (menthe, origan, hysope, cerfeuil musqué, hémérocalles, mauve, et enfin chénopode Bon-Henri), sans faire de mauvais esprit, on se voit mal constituer, avec tout cela, de véritables repas. La couche de couverture de sol n'a pas très bien fonctionné... sauf aux bordures, où les fraises et les topinambours ont bien marché ; on s'interrogera encore sur le choix de la renouée vivipare. Pour les grimpantes, des mûres et des vignes sont devenues envahissantes et demandent un entretien régulier, mais l'actinidia (kiwi) a eu du mal à s'installer. Reste l'épinard grimpant du Caucase qui semble une possibilité...

Certaines forêts-jardins ont été envahies par la flore spontanée. Cela s'améliore avec les visites qui demandent taille, désherbage et irrigation. De même, la récolte prend beaucoup de temps dans un système éclaté et est parfois *négligée*... Les participants indiquent que le temps de travail affecte clairement le résultat, ainsi que la fertilisation initiale (ou amendement) : une forêt-jardin, comme tout agrosystème, ne peut être laissé à l'abandon. Certaines espèces, comme la menthe, la consoude et les mûres sont invasives. Et la présence de ravageurs, comme des campagnols et des cerfs... dont il faut se protéger ; il faut enfin laisser les arbres s'établir d'abord, ce qui prend *un peu* de temps.

Pour l'*expérience de manger,* il est indiqué que : « Il suffit d'élargir la définition de ce qu'est une salade, pour inclure des herbes, des fleurs et des feuilles. » Mais *personnellement*, j'y ajouterais de la laitue, de la chicorée, de la mâche, du cresson, de l'épinard, de la moutarde, des verdures asiatiques... Les participants reconnaissent qu'avec ces systèmes, même si la littérature (non-scientifique) semble suggérer que 200 m^2 de culture pourraient suffire à fournir l'énergie nécessaire à un être humain... une telle alimentation serait rude.

Ils considèrent également que la technologie n'est pas adaptée à ce type de culture. En revanche, tout le monde s'accorde à trouver intéressante l'esthétique des forêts-jardins, passionnante leur biodiversité et agréable leur microclimat.

Allen et Mason (2021) indiquent d'ailleurs que la production est rarement commercialisée ou que certains finissent par faire un maraîchage classique à côté ; et qu'une part des revenus générés par ces forêts-jardins provient de visites, de cours, de consultations pour la mise en place d'autres forêts-jardins... En effet, l'information spécifique sur ces systèmes est rare et les expérimentateurs manquent souvent de formation ou d'expérience agricoles classiques. La profitabilité reste donc à trouver et il n'est évident que ces modes de culture puissent un jour permettre de résoudre l'équation de la durabilité, car ils semblent finalement assez extensifs, malgré leur luxuriance. La dimension économique est abordée dans l'étude d'Albrecht et Wiek (2021) qui, sur 209 forêts-jardins (quand même !), observent que seules 10 % se donnent comme objectif explicite la production. Si ces systèmes ont de bonnes performances sur les critères de services culturels et environnementaux, les structures et les pratiques économiques semblent peu stables et durables. Ils précisent que « pour beaucoup l'idéalisme est une monnaie alternative : un style de vie naturel et une résistance au système agricole conventionnel compensent les difficultés économiques ». La conclusion des auteurs est que les praticiens des forêts-jardins manquent d'expérience en agriculture ou en maraîchage, de connaissances concernant les cultures et d'une formation entrepreneuriale, afin de vraiment vivre de leur travail.

L'autre problème, pour la viabilité de ces projets, est le temps très long de mise en place, a minima dix ans, sachant que nos vies ont une durée limitée et sont souvent sujettes à des perturbations. (Je ne sais pas si vous l'aviez remarqué ?)

Les clefs du succès

La compétition pour la lumière semble donc être un problème déterminant en zone tempérée. De bons espacements et le placement de plantes avec des hauteurs croissantes du sud vers le nord s'imposent ; ainsi que des cultures légumières au sud, sur les marges ou dans des clairières.

La mode pour des espèces très rares, comestibles mais pas forcément savoureuses, avec un choix inexistant de cultivars et des itinéraires techniques inconnus, sont des obstacles inutiles au succès de telles intéressantes expériences.

Il semble indispensable, comme dans les autres modes de jardinage, d'avoir recours à une irrigation et à une fertilisation raisonnées, et des entretiens réguliers.

8.7 Références

Albrecht, S., & Wiek, A. (2021). Food forests: Their services and sustainability. *Journal of Agriculture, Food Systems, and Community Development*, *10*(3), 91-105.

Allen, J. A., & Mason, A. C. (2021). Urban food forests in the American Southwest. *Urban Agriculture & Regional Food Systems*, *6*(1), e20018.

Andow, D.A. (1991). Vegetational diversity and arthropod population response. *Annual Review of Entomology*, *36*, 561-86.

Björklund, J., Eksvärd, K., & Schaffer, C. (2019). Exploring the potential of edible forest gardens: experiences from a participatory action research project in Sweden. *Agroforestry Systems*, *93*(3), 1107-1118.

Bomford, M. K. (2009). Do tomatoes love basil but hate Brussels sprouts? Competition and land-use efficiency of popularly recommended and discouraged crop mixtures in biointensive agriculture systems. *Journal of Sustainable Agriculture*, *33*(4), 396-417.

Bomford, M. K. (2004). *Yield, pest density, and tomato flavor effects of companion planting in garden-scale studies incorporating tomato, basil, and brussels sprout*. West Virginia University.

Bond, W., & Grundy, A. C. (2001). Non-chemical weed management in organic farming systems. *Weed Research*, *41*(5), 383-405.

Brown, B., Hoshide, A. K., & Gallandt, E. R. (2019). An economic comparison of weed management systems used in small-scale organic vegetable production. *Organic Agriculture*, *9*(1), 53-63.

Bhullar, M. S., Kaur, T., Kaur, S., & Yadav, R. (2015). Weed management in vegetable and flower crop-based systems. Indian *Journal of Weed Science ,47*(3): 277–287.

Chacko, S. R., Raj, S. K., & Krishnasree, R. K. (2021). Integrated weed management in vegetables: A review. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, *10*(2), 2694-2700.

Chacon, J. C., & Gliessman, S. R. (1982). Use of the "non-weed" concept in traditional tropical agroecosystems of south-eastern Mexico. *Agro-ecosystems*, *8*(1), 1-11.

Cléments, D. R., Weise, S. F., & Swanton, C. J. (1994). Integrated weed management and weed species diversity. *Phytoprotection*, *75*(1), 1-18.

Cousens, R. (1985). A simple model relating yield loss to weed density. *Annals of Applied Biology, 107*(2), 239-252.

Cousens, R., Brain, P., O'Donovan, J. T., & O'Sullivan, P. A. (1987). The use of biologically realistic equations to describe the effects of weed density and relative time of emergence on crop yield. *Weed Science, 35*(5), 720-725.

De Frece, A., & Poole, N. (2008). Constructing livelihoods in rural Mexico: milpa in Mayan culture. *The Journal of Peasant Studies*, *35*(2), 335-352.

Deb, D., Dutta, S., & Erickson, R. (2022). The robustness of land equivalent ratio as a measure of yield advantage of multi-crop systems over monocultures. *Experimental Results*, *3*.

Finch, S., Billiald, H., & Collier, R. H. (2003). Companion planting–do aromatic plants disrupt host-plant finding by the cabbage root fly and the onion fly more effectively than non-aromatic plants?. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, *109*(3), 183-195.

Firbank, L. G., & Watkinson, A. R. (1985). On the analysis of competition within two-species mixtures of plants. *Journal of Applied Ecology*, *22*(2), 503-517.

Fryer, J. D. (1979). Introduction to Weed Problems 1. *EPPO Bulletin*, *9*(1), 73-80.

Garibaldi, A., Gullino, M. L., & Minuto, G. (1997). Diseases of basil and their management. *Plant Disease*, *81*(2), 124-132.

Gliessman S.R. (2015) *Agroecology : the ecology of sustainable food systems*. Boca Raton, FL : CRC Press.

Jeavons, J. (2017) *How to grow vegetables* (9th edition). Ten speed press.

Jose, S., Allen, S. C., & Nair, P. R. (2008). Tree-crop interactions: lessons from temperate alley-cropping systems. *Ecological Basis of Agroforestry*, 15-36, CRC Press.

Jose, S., Gillespie, A. R., & Pallardy, S. G. (2004). Interspecific interactions in temperate agroforestry. *Agroforestry Systems*, *61*(1), 237-255.

Jolliffe, P.A. (1997). Are mixed populations of plant species more productive than pure stands? *Oikos 80*, 595-602.

Knezevic, S. Z., Evans, S. P., Blankenship, E. E., Van Acker, R. C., & Lindquist, J. L. (2002). Critical period for weed control: the concept and data analysis. *Weed Science*, *50*(6), 773-786.

Lichtenhahn, M., Koller, M., Dierauer, H., & Baumann, D. (2005). *Weed control in organic vegetable cultivation*. Guide technique FiBL.

Lopez-Ridaura, S., Barba-Escoto, L., Reyna-Ramirez, C. A., Sum, C., Palacios-Rojas, N., & Gerard, B. (2021). Maize intercropping in the milpa system. Diversity, extent and importance for nutritional security in the Western Highlands of Guatemala. *Scientific Reports*, *11*(1), 1-10.

Malézieux, E., Crozat, Y., Dupraz, C., Laurans, M., Makowski, D., Ozier-Lafontaine, H., ... & Valantin-Morison, M. (2009). Mixing Plant Species in Cropping Systems: Concepts, Tools and Models: A Review. In E. Lichtfouse., M. Navarrete, P. Debaeke., S. Véronique and C. Alberola (Eds.), *Sustainable Agriculture*. Springer, Dordrecht. .

Maxwell, B. D., O'Donovan, J. T., Upadhyaya, M., & Blackshaw, R. (2007). Understanding weed-crop interactions to manage weed problems. *Non-Chemical Weed Management: Principles, Concepts and Technology. Oxfordshire, UK: CAB International*, pp.17-33.

Mead, R. (1970). Plant density and crop yield. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*, *19*(1), 64-81.

Melander, B., Rasmussen, I. A., & Bàrberi, P. (2005). Integrating physical and cultural methods of weed control—examples from European research. *Weed Science*, *53*(3), 369-381.

Mennan, H., Jabran, K., Zandstra, B. H., & Pala, F. (2020). Non-chemical weed management in vegetables by using cover crops: A review. *Agronomy*, *10*, 257.

Rodríguez-Robayo, K. J., Méndez-López, M. E., Molina-Villegas, A., & Juárez, L. (2020). What do we talk about when we talk about milpa? A conceptual approach to the significance, topics of research and impact of the mayan milpa system. *Journal of Rural Studies*, *77*, 47-54.

Storkey, J. (2006). A functional group approach to the management of UK arable weeds to support biological diversity. *Weed Research*, *46*(6), 513-522.

Tei, F., & Pannacci, E. (2017). Weed management systems in vegetables. In P.E. Hatcher and R.J. Froud-Williams (Eds.), *Weed Research: Expanding Horizons*. Wiley.

Torralba, M., Fagerholm, N., Burgess, P. J., Moreno, G., & Plieninger, T. (2016). Do European agroforestry systems enhance biodiversity and ecosystem services? A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *230*, 150-161.

Tursun, N., Bükün, B., Karacan, S. C., Ngouajio, M., & Mennan, H. (2007). Critical period for weed control in leek (Allium porrum L.). *HortScience*, *42*(1), 106-109.

Vandermeer, J. (1989). The competitive production principle. In *The Ecology of Intercropping* (p. 29-45). Cambridge: Cambridge University Press.

Van Der Weide, R., Bleeker, P. O., Achten, V. T. J. M., Lotz, L. A. P., Fogelberg, F., & Melander, B. (2008). Innovation in mechanical weed control in crop rows. *Weed research*, *48*(3), 215-224.

Watkinson, A. R. (1980). Density-dependence in single-species populations of plants. *Journal of Theoretical Biology*, *83*(2), 345-357.

Weston, L.A. (1996). Utilization of allelopathy for weed management in agroecosystems. *Agronomy Journal, 88*, 860-866.

Yildirim, E., & Turan, M. (2013). Growth, yield and mineral content of broccoli intercropped with lettuce. *Journal of Animal and Plant Sciences*, *23*(3), 919-922.

Yoda, K., Kira, T., Ogawa, H. & Hozumi, K. (1963). Self-thinning in overcrowded pure stands under cultivated and natural conditions (Intraspecificompetition among higher plants XI). *Journal of Biology Osaka City University, 14*,107-129.

8.8 Ctrl-R

```
##############################
########## PRODUCTION D OIGNONS
##############################
# Exemple 1 de Mead avec la première variété d'oignon

wobs<-c(105.6,89.4,71,60.3,47.6,37.7,30.3,24.2,20.8,18.5)
nobs<-
c(3.07,3.31,5.97,6.99,8.67,13.39,17.86,21.57,28.77,31.08)

# On passe en kilos
wobs<-wobs/1000

# Le résultat de son ajustement avec la fonction
alpha<-5.245
beta<-1.586
theta<-1
n<-0:35
Mead_w<-function(n,alpha,beta,theta){
(alpha+beta*n)^(-1/theta)
}

par(mfrow=c(1,2))
# Le graphe du poids moyen des plants
plot(nobs,1000*wobs,xlim=c(0,35),pch=1,cex=2,
xlab="Densité (plantes/feet^2)",ylab="Poids moyen des oignons
(g)")
lines(n,1000*Mead_w(n=n,alpha=alpha,beta=beta,theta=theta),lw
d=2)


# Le graphe de la récolte d'oignons
plot(nobs,1000*nobs*wobs,xlim=c(0,35),ylim=c(0,600),pch=1,cex
=2,
xlab="Densité (plantes/feet^2)",ylab="Récolte des oignons
(g/feet^2)")
lines(n,1000*n*Mead_w(n=n,alpha=alpha,beta=beta,theta=theta),
lwd=2)

# Equivalence dans le système de Firbank

wm<-alpha^(-1/theta)
A<-beta/alpha
B<-1/theta
```

```
Firbank_w<-function(n,wm,A,B){
wm*(1+A*n)^(-B)
}

# graphe par plant
plot(nobs,wobs)
lines(n,Firbank_w(n,wm,A,B))


# Graphe de la récolte
plot(nobs,nobs*wobs)
lines(n,n*Firbank_w(n=n,wm=wm,A=A,B=B))

# Ce qui se passe lorsque B>1
alpha<-5.245
beta<-1.586
theta<-0.5
wm<-alpha^(-1/theta)
A<-beta/alpha
B<-1/theta
plot(n,1000*n*Firbank_w(n=n,wm=wm,A=A,B=B),type="l",lwd=2,
xlab="Densité",ylab="Récolte")
```

9 Adiversité

9.1 Plantes et interactions

Nous avons vu auparavant que les plantes entretenaient, entre elles, essentiellement des relations de compétition ; mais aussi qu'elles avaient avec la biodiversité du sol des relations positives (du mutualisme dans la rhizosphère jusqu'à la symbiose avec des microbes) ou bien des relations négatives, sur lesquelles nous avions alors peu insisté : avec des nématodes phytophages ou des champignons pathogènes, par exemple.

Tableau 19 : Types d'interactions possibles entre deux espèces (des organismes de la même espèce peuvent aussi être en interaction de compétition, de cannibalisme ou de mutualisme).

Type d'interaction	**Espèce 1**	**Espèce 2**
Symbiose	++	++
Mutualisme	+	+
Commensalisme	+	**0**
Neutralisme	**0**	**0**
Amensalisme	-	**0**
Compétition	-	-
Parasitisme	-	+
Prédation	- -	++

« Au-dessus du sol », les plantes sont aussi en interaction avec les êtres vivants des autres règnes. Ces relations peuvent être négatives, avec ceux qui sont appelés bioagresseurs (et parfois ennemis des cultures). Parmi ces derniers, sont incluses les mauvaises herbes, dont j'ai largement parlé dans le chapitre précédent ; aussi, pour préciser que je me limiterai dans ce nouveau chapitre aux *bioagresseurs non-végétaux*, je vais proposer le néologisme d'adiversité. Cela permet de se souvenir que, même si ces organismes sont dans l'*équipe adverse*, ils n'en restent pas moins partie intégrante de la *biodiversité* et du fonctionnement normal des écosystèmes.

Outre les cultures et leur jardinier, *notre* équipe comprend des auxiliaires de culture. Dans ceux-ci, on distingue les relations directement positives, comme c'est le cas avec les pollinisateurs, et les

relations indirectement positives, comme c'est le cas avec les ennemis naturels, prédateurs ou parasitoïdes, de l'adiversité.

Il est très courant d'évaluer le stress biotique causé par cette adiversité, que ce soit en termes de perte de culture ou de perte financière[326]. Pour ne citer qu'un seul exemple, Oerke (2006) estime, sur cinq cultures importantes, les pertes potentielles mondiales dues aux maladies à 16 % et celles dues aux bioagresseurs animaux (insectes, nématodes, oiseaux...) à 18 % ; pertes qui sont toutes deux réduites à 11 % par les divers contrôles[327].

> Du côté de chez Stéphane : Pour reprendre, un court moment, la discussion sur la différence entre les fruits et les légumes produits en agriculture conventionnelle et en agriculture biologique, une méta-analyse a montré que certains composés (métabolites secondaires), favorables à la santé étaient plus présents dans les produits biologiques (+12 % selon Brandt et al., 2011). Une explication à la présence de ce supplément pourrait venir des agressions plus nombreuses des ravageurs en agriculture biologique ! Ibanez et al. (2019) ont montré, sur des fraisiers, que les attaques par des insectes augmentaient la présence de tels composés bénéfiques. On peut donc, d'une certaine façon, se réjouir que notre potager soit attaqué et ne pas voir dans les bioagresseurs que des ennemis irréductibles...

Ce chapitre est donc consacré à la gestion de l'adiversité, qui se résume parfois en une simple *mhorticulture*, par emploi de pesticides, procédé qui nous débarrasse indistinctement du puceron, de son prédateur et du pollinisateur qui passe. Heureusement, la gestion de l'adiversité peut aussi consister en des formes de lutte plus compatibles

---

[326] Notons que la valeur économique des services de la biodiversité a également fait l'objet d'estimations, pour rendre compte de la catastrophe que représente, ne serait qu'économiquement, l'extinction des espèces. La valeur de la pollinisation se monte ainsi à 9.5 % de la valeur de la production agricole, d'après Gallai et al. (2009).

[327] La perte peut dépasser 50 % dans les pays en développement, et même détruire entièrement les cultures.

avec la santé humaine et l'environnement. Cela demandera une adaptation de méthodes, souvent développées en grandes cultures, à la situation du potager. Ce dernier regroupe en effet de nombreuses cultures, et conséquemment les nombreux problèmes qui leur sont associés, dans un petit espace ; les enjeux financiers y sont, en outre, bien différents.

9.2 Besti-of de l'adiversité

Afin de faire face au potager, il importe de bien connaître l'adiversité : ses dates d'activité, son cycle de vie, ses habitats et ses conditions climatiques préférés, sa nutrition, sa reproduction, sa dispersion et ses ennemis. La tâche est immense, et pour en donner une petite idée, je vais ici me contenter d'une présentation de trois de ces bioagresseurs. Afin d'obtenir des informations sur le mode de vie d'autres ennemis des cultures, je conseille la lecture d'un guide gratuit : « *Observation et suivi des bioagresseurs au jardin* » *:* (https://agriculture.gouv.fr).

9.2.1 Limaces

Les limaces sont des mollusques terrestres, et plus précisément, des gastéropodes sans coquille. Elles ont évolué, à plusieurs reprises, à partir d'espèces d'escargots, auxquels elles sont donc fortement apparentées. Il existe en Europe environ 40 espèces de limaces, se différenciant par leur taille adulte, leur couleur, leur motif. On en distingue deux groupes : les espèces de surface et les espèces souterraines.

Les limaces vivent un ou deux ans. Elles se reproduisent à partir de quatre mois, pour les espèces les plus précoces. Elles sont hermaphrodites et la fécondation est le plus souvent croisée. Le nombre d'œufs produits durant la vie d'une limace est de l'ordre de quelques centaines ; et ils sont plus ou moins enterrés ou déposés sous des résidus de culture, selon les espèces. Le cycle de vie n'est pas bien synchronisé, même à l'intérieur d'une espèce, ce qui explique que l'on retrouve tous les stades, du juvénile à l'adulte, tout au long de l'année. Toutefois, les limaces passent usuellement l'hiver sous forme d'œufs. Leurs températures optimales se situent entre 15 °C et 20 °C, et elles sont en

activité à partir de 5 °C. Au-dessous de 0 °C et au-dessus de 30 °C, les températures deviennent létales. La présence d'humidité est un facteur fondamental de leur activité : c'est pourquoi les limaces sont plus ou moins présentes en fonction des intempéries, d'avril à juin (plutôt des juvéniles), puis en septembre-octobre. Elles préfèrent les sols lourds aux sols sableux. Ce sont des animaux essentiellement nocturnes, plutôt actifs dans les deux heures qui suivent le coucher du soleil et les deux heures qui précèdent son lever. Le jour, elles s'abritent soit dans le sol, soit en surface dans des conditions humides, typiquement un paillage. La faculté de déplacement des limaces est assez limitée, de l'ordre de 1 à 3.5 mètres par jour ; elles restent, le plus souvent, à moins de cinq mètres du point où elles sont relâchées, comme l'ont montré diverses expériences. Elles ont le corps couvert de mucus et en sécrètent pour se mouvoir : on peut d'ailleurs les repérer à ces traces.

Les limaces ont un système olfactif développé, situé sur deux de leurs tentacules frontaux ; les deux autres tentacules portant des yeux. Elles se nourrissent, juvéniles comme adultes, de plantes très diverses, avec une prédilection pour les jeunes plantules. À défaut, elles peuvent aussi consommer des graines, des racines, des tiges, des fleurs... Les limaces se nourrissent également de champignons, de résidus de culture et de divers invertébrés, voire même, pour certaines espèces, d'autres limaces ! Lorsque le sol est peu perturbé et couvert de résidus, comme c'est le cas dans l'agriculture de conservation, les risques de dommages sont particulièrement élevés en années pluvieuses. Les limaces sont, dans ce contexte, devenues le bioagresseur numéro un (Douglas & Tooker, 2012). Non seulement, elles peuvent limiter l'installation des cultures, en consommant les graines et les plantules, mais elles diminuent la récolte, en affaiblissant les plantes survivantes, et en réduisent la qualité.

Les méthodes de contrôle chimique sont, en premier lieu, le Métaldéhyde qui a été classé comme CMR (substances cancérogènes, mutagènes et toxiques pour la reproduction) au niveau 2 en 2021, ce qui n'encourage guère son emploi. Le phosphate de fer, utilisable en agriculture biologique, semble plus inoffensif, mais des « améliorations » y ajoutant des agents chélateurs, ont conduit à des doutes quant à son innocuité pour les vers de terre, voire pour les mammifères (dit plus clairement les animaux domestiques et l'être

humain ; Edwards et al., 2009). De surcroît, ces produits sont relativement solubles, et dès qu'il pleut régulièrement, c'est-à-dire quand il y a le plus de limaces, ils sont bien moins efficaces.

Il existe des méthodes de contrôle biologique commercialisées, à base de nématodes parasites, mais leur action est relative, même en serre. D'autres pistes sont des mouches des marais parasitoïdes et les carabes prédateurs : les recherches sont en cours. De même, plusieurs huiles essentielles (par exemple de thym, de menthe verte) semblent performantes pour tuer les limaces. Des extraits de plantes, comme la renouée du Japon, la sauge, l'origan... ou la caféine sont prometteurs, soit directement pour les repousser, irriter ou rendre le légume impropre à la consommation, soit indirectement pour renforcer les défenses des plantes. Cependant, les modes optimaux d'utilisation et les contre-indications sont, pour l'heure, mal connus (Barua et al., 2021).

Des méthodes de contrôle cultural sont évoquées dans Le Gall et Tooker (2017), visant à anticiper les dates de semis, pour que les plants soient alors plus grands et moins vulnérables ; à prolonger le séjour à l'intérieur des semis indirects, pour implanter des plantules plus âgées ; ou à mettre en place des cultures « pièges », particulièrement appétissantes (du seigle, par exemple) et pouvant simultanément abriter des ennemis naturels.

Pour le potager, plusieurs méthodes de contrôle physique des limaces sont envisageables. Le travail du sol a un fort effet, particulièrement sur les œufs plus fragiles (Le Gall & Tooker, 2017). Divers pièges ont montré une bonne réduction (Santacruz et al., 2011). Primo, les pièges à bière[328] qui les attirent et où elles se noient. Secundo, les pièges à lait qui appâtent également les limaces, mais dont elles peuvent s'échapper. Tertio, des abris comme des morceaux de sisal humidifiés, où elles viennent s'abriter, mais qui demandent, chaque jour, une collecte. Quarto, pour le jardinier insomniaque, la cueillette nocturne s'avère efficiente. Reste un problème, comment ensuite *s'en débarrasser* ?

---

[328] Des tasses enterrées à hauteur de la surface du sol et coiffées d'un couvercle percé de trous de 1 cm de diamètre, pour limiter la pluie et l'évaporation.

C'est justement l'une des questions traitées dans un article passionnant sur le comportement des jardiniers amateurs envers les limaces. Ginn (2013) considère la limace comme étant un test de notre relation au vivant, car elles sont *monstrueusement* différentes, sont quelque peu dégoûtantes et sont omniprésentes. Diverses estimations font en effet état de 10 voire 70 limaces au mètre carré (Stephenson, 1968) ! Il est d'autant plus difficile d'envisager d'avoir avec elles des relations éthiques, voire généreuses et empathiques, comme peuvent le proposer de nouvelles approches juridiques, philosophiques ou de sciences sociales et humaines, étendant leur domaine au-delà des êtres humains, pour mieux prendre en considération les animaux. Le cadre domestique du jardin offre une occasion concrète d'expérimenter un tel « challenge éthique », par la confrontation directe avec la biodiversité dans son ensemble : « le mal-aimé, l'invisible, le monstrueux », et pas seulement les chatons. Les jardiniers utilisent plusieurs des moyens précédemment cités pour se défaire des limaces, mais *non sans culpabilité*. Divers expédients sont recherchés pour, au moins, les « tuer bien », ou mieux, pour éviter leur mort : les cueillir et les emmener au loin, ne plus avoir certaines plantes trop appétissantes, les tolérer seulement à certains endroits du jardin... Par leur présence, elles obligent à changer de plantes et de plans. L'auteur conclut qu'il faut peut-être imaginer d'étendre le sens du mot « relation » à des degrés moins intenses, émotionnellement et affectivement, quand il est question des non-humains : un sens plus proche du *détachement*, comme peut l'être « l'objectivité désintéressée de la science » qui garde une distance avec son objet d'étude, mais lui *fait une place*...

9.2.2 Altises du chou

Les altises sont des coléoptères s'attaquant aux brassicacées. Il s'agit, le plus souvent dans les potagers, de l'altise noire des crucifères (*Phyllotreta atra*) et de l'altise des crucifères (*Phyllotreta nemorum*) ; mais d'autres espèces des genres *Phyllotreta* ou *Psylliodes* sont présentes en grandes cultures sur le colza. Les altises sont noires et de petite taille (2 à 3 mm).

Les altises adultes passent l'hiver en diapause, avec un très bon taux de survie, typiquement sous des tas de feuilles. Elles se réveillent

courant avril-mai, à partir de 10-12 °C, pour se nourrir de jeunes plants. Elles sont capables d'un grand déplacement afin de trouver de quoi manger (Knodel, 2017). En ce qui concerne la reproduction, une seule génération est observée (~25 œufs par femelle). Les œufs de l'altise noire sont déposés au sol, au pied de la plante-hôte, et les larves vont s'attaquer à ses racines. Quant à l'autre altise, les œufs sont placés sur les feuilles et c'est de celles-ci dont les larves vont se nourrir. La métamorphose, qui prend environ un mois et finit par un stade pupal, a lieu dans le sol : les adultes émergent en juillet-août, selon l'espèce, et se nourrissent en début d'automne sur des choux adultes, avant d'hiverner. En fait, ces altises ne se contentent pas de chou et ajoutent fréquemment à leur menu : radis, navet, roquette, moutarde...

Les dégâts sont surtout graves pour les plantules, lors des deux premières semaines d'émergence en cas de semis direct ; les brassicacées adultes survivent, elles, sans problème, mais leur aspect est évidemment moins agréable, avec leur feuillage troué. Il faut savoir que les mâles se trouvant sur leur plante-hôte libèrent des phéromones qui attirent d'autres altises, entre autres pour se reproduire, qui par agrégation, font de plus grand ravages (Li et al., 2024). Les traitements usuels sont des pesticides, certains comme les néonicotinoïdes (directement employés sur les graines) ont été interdits[329] depuis 2013, mais d'autre comme les pyréthrinoïdes rencontrent de plus en plus de résistance.

Si nous nous tournons vers des alternatives plus durables, la lutte ne s'avère pas simple. Il est intéressant de noter que les brassicacées ont un système chimique de défense (glucosinolates) contre les bioagresseurs, auquel les altises se sont justement adaptées. Pire que cela, elles recherchent même ce composé qui les attire et il leur permet de devenir, elles-mêmes, moins appétissantes pour leurs ennemis naturels ! Quant aux défenses physiques des plantes, il semble que des variétés avec des cuticules plus épaisses ou des « poils » sur les feuilles résistent mieux, mais ce n'est, pour l'instant, qu'une piste pour la sélection. Outre ces défenses constitutives, les plantes ont également

[329] Mais avec une valse entre dérogation et interdiction, définitive en 2023 ?

des défenses induites par les attaques, mais cela ne semble pas très bien fonctionner dans notre cas : seule la moutarde blanche y parvient.

En ce qui concerne le contrôle cultural, là encore, les rotations évitent les sols infestés en amont. Un travail du sol préalable et divers binages débarrassent des adultes, œufs, larves ou nymphes, selon la période. Il est possible de semer plus dru[330] pour tenir compte des attaques sur les plantules, plus fragiles. Des décalages de dates sont intéressants, en semant plus tôt pour passer le cap de plantules avant l'apparition du ravageur, ou bien en installant des transplants plus âgés afin qu'ils leur résistent mieux. Des graines de plus gros calibre permettraient aussi de mieux affronter les altises (Knodel, 2017). Le mélange avec d'autres cultures s'est avéré avantageux, mais nous parlons d'expérimentations sur des monocultures de colza, peu semblables à nos petits potagers très diversifiés. Des pièges collants sont employés par les professionnels, non pas pour éliminer les altises, mais pour suivre la progression de leur population, et pour décider d'une action éventuelle. Pour réagir, il existe également des biopesticides (Spinosad).

Plus inoffensif pour les abeilles, un contrôle mécanique avec des filets anti-insectes bloque au préalable la venue de nouveaux ravageurs. Les altises aiment les périodes chaudes et sèches, l'arrosage par aspersion pourrait les ralentir.

En revanche, les essais d'utilisation de contrôle biologique n'ont guère été concluants, à part quelques expériences avec des nématodes. Quant à d'autres ennemis naturels, la grande mobilité des altises adultes, par vol ou par saut, les sauvent généralement.

9.2.3 Mildiou (de la pomme des terre)

Le mildiou est un terme générique qui désigne différentes maladies s'attaquant aux feuilles, propres à des espèces ou des familles. En ce qui concerne les solanacées, particulièrement la pomme de terre et la tomate, il s'agit de *Phytophtora infestans*, un oomycète (protiste très proche des champignons).

---

[330] Semer deux fois plus dru permet d'obtenir une récolte identique à celle avec utilisation de pesticides (Li et al., 2024).

La dissémination de la maladie est assez complexe. Du mycélium peut survivre en hiver dans des tubercules infectés (mais aussi dans des résidus de culture). Lorsque les nouveaux plants émergent, ils sont d'entrée contaminés : c'est la dissémination primaire. Des sporangiophores apparaissent au-dessous des feuilles, à travers les stomates, et produisent[331] des spores (zoosporanges et zoospores) qui sont alors dispersées, par le vent, vers d'autres plants : c'est la dissémination secondaire. Ces spores germent, infectent le feuillage sain et un mycélium se développe à l'intérieur en se nourrissant de nutriments de ses cellules. Sur la face inférieure, des sporangiophores apparaissent et... c'est reparti pour un nouveau cycle de dissémination. La dissémination secondaire peut aussi se réaliser par l'eau dans le sol, et par conséquent, par les tubercules. Les conditions optimales de développement sont un temps assez chaud (entre 10 et 25 °C, les pommes de terre primeur ne sont donc pas concernées), humide et par faible vent. Il est alors possible d'observer une à deux générations par semaine, avec une contamination très rapide. À l'inverse, un temps ensoleillé, très chaud et sec va stopper le processus.

La maladie se repère, toujours avec retard, à l'apparition de lésions sur le pourtour des feuilles, mais surtout ensuite, à celle de taches noires qui envahissent leur centre, puis à celle d'un feutrage blanchâtre (les sporangiophores) sur la face inférieure, pour finir par une nécrose rapide. Les mêmes taches noires se repèrent sur les tiges, suivies d'un dessèchement de l'ensemble de la plante infectée.

Les méthodes de lutte (Arora et al., 2014) sont essentiellement préventives[332]. Les rotations de culture sont, là aussi, très importantes, ainsi que le ramassage des tubercules potentiellement infectés, des résidus et des repousses de l'année suivante, tous sources de dissémination primaire. Il existe également des cultivars présentant

---

[331] C'est une reproduction asexuée, mais il existe depuis les années 1980 une reproduction sexuée avec une nouvelle souche A2, plus virulente que l'ancienne souche A1, qui permet bien entendu une variabilité génétique plus élevée, une évolution plus rapide et qui est donc plus difficile à maîtriser. Ce sont des oospores capables de rester dans le sol, sans hôte, jusqu'au printemps suivant.

[332] Je parle ici d'approches non-chimiques, contrairement au Metalaxyl qui a été énormément utilisé et pour lequel sont apparues des formes de résistance.

une bonne résistance[333] et des procédures de certification des semences limitant les maladies. Les plants doivent être installés au soleil, pour un séchage rapide de leurs feuilles ; et assez séparés, pour autoriser une bonne ventilation. Lors de la culture, les arrosages doivent se faire au pied des plants, en évitant l'aspersion des feuilles. La fertilisation azotée doit rester modérée.

En cas d'infestation, il faut supprimer les feuilles concernées, voire même le plant entier.

En termes de contrôle chimique, en agriculture biologique, seuls des dérivés du sulfate de cuivre sont autorisés, mais ce n'est pas curatif[334]. Il faut donc agir préventivement lors de situations à risques : c'est-à-dire en fonction du temps, d'une inspection soigneuse de l'état de la culture, et pour les professionnels, d'alertes de système épidémiologique de surveillance.

9.2.4 Diférence[335]

Il me semblait nécessaire, sur trois exemples, d'entrer dans le détail, pour bien saisir que l'adiversité était constituée d'organismes fort diférents. Quoi, en effet, de plus diférent qu'un coléoptère, un « champignon » et un mollusque ? Non seulement sur le plan évolutif : leurs cycles de vie et de développement (voir Figure 105 pour un schéma général : reproduction, dissémination, survie...) sont diférents, s'exprimant à l'occasion de conditions climatiques et de dates diférentes, dans des habitats et/ou des plantes-hôtes diférentes et en faisant face à des ennemis diférents.

Dès lors, les moyens et périodes de lutte risquent d'être diférents et propres à chaque bioagresseur qu'il importe de bien connaître. Plus généralement, cela permet de prendre conscience des diférentes façons d'être vivant dans notre potager.

---

[333] Pour ceux qui restent droits dans leurs bottes de pluie sur le sujet... ce sont des hybrides F1.

[334] Et pas forcément très bon pour le sol.

[335] Cette blague vous Derrida ? Je vais la répéter.

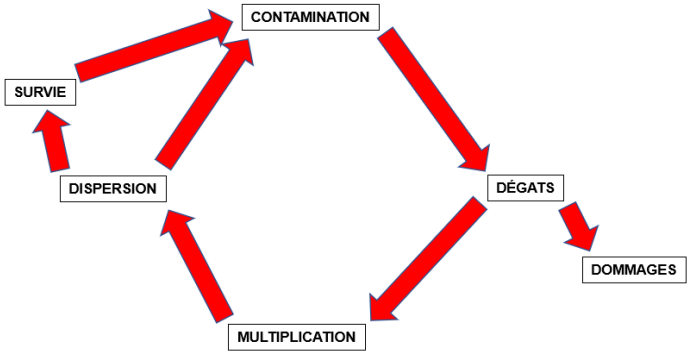


Figure 105 : Cycle simplifié du développement d'un bioagresseur, selon Lucas (2007).

9.3 Dommages causés par l'adiversité

9.3.1 Croissance d'une population de bioagresseurs

Comme nous l'avons déjà évoqué au sujet des plantes, la dynamique des populations s'intéresse à l'évolution de populations d'organismes vivants, comme par exemple une espèce de pucerons se nourrissant de la sève du haricot vert. Le modèle de Malthus en temps continu propose une équation différentielle de la densité P(t) d'une population de pucerons au temps t :

$$\frac{dP}{dt}(t) = A \times P(t)$$

où A est le taux de croissance net (naissance-décès) de cette population[336].

Ce modèle, selon la valeur du taux de croissance net, va conduire soit à l'extinction de la population ($A<0$), soit à sa croissance exponentielle ($A>0$), comme dans le panneau de gauche de la Figure 106. Dans la nature, ce caractère explosif des populations est souvent observé en début de croissance ; mais il y a bien entendu des limites et

[336] Cette équation a une solution explicite :

$$P(t) = P(0) \times \exp(At)$$

des phénomènes de régulation vont opérer (la nourriture n'est pas infinie, l'espace va venir à manquer), c'est ce que propose Verhuslt, en introduisant une capacité d'accueil du milieu (K), dans un nouveau modèle[337] :

$$\frac{dP}{dt}(t) = AP(t)\left(1 - \frac{P(t)}{K}\right)$$

La partie supplémentaire au modèle de Malthus va introduire un phénomène, dit de densité-dépendance, qui va freiner la croissance de la population lorsqu'elle devient trop nombreuse (voir Figure 106 dans le panneau de droite), jusqu'à la bloquer vers une asymptote en K. De nombreuses observations corroborent ce comportement de plafonnement, après une croissance initiale exponentielle.

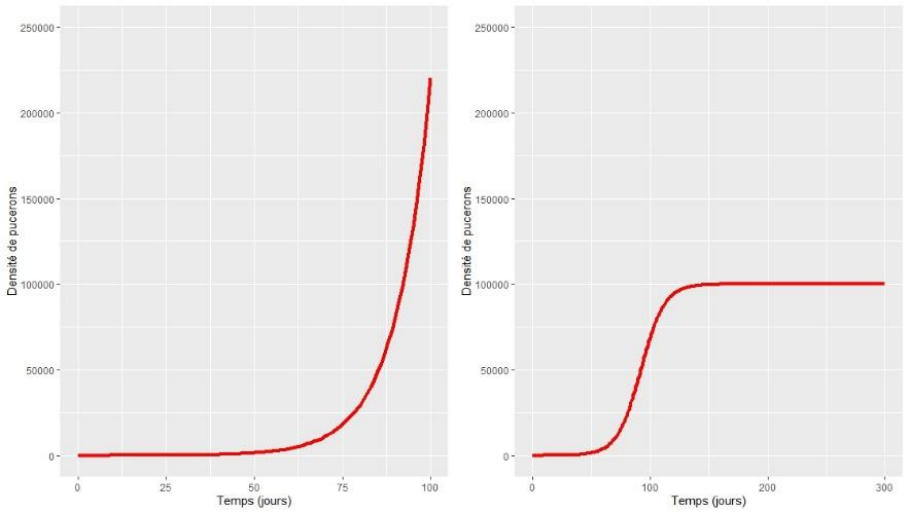


Figure 106 : À gauche, le modèle de croissance de Malthus avec $P(0)$=10 et A=0.10 ; à droite, le modèle de Verhulst avec les mêmes valeurs et K=100 000.

---

[337] Cette équation possède également une solution explicite qui est appelée fonction logistique (nous l'avions déjà rencontrée dans les tests de germination) :

$$P(t) = \frac{K}{1 + \left(\frac{K}{P(0)} - 1\right)\exp(-At)}$$

D'autres enrichissements du modèle ont eu lieu : pour tenir compte de la difficulté à trouver un partenaire dans les populations de petites taille (modèle d'Allee) et pour introduire des structures de la population en âge. Bien évidemment, en zone tempérée, la régulation se fait aussi par la température et la population retombe en hiver à un bas niveau. Selon ses caractéristiques et celle de la météorologie de l'année, elle pourra repartir au printemps plus ou moins rapidement.

9.3.2 Dommages causés par les bioagresseurs

La croissance de la population de bioagresseurs nous intéresse certes, ainsi que le fait qu'elle va plafonner, mais une question se pose sur la hauteur de ce plafond naturel : ne va-t-il pas être « un peu haut » ? Ou pour le dire autrement : que va-t-il nous rester comme culture ? Et ne faudrait-il pas intervenir ?

Pour le savoir, il convient de relier la densité de la population du bioagresseur aux pertes de récoltes et c'est ce que fait une courbe de dommages. La Figure 107 montre, pour la culture du blé d'hiver en Suède de 1995 à 2002 (Larsson, 2005), la relation entre le pourcentage de récolte perdue et la densité de la population d'un puceron ravageur (*Sitobion avenae*, en nombre de pucerons relevé par talle). La forme de cette courbe est typique, avec un plateau initial où les pucerons ne causent pas de problèmes, puis une descente plus ou moins linéaire et un nouveau plateau, où il y a autolimitation du phénomène (on observe rarement une perte complète des cultures ; Tammes, 1961).

Cette courbe permet de définir un seuil de pucerons où une intervention est souhaitable, afin de limiter les pertes. Le niveau de dommages économiques (EIL, *economic injury level*) correspond à la densité de pucerons, où le coût du traitement s'équilibre avec la perte financière qu'ils occasionnent (Higley & Pedigo, 1993). Pour continuer l'exemple du blé d'hiver, la production sans dommages est de 10 t/ha, avec un prix de vente[338] de 1 SEK/kg, soit 10 000 SEK/ha. Le coût du traitement par insecticide, plus les dégâts causés par le passage des engins, est estimé à 300 SEK/ha. L'équilibre se fait donc à 300/10 000=3 % de perte de récolte, ce qui, selon la courbe de

[338] Le SEK est la monnaie locale, la couronne suédoise.

dommages, correspond à une densité de EIL=6.5 pucerons[339]. À partir de là, est déterminé un seuil économique (ET, *economic threshold*) qui est le niveau de pucerons auquel il sera décidé d'intervenir. On a toujours ET<EIL, car l'emploi du contrôle ne permet pas toujours de régler complètement le problème, ni de le faire assez rapidement. Ce seuil peut être défini de façon plus ou moins objective, mais on utilise parfois un seuil dit fixé, qui est tout bêtement une proportion comme 75 %, soit en l'espèce un seuil économique de ET~5 pucerons par talle.

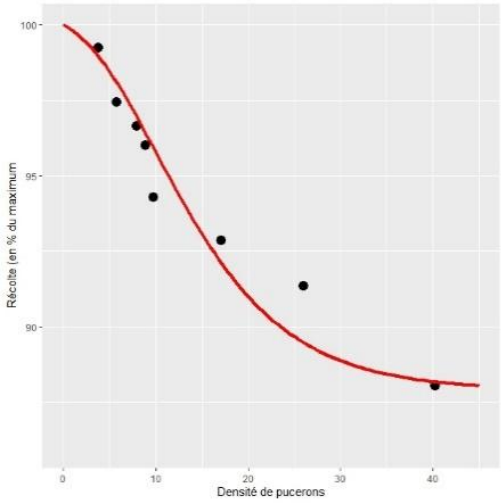


Figure 107 : Courbe de dommages[340] pour le blé d'hiver, en fonction de la densité de pucerons (Larsson, 2005).

Quelles leçons tirer de ces méthodologies sophistiquées au potager ? La première est que la population de pucerons est *attentivement surveillée*, particulièrement lors de la période de l'année où ils sont susceptibles de se développer. La deuxième est que *point n'est besoin de toujours intervenir.* La troisième est que le seuil d'intervention

[339] La courbe de dommages proposée par Larsson (2005) est de y = -4.5462×ln(x) + 105.53, d'où x=exp[(105.53-y)/4.5463] et avec y=100-EIL=97 on obtient x=6.5.

[340] Le modèle que j'ai ici choisi d'ajuster est différent de celui proposé par l'auteur, mais ses contraintes (100 % de récolte sans pucerons et une asymptote horizontale indiquant un plancher de dégâts) sont plus conformes au comportement attendu de telles données.

dépend du « prix » que nous attachons à la culture[341]. Si nous valorisons beaucoup, au hasard, notre culture de tomates, il faut au moins prévoir des dispositifs performants pour les protéger du mildiou, et peut-être ne pas perdre trop de temps avec les altises attaquant les radis ! La quatrième est que le prix du traitement entre en jeu. S'il est fait maison, on pourrait le considérer comme gratuit et on l'appliquerait dès lors *à tout bout de champ*. Cependant, la technique du niveau économique de dommages s'est raffinée en niveau écologique de dommages (EEIL, *environmental economic injury level*). En gros, il s'agit de rajouter une sorte de taxe sur le coût du traitement, pour les externalités qu'il occasionne, ce qui remonte automatiquement le niveau (EEIL>EIL) : par exemple, ici, en doublant le prix du traitement, on obtient EEIL~12.5 pucerons. C'est précisément ce à quoi nous devons penser, par exemple quand nous employons de la bouillie bordelaise, avec ses effets collatéraux sur les champignons bénéfiques.

9.4 Réponses des plantes à l'adiversité

La plante est souvent présentée comme un être passif et sans défense. Ce n'est pas le cas, elles ont élaboré, au cours de l'évolution, une série de dispositifs pour répondre aux différents stress. En ce qui concerne leurs bioagresseurs (pathogènes et herbivores), on utilise l'expression de course aux armements pour décrire leur coévolution et les stratégies successivement élaborées par les deux parties.

Les plantes possèdent un système immunitaire, modulé selon leur espèce, qui comprend trois capacités : celle de percevoir les attaques et de les différencier des contacts avec leurs mutualistes ; celle de transmettre cette information, plus ou moins dans l'ensemble de la plante, à l'aide d'hormones ; et celle de répondre (Pieterse et al., 2013).

Certaines défenses sont directes, par exemple des barrières physiques (épines, poils irritants, cire, lignine), des mimétismes ou des camouflages, des composés organiques parfois volatiles qui ont divers effets : répulsif, antidigestif ou toxique ; d'autres sont indirectes, en

[341] Je vous laisse faire le calcul, mais avec un prix de vente de 2 SEK/kg, on trouve EIL=4.5.

attirant, nourrissant ou hébergeant des ennemis naturels de leurs bioagresseurs, en allant parfois jusqu'à la symbiose, comme avec les champignons mycorhiziens (Fürstenberg-Hägg et al., 2013).

Ces mécanismes ont été exploités en agriculture. Premièrement, certains composés chimiques sont à la base de pesticides botaniques (capsaïcine du piment, azadirachtine du neem...). Deuxièmement, les variétés cultivées ont parfois perdu certaines de leurs défenses pour, par exemple, faciliter leur comestibilité. L'amélioration des plantes utilise des versions sauvages, proches, pour créer des cultivars résistants. Il existe également des méthodes de greffe.

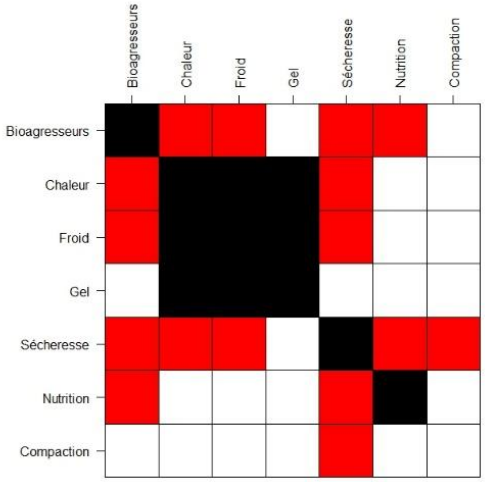


Figure 108 : (extrait de la) lMatrice des stress de Suzuki et al. (2014).

Troisièmement, le plus souvent, les cultures subissent simultanément plusieurs stress de nature abiotique ou biotique. Suzuki et al. (2014) ont proposé une matrice des stress qui résume quelles interactions négatives, neutres ou positives peuvent exister entre les différents stress (Figure 108). On peut y lire que le stress causé par les bioagresseurs est accentué par les stress de chaleur, de froid, de sécheresse et de nutrition[342]. Il s'ensuit qu'*une plante en bonne santé sera en meilleure position pour résister aux attaques de ses*

[342] Et pour être complet (car non présenté dans la figure) : de salinité ; en revanche, les stress d'ozone et d'UV sont en interaction positive avec les bioagresseurs.

bioagresseurs. Ainsi, veiller à garder ses cultures dans les zones optimales de température, d'humidité et de fertilisation[343] est un sage moyen de protection.

9.5 Ennemis naturels de l'adiversité

9.5.1 Modèle prédateur-proie (contrôle naturel)

Une autre régulation du modèle de Malthus, que celle de la capacité d'accueil de Verhulst, va à présent nous intéresser : le fait que les populations ne sont pas isolées et qu'elles peuvent interagir : 1) soit de façon positive dans le cas d'un mutualisme, 2) soit de façon négative dans le cas d'une compétition, 3) soit de façon asymétrique, positive pour l'une (le prédateur ou le parasitoïde) et négative pour l'autre (la proie ou l'hôte). Nous allons donc observer ce que deviennent nos pucerons en présence de coccinelles (*Coccinella septempunctata*). Il s'agit d'une situation très simplifiée, car d'une part, les pucerons sont prédatés par d'autres organismes comme les chrysopes ou des guêpes parasites, et d'autre, les coccinelles se nourrissent de diverses espèces de pucerons.

Dans les années 1920, Lotka et Volterra ont indépendamment proposé le modèle prédateur-proie (Green & Shou, 2014) suivant :

$$\begin{cases} \dfrac{\partial P}{\partial t}(t) = aP(t) - bP(t)C(t) \\ \dfrac{\partial C}{\partial t}(t) = -gC(t) + dP(t)C(t) \end{cases}$$

La première ligne, décrivant la croissance du nombre de pucerons, se compose d'un modèle de croissance de Malthus de paramètre a et d'un terme qui décrit l'interaction, où le paramètre b renseigne sur le taux auquel les pucerons sont tués en présence des coccinelles.

La seconde ligne, dépeignant la croissance du nombre de coccinelles, dépend du paramètre g, leur taux de mortalité lorsqu'il n'y a pas de

[343] On ajoutera l'aération et la compaction, même si la matrice des stress est « neutre » à ce sujet.

proies (modèle de Malthus, mais avec -g<0), et du paramètre d, leur taux de naissance lorsqu'il y a des proies à consommer.

Il s'avère que ce modèle, apparemment simple, ne possède pas de solutions explicites et que seules des informations générales sur son comportement et des simulations informatiques permettent de saisir son fonctionnement. La Figure 109 représente une telle simulation : elle montre un comportement périodique et le fait que les densités des prédateurs sont toujours en retard sur celles des proies. D'où s'ensuit l'idée concrète d'intervention, en introduisant quelques prédateurs supplémentaires, qui vont limiter la croissance des proies. Les valeurs initiales vont également avoir une importance pour lisser les oscillations observées : plus on va s'approcher des points P(t)=g/d et C(t)= a/b (point d'équilibre du système), plus les oscillations seront faibles, ce qui nous amène à l'idée de « bonne » intervention (au bon moment avec la bonne quantité de prédateurs). Un autre élément intéressant est que la moyenne des proies, sur une période, est égale à g/d. Si nous avons le choix entre plusieurs prédateurs, il faut minimiser cette moyenne, autrement dit, il faut que : d'une part, d soit maximum, donc que la population de prédateurs soit capable de croître rapidement en fonction de la présence de proies (un bon taux de fécondité) ; et d'autre part que g, sa mortalité, soit faible. Ce dernier point peut aussi être l'objet d'une intervention en facilitant la survie de prédateurs pendant l'hiver par exemple.

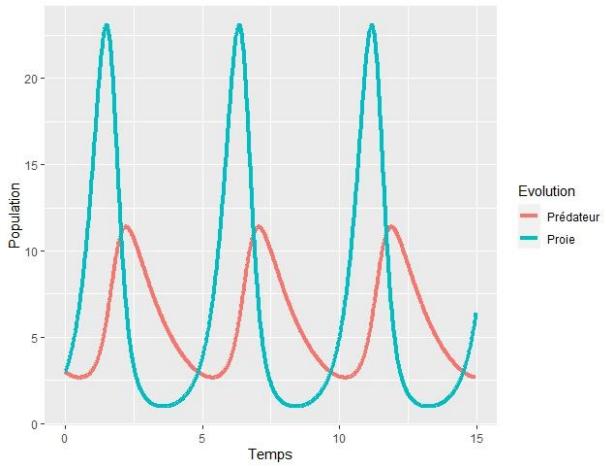


Figure 109 : Modèle prédateur-proie de Lotka et Volterra.

Le modèle de Lotka et Volterra a été étendu de multiples manières (Diz-Pita et al., 2021), la plus classique étant de remplacer le modèle de croissance de Malthus pour la proie par celui de Verhulst (ce qui fait perdre sa périodicité au modèle prédateur-proie). Il existe aussi des variations où le prédateur est omnivore, c'est-à-dire qu'il peut se nourrir de différentes espèces, voire même de la sienne[344]. Il est possible aussi d'étudier des migrations ou de considérer plusieurs prédateurs et/ou plusieurs proies à la fois.

> Du côté de chez Stéphane : Au début de mon doctorat de biométrie, j'ai suivi un cours de modélisation biologique dont la première séance portait précisément sur... le modèle de Lotka-Volterra. Pour caricaturer, à peine, les réactions de l'assemblée hétéroclite des étudiants : les biologistes étaient fort inquiets quant à l'évaluation future, mais ressortaient avec l'idée que, d'une certaine façon, une loi de la nature leur avait été *révélée* ; les mathématiciens talentueux étaient, eux, assez excités à l'idée que le comportement des modèles était complexe et ils imaginaient immédiatement comment le compliquer plus encore, en introduisant des dépendances envers les ressources, une troisième espèce, divers stades de maturité... En tant que seul statisticien, je me disais que je m'en sortirais toujours avec la programmation des simulations, mais... *au fait, où étaient les données* ?
>
> Il s'avère, comme je l'ai souvent observé par la suite, qu'il y a toute une branche de la modélisation mathématique en biologie qui développe, avec un grand raffinement et des hypothèses souvent a priori plausibles, des modèles intéressants, mais qui sont rarement mis à l'épreuve. Or, d'après Goodman (1975), les quelques expérimentations avec un prédateur et une proie ont montré de très fortes oscillations, puis ont rapidement conduit à l'extinction, ce

[344] On connaît ainsi 1 300 espèces cannibales...

qui n'est pas ce qui est prédit. En conclusion, c'est exactement comme la religion, il faut croire au modèle...

9.5.2 Contrôle biologique

Les ennemis naturels d'un organisme sont ses prédateurs et ses parasitoïdes (voire ses parasites), qui ont pour effet de réguler sa population dans la nature ; on parle alors de contrôle naturel. Certains ennemis sont spécifiques et d'autres sont généralistes. Le contrôle biologique, ou la lutte biologique, consiste en l'emploi de ces ennemis naturels *par l'homme*, pour mieux réguler une population de nuisibles.

Trois formes sont distinguées. Le contrôle biologique classique ou par inoculation vise à réduire une population de ravageurs exotiques, introduits dans de nouveaux environnements (souvent par accident). Ces ravageurs invasifs sont fréquemment très dommageables, car leurs ennemis naturels sont absents dans ce nouveau contexte. Il faut donc les aller chercher dans leur aire d'origine et tenter de les acclimater.

Le contrôle biologique augmentatif ou par inondation est une méthode de masse qui consiste à relâcher d'importantes quantités d'un ennemi naturel pour maîtriser, en un court laps de temps, des bioagresseurs : c'est donc une méthode curative. Elle est plutôt utilisée dans les serres, où elle est plus efficace, le cas emblématique étant l'aleurode des serres (*Trialeurodes vaporariorum*) qui peut être maîtrisé par une guêpe parasitoïde (*Encarsia formosa*). Cette méthode reste cependant complexe, car il faut « produire » ces organismes en grand nombre (et le prix peut devenir prohibitif), les transporter et les disperser de façon souvent assez technique. Parfois, ce ne sont pas véritablement des ennemis qui sont employés, mais des techniques qui perturbent ou servent à piéger les ravageurs, comme des phéromones.

Le contrôle biologique par conservation est une méthode préventive qui vise à favoriser la présence des ennemis naturels, indigènes, en leur réservant des habitats ou des espaces de nourriture. C'est la méthode la plus à portée du jardinier amateur, et nous lui consacrerons plus loin un développement. Il s'agit, par conséquent, d'une approche moins ciblée, qui est plutôt à l'échelle de la communauté locale, et cherche à en augmenter la biodiversité.

9.6 Biodiversité et adiversité

9.6.1 Biodiversité

Nous allons par la suite beaucoup évoquer la biodiversité, ses effets et les techniques pour l'augmenter : il est donc temps d'en dire un peu plus sur elle et sur sa mesure. La biodiversité « englobe la variété de la vie, à tous les niveaux d'organisation, classée selon des critères évolutionnistes (phylogénétiques) et écologiques (fonctionnels) » (Colwell, 2009). Au niveau des populations, elle traduit leur variabilité génétique qui est, à la fois, la marque du passé et la potentialité de futures adaptations. Au niveau des paysages, il s'agit de la diversité de leurs écosystèmes. Mais c'est le niveau spécifique des communautés qui est le plus largement étudié[345].

Pour une communauté, un habitat ou un écosystème[346], la richesse spécifique est *simplement* le nombre d'espèces d'un taxon (les oiseaux) ou d'une forme de vie (les arbres). Concrètement, les choses deviennent vite plus compliquées, à part pour quelques taxons comme ceux cités au-dessus. On découvre en effet, chaque jour, des espèces cryptiques, c'est-à-dire des espèces cachées au sein d'espèces bien identifiées. L'identification reste souvent l'affaire de spécialistes et peut s'avérer singulièrement longue. Les individus ne se présentent pas toujours à nous, sagement alignés sur un fil électrique, et des techniques d'échantillonnage sophistiquées existent, allant d'une promenade en ligne droite en forêt pour repérer les chants d'oiseaux ou les ultrasons de chauves-souris, jusqu'à diverses techniques de piégeage pour des insectes et des analyses moléculaires pour des organismes microscopiques. Le nombre d'espèces inconnues augmente d'ailleurs vertigineusement avec la diminution de la taille des organismes. Sans compter le fait que toutes les espèces ne présentent pas la même facilité de détection (comportement, couleur...). Même avec un taxon assez simple, les herbacées des prairies européennes, déterminer la richesse spécifique de sa propre « pelouse » ne va pas de soi et passe par l'étude

---

[345] Plus que les genres ou les familles d'organismes.

[346] Ou parfois, un simple découpage administratif, comme un pays.

de ce qui se trouve à l'intérieur de quadrats, déposés à divers endroits. Plus on en explore une partie importante, plus le nombre d'espèces observées augmente : on parle de courbe de raréfaction, il est alors nécessaire d'avoir recours à des techniques statistiques d'estimation de la richesse spécifique, pour « ajouter » la part restée hors de notre observation, quand nous n'avons pas examiné toute la pelouse.

Lors des décomptes de richesse spécifique, certaines espèces sont très peu présentes, voire absentes : ce sont celles qui sont menacées d'extinction. En fait, il s'avère qu'une espèce peut être rare à cause de sa localisation géographique, de son type d'habitat ou de sa densité. Les espèces les plus à risque sont donc celles qui sont à la fois cantonnées à une région du monde bien précise, ne pouvant quitter un habitat particulier (la montagne, par exemple) ou y étant plutôt rares. Pour en savoir plus sur l'extinction en cours des espèces, la meilleure source est probablement la *plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques* (IPBES, https://www.ipbes.net/). On se contentera de relever une phrase de leur rapport : « Sur environ huit millions d'espèces animales et végétales (dont 75 % sont des insectes), environ un million sont menacées d'extinction » (IPBES, 2019). Ce rapport est également intéressant pour des informations concernant la biodiversité cultivée.

Une deuxième possibilité est de définir des indices de biodiversité, comme ceux de Shannon, Simpson et Fisher, qui non seulement décomptent les espèces, mais prennent aussi en compte l'uniformité de leur répartition. Ainsi, un décompte de dix espèces sera considéré comme plus diversifié si elles présentent, à peu près toutes, la même abondance (10 %), que si deux espèces sont dominantes, par exemple en regroupant, à elles deux, 90 % des individus.

La troisième possibilité est de calculer la biodiversité fonctionnelle. Il existe de nombreuses approches, mais on peut, par exemple, déterminer la complexité du réseau trophique ; ou bien réunir les espèces en groupes fonctionnels et se pencher sur l'abondance de chaque groupe.

Quelle que soit la biodiversité étudiée, elle est organisée spatialement. À la richesse spécifique que nous observons sur une première zone (une culture, par exemple, avec ses mauvaises herbes),

qui est dite diversité **α**, s'additionne, quand nous allons entrer dans la prairie voisine, une diversité supplémentaire, dite diversité **β**. On peut continuer à ajouter de la diversité, en traversant la forêt, à proximité : l'ensemble étant défini comme la diversité **γ**. Ainsi, dans un potager, on peut opposer une organisation où les légumes sont fortement associés dans des planches (forte diversité α) ou plutôt traités en monoculture par planche (forte diversité β), avec au final une même diversité γ.

Colwell (2009) évoque enfin une idée importante, dite relation aire-espèces (*species-area relationship*), corrélant la richesse spécifique avec la surface observée ; cette relation, maintes fois relevée, s'avère toujours positive. Deux raisons l'expliquent, la première est un simple effet d'échantillonnage : si on compare une part de la pelouse à l'ensemble, il y aura moins de quadrants, ce qui peut conduire à une sous-estimation (sauf à employer des techniques statistiques sophistiquées, mais qui ne comblent jamais entièrement l'information perdue). La seconde explication, plus fondamentale, est la diversité plus grande de la surface plus importante. D'une part, certaines espèces ont peut-être une faible capacité de dispersion et restent cantonnées dans certaines parties ; d'autre part, une zone plus grande contient normalement une plus importante diversité d'habitats, propres à convenir à des espèces différentes (plantes d'ombre versus plantes de soleil, par exemple). Nous verrons que des techniques de manipulation de l'habitat cherchent à augmenter cette capacité à accueillir la biodiversité.

9.6.2 Hypothèse de biodiversité-stabilité

Le 29 mai 2024 a été une bonne journée de mon existence, car je l'ai consacrée à la lecture du remarquable article de Goodman (1975), qui caractérise exactement ce que je cherchais, en me colletant à la littérature scientifique, pour guider ma démarche au potager. La question centrale traitée est celle de la véracité de l'hypothèse de biodiversité-stabilité (HDS) en écologie : *une communauté (un écosystème) plus diversifiée est plus stable*.

Cela « peut se soutenir en termes de redondances, plus de liens permettant de combler les vides, ou de boucles de rétroaction[347] ». L'idée a finalement été considérée comme une véritable *loi écologique* dans les écrits d'Odum, qui fut en passant la référence scientifique inspirant fortement la permaculture[348]. Cette assertion a aussi servi de base théorique à des mouvements écologiques de conservation[349]. D'autres argumentations plus détaillées ont suivi, comme entre autres, les oscillations observées dans le modèle prédateur-proie, dénonçant une instabilité ; mais aussi les fluctuations de populations constatées dans des systèmes assez pauvres en espèces, tels que les zones arctiques sous-boréales, alors que les forêts tropicales, sommets de biodiversité, *semblent* si stables.

Goodman commence par réfuter ces arguments en disant, du côté des modèles mathématiques prédateur-proie, qu'il s'avère que des systèmes avec plusieurs proies et plusieurs prédateurs sont souvent plus sujet à des phénomènes d'extinction. Il rapporte ensuite de nombreux témoignages d'experts en systèmes tropicaux, qui ne corroborent *pas du tout* la vision de stabilité de ces environnements.

Goodman propose donc de commencer... par le commencement : et de définir précisément ce qu'on entend par biodiversité et par stabilité, avant de se prononcer sur une éventuelle relation entre les deux ! Or, nous avons vu qu'il existe beaucoup de façons de définir des indices de biodiversité ; la plus courante dans les études HDS, est l'indice de Shannon-Wiener (dont Goodman montre qu'il n'est pas sans poser de nombreux problèmes...). Il en va de même pour la définition de la stabilité, qui peut aller de la persistance (pas d'extinction d'espèces) jusqu'à la constance (l'abondance des espèces reste la même), mais que

---

[347] Une pique de l'auteur (montrant beaucoup d'humour tout au long de l'article) à destination de la théorie des systèmes, très en vogue à l'époque et parfois prétentieuse dans ses ambitions. (Comment ne pas penser en parallèle à la situation actuelle avec l'intelligence artificielle ?)

[348] David Holmgren, en particulier.

[349] Goodman ajoute que les écologues (scientifiques) étaient souvent membres de ces mouvements, ce qui occasionnait parfois un manque de recul. Le problème n'a pas complètement disparu et je conseille à ce sujet la lecture de : Lévêque, C. (2013). *L'écologie est-elle encore scientifique ?* Êditions Quæ.

ceci n'a jamais été véritablement utilisé dans les développements en faveur de l'hypothèse.

Je ne vais pas répéter l'ensemble de l'article, mais il avance qu'en termes de simulations informatiques, de modélisations mathématiques ou, plus fondamentalement, de *la confrontation aux données de terrain*, la positivité de la relation est loin d'être confortée, voire même parfois inversée. On peut ainsi s'étonner de constater que, si un espace est très fortement perturbé, il va d'abord constituer une prairie peu diversifiée, puis des successions avec des herbacées et des arbustes très diversifiées, pour en arriver à son état stable, le climax, une forêt dans nos contrées, qui ne sont pas précisément des havres de biodiversité : la relation biodiversité-stabilité apparaît clairement comme non-linéaire dans cet exemple. Goodman évoque aussi un autre argument en faveur de HDS, qui est, qu'en faisant une analogie avec la thermodynamique ou la théorie de l'information, les systèmes complexes seraient plus résilients. D'une part, il dit qu'il s'agit d'une *simple analogie* et que ce qui pourrait se passer en physique (théorique) ne prouve rien quant à ce qui se pourrait se passer dans un système biologique ; et d'autre part, que l'impression laissée par des mécaniques complexes, c'est qu'elles semblent avoir plus de chances de tomber en panne ;-) Beaucoup plus fondamentalement, il esquisse que la stabilité, comme l'instabilité, peut être un trait évolutif intrinsèque d'une population (stratégie *r*) et pas seulement le reflet d'un simple phénomène de réseau trophique.

Sa conclusion est : il n'est pas très clair de savoir à quel genre de relation, nous pourrions nous attendre entre la diversité et la stabilité, peut-être tout simplement *aucune relation systématique*. En fait, il avance même que, si une meilleure théorie était trouvée, et largement acceptée dans la communauté scientifique, il est presque certain qu'elle ne serait pas abandonnée dans le grand public, car « It is the sort of thing that people like, and want, to believe ». Goodman en arrive à une question, que je me pose souvent : pourquoi certaines personnes sont-elles si attirées par ce genre d'idées, et au final, qu'est-ce que cela révèle sur elles ? Il suggère que (je traduis) c'est une « attraction esthétique, et peut-être religieuse, par la croyance que la variété merveilleuse de la nature doit avoir un but dans un monde harmonieux, mais aussi une sagesse populaire concernant les œufs et les paniers ».

9.6.3 Biodiversité et contrôle biologique

Dès lors, cette hypothèse écartée, qu'est-ce qui justifierait scientifiquement, comme outil de protection au potager, d'augmenter la biodiversité ?

Au fil d'une impressionnante méta-analyse sur 1475 sites[350], Dainese et al. (2019) ont étudié, pour la production agricole, les liens entre le service écosystémique de contrôle biologique des bioagresseurs et la biodiversité des ennemis naturels présents. Ils trouvent une relation positive claire de la richesse spécifique et l'abondance totale des ennemis naturels, avec le contrôle biologique ; il apparaît également qu'une poignée d'ennemis naturels participent de façon plus importante (phénomène de dominance).

Toutefois, il me semble que le lien, bien qu'incontestablement statistiquement significatif, *n'en demeure pas moins pratiquement faible* (moins de 5 % de variance expliquée[351], ce qui signifie que d'autres facteurs entrent en jeu ou que ce que l'on cherche à expliquer est un phénomène fortement aléatoire).

Un autre résultat de l'étude est que la simplification du paysage (pourcentage de la surface cultivée sur l'ensemble du paysage) a un effet négatif sur cette biodiversité des ennemis naturels et sur le contrôle biologique. Il y a donc bien des effets d'habitat, qu'il est loisible de « manipuler », pour assurer un meilleur contrôle des bioagresseurs.

Le service de pollinisation a aussi été examiné, en fonction de la biodiversité des pollinisateurs et de la simplification du paysage, pour en arriver qualitativement aux mêmes conclusions.

Si je devais résumer les conséquences pratiques de ces résultats pour un jardinier, je dirais : primo, que la biodiversité ne garantit pas la stabilité, mais qu'elle peut concourir au contrôle biologique ; secundo, que cela peut se faire, en particulier, en manipulant les habitats ; tertio, qu'il ne faut pas non plus en attendre des miracles.

---

[350] 79 institutions de recherche ont collaboré pour ce travail !

[351] Au jugé, je n'ai pas les données exactes.

9.7 Rôle de l'environnement

9.7.1 Équilibre de la nature

Toute discipline a un ensemble de présupposés, rarement questionnés, à son fondement, mais qui organisent pourtant la direction qu'y prend la recherche. En ce qui concerne l'écologie, Cooper (2001) avance que l'équilibre de la nature est l'un d'entre eux, et est sans doute primordial, particulièrement en écologie des populations et des communautés. L'équilibre de la nature est l'idée que les densités des populations sont, d'une certaine manière, stables, régulières et qu'il y a, plus globalement, un certain ordre dans la nature, *malgré* leurs démographies potentiellement explosives et les facteurs abiotiques aléatoires qu'elles rencontrent. Notons que ce paradigme scientifique est largement partagé par de nombreuses personnes *sur Gaïa*, en premier lieu, dans leur conception du jardinage. D'où des « théories » du laisser-faire avec les bioagresseurs, où tout finit toujours par s'arranger, si l'homme laisse, dans le potager, la nature s'autoréguler[352].

Pour en revenir au domaine académique, cet équilibre tiendrait au fait que les facteurs biotiques ramènent, en quelque sorte, les populations vers une moyenne. Comment ? Essentiellement grâce à des phénomènes antagonistes, tels que la compétition, mais aussi la prédation ou le parasitisme. La conséquence en est, lorsqu'il s'agira de résoudre des problèmes comme celui qui nous occupe dans ce chapitre, que les directions d'investigation seront plutôt élaborées à l'aide de ces concepts et donneront typiquement lieu à des solutions basées sur les ennemis naturels ou les ressources.

Cooper remarque que les preuves tangibles de cet équilibre sont, en définitive, peu établies et qu'on observe des cas où des populations explosent et aussi d'autres où elles disparaissent. Et surtout, qu'il faudrait déjà s'entendre sur ce qu'est un équilibre (*bis repetita*)... Entre quelles bornes se situe-t-il ? Est-il le même pour toutes les populations ? Pour toutes les espèces ? Et sur quelle échelle temporelle

[352] Et, par un miracle, l'équilibre se fait à un niveau de dommages acceptable....

et spatiale raisonnons-nous ? Car les espèces semblent toujours finir par s'éteindre.

Il existe une façon différente de penser l'écologie des populations, défendue par d'autres chercheurs, ce qu'on peut appeler l'hypothèse de non-équilibre de la nature. Il s'agit de réintroduire les facteurs abiotiques et de dire que les organismes individuels affrontent en fait, avec beaucoup de mortalité, un environnement difficile (en termes de climat, de sol, mais aussi de ressources inadaptées et insuffisantes) et que la survie de l'espèce n'est souvent due qu'à la potentialité explosive de leur reproduction (voire à des phénomènes de migration). Je reprends une citation pour donner le ton : « C'est un combat solitaire que de vivre dans un monde inadéquat. Ils [ces individus] meurent jeunes et leur passage est passif, solitaire et inaperçu... et le combat de chacun est indépendant de celui des autres ». Ce que Cooper souligne remarquablement, c'est que cette nouvelle approche *réintroduit l'histoire dans la biologie*, alors que l'équilibre de la nature semble *hors du temps* ; cette nouvelle approche s'avère « plus contingente que réglée par des lois de croissance de la population. Elle valorise plus l'unicité de l'individu par rapport à un individu homogène abstrait, le pluralisme par rapport à un monolithisme théorique et le hasard par rapport au déterminisme ». La menace épistémologique qui plane derrière tout cela, c'est qu'on se demande s'il peut, en définitive, exister de « véritables lois » en écologie...

Au final, ce sont bien des études empiriques qui permettraient de poser directement des questions précises à la nature, pour savoir ce qu'il en est de son équilibre ou de son non-équilibre... Ceci dit, chaque parti est parvenu à présenter des exemples semblant lui donner raison, et la réponse risque fort d'être ambivalente. Mais, au-delà de la possibilité même d'une telle conclusion ferme et définitive, il semble plus fécond de considérer que *les facteurs biotiques comme abiotiques jouent un rôle* plus ou moins important sur l'évolution des populations, selon les contextes et les espèces. En ce qui concerne le contrôle des bioagresseurs, c'est ce que va permettre de penser le triangle de la maladie.

9.7.2 Triangle de la maladie

Le triangle de la maladie est une représentation graphique, introduite dans les années 1960, qui permet une réflexion plus large et des solutions nouvelles dans la lutte contre les ennemis des cultures. La Figure 110 en présente une version personnelle, il en existe plusieurs, qui se métamorphosent même en pyramides, par la prise en compte d'autres éléments (Scholthof, 2007). Nous allons garder l'expression triangle de la maladie qui suggère plutôt un bioagresseur de type viral, bactérien ou fongique, bien que nous considérions aussi des animaux phytophages, comme les nématodes, les pucerons, les limaces...

Le triangle de la maladie souligne qu'il ne s'agit pas, seulement, d'un face-à-face entre la plante et son bioagresseur, que nous allons simplement régler par l'emploi d'un moyen chimique ou par l'intervention d'un troisième larron, l'ennemi naturel. Pour qu'il y ait maladie ou agression, il faut combiner trois états : une plante susceptible d'être attaquée, un bioagresseur à fort potentiel nocif et un environnement favorable (le tout sur une même période et un même espace de culture). L'un des exemples donnés par Scholthof (2007) est celui, dramatique, du mildiou de la pomme de terre en Irlande dans les années 1845-1850. La conjonction d'une monoculture avec une base génétique réduite, d'un bioagresseur nouveau et particulièrement destructeur (*Phytophthora infestans*), et de conditions météorologiques inhabituelles, très favorables à sa diffusion (chaleur, puis frais et humide sur une longue période), a généré des pertes considérables (33 % par rapport aux années précédentes, puis 75 % l'année suivante, car les spores étaient alors présents dans le sol) et a causé la mort par famine d'un million d'Irlandais et autant d'immigration aux États-Unis.

Si l'un des trois éléments n'est pas dans cet état, les dommages seront moins conséquents. Premièrement, si les plantes sont des cultivars résistants ou des cultures diversifiées dans le temps (rotations ou décalages), dans l'espace (cultures intercalaires ou moins denses) ou dans leur génétique (variété population ou mélange de cultivars). Deuxièmement, si le bioagresseur est peu virulent ou peu prévalent, il convient, en tout cas, de comprendre ses mécanismes de survie, de

développement, de reproduction et de dispersion. (Est-il déjà présent sur des graines, des paillages, dans le sol ou dans une région proche ?) Troisièmement, si l'environnement est constitué de facteurs météorologiques, pédologiques et biotiques, qui peuvent être plus ou moins favorables à la plante ou au bioagresseur. Ainsi, certaines plages de température ou d'humidité, souvent liées à la saison, sont plus à risque que d'autres ; une fertilité équilibrée renforce la plante ; de nombreuses compétitions, prédations ou parasitismes envers les pathogènes les affaiblissent.

La gestion de la maladie ou du ravageur consiste en des techniques qui évaluent l'état de ces trois éléments (plante, bioagresseur et environnement) et les modifient éventuellement pour diminuer les risques.

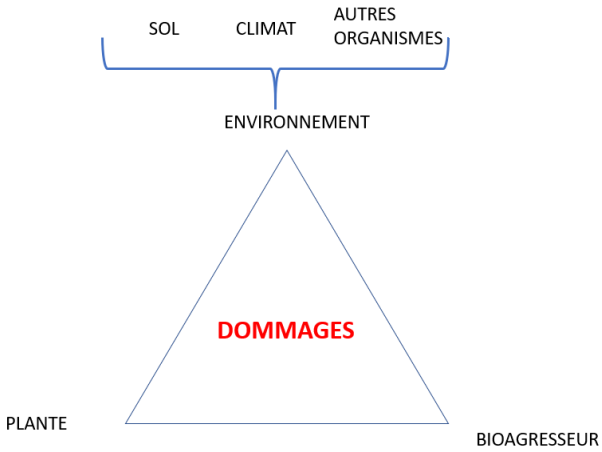


Figure 110 : Triangle de la "maladie".

9.8 Lutte intégrée contre les ennemis des cultures

Le triangle de la maladie montre que la lutte contre les ennemis des cultures passe par une réflexion contextualisée, sur la situation de la plante, du bioagresseur et de l'environnement dans lequel ils évoluent. C'est en intégrant plusieurs types de contrôles que les dommages peuvent être limités.

9.8.1 Définition

L'emploi de pesticides a généré des problèmes environnementaux, sanitaires et d'efficacité sur le long terme. Ce dernier point a été très important dans la naissance de la lutte intégrée contre les ennemis des cultures (IPM *integrated pest management*), car les entomologistes ont constaté que l'effet des insecticides à large spectre a été, d'une part, de diminuer l'ensemble des insectes, même ceux qui sont bénéfiques (comme les pollinisateurs), et d'autre part, de générer des évolutions de populations résistantes incontrôlables.

L'Union européenne[353] définit l'IPM comme « la prise en considération attentive de toutes les méthodes de protection des plantes disponibles et, par conséquent, l'intégration des mesures appropriées qui découragent le développement des populations d'organismes nuisibles et maintiennent le recours aux produits phytopharmaceutiques et à d'autres types d'interventions à des niveaux justifiés des points de vue économique et environnemental, et réduisent ou limitent au maximum les risques pour la santé humaine et l'environnement. »

9.8.2 Méthodologie de l'IPM

L'IPM est une méthode complexe à mettre en œuvre, car systémique, dynamique, nécessitant de nombreuses connaissances et spécifique au site considéré ; elle ne peut donc se réduire à une série de recettes (Barzman et al., 2015). Il s'agit de multiplier les solutions pour une protection des cultures sur le long terme et de ne pas compter sur une unique approche, aussi efficace soit-elle, qui finira de toute manière par être contournée par l'adaptation de la population visée ou l'émergence d'autres espèces, tout aussi nuisibles. La méthode se généralise à des échelles spatiales et temporelles plus larges, il ne s'agit pas de protéger une culture particulière, mais l'ensemble des cultures, et si possible, sur plusieurs années. En pratique, toutes les étapes ne sont pas toujours implémentées et on observe un continuum d'IPM, le long duquel il est possible de progresser.

---

[353] Définition 6, article 3, directive 2009/128/EC.

L'Union européenne a de plus proposé que huit principes guident l'application de cette méthode, ce que nous pouvons trouver, organisé un peu différemment, dans la Figure 111. C'est cette version de l'IPM, en théorie obligatoire pour les agriculteurs depuis 2014, que je vais maintenant présenter. Le principe 1 est celui de la prévention : l'idéal étant de parvenir à mettre initialement en place des mesures pour éviter d'intervenir par la suite. Les principes 2 (surveillance) et 3 (prise de décisions) visent à évaluer la sévérité de l'agression et à décider si une action correctrice est nécessaire. Le principe 4 consiste en des interventions de diverses natures (génétique, agronomique, physique, mécanique, biologique) pour éviter le recours aux pesticides. Les étapes 5, 6 et 7 tentent de gérer, le plus efficacement et écologiquement possible, l'utilisation des pesticides. L'étape 8 évalue l'ensemble des étapes précédentes, afin de progresser dans la future application de la méthode.

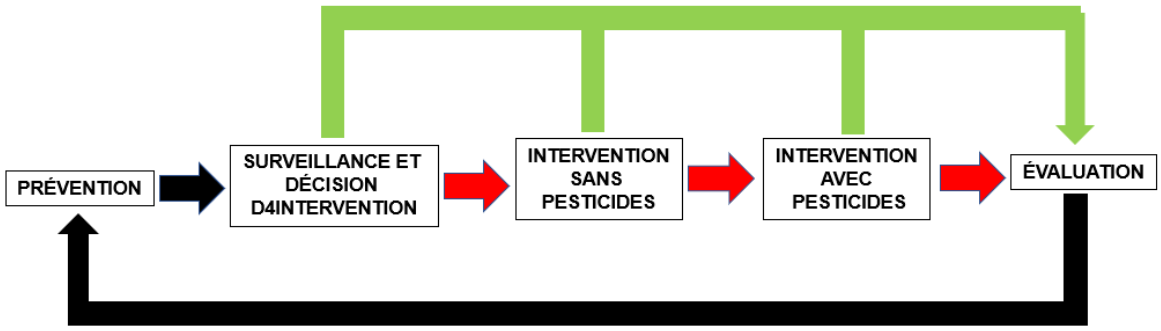


Figure 111 : Étapes simplifiées de la lutte intégrée contre les ennemis des cultures.

9.8.3 Prévention

Un premier élément de prévention est d'éviter d'amener des problèmes supplémentaires. Il s'agit, en quelque sorte, de prophylaxie : en utilisant des outils propres (stérilisation des sécateurs et des contenants pour semis), des substrats propres (terreau professionnel pour semis indirects, par exemple), des amendements de qualité et des semences ou plants sans problèmes (sains, variétés résistantes...).

Un deuxième élément est que diverses pratiques agronomiques, non directement reliées à la lutte, ont pourtant un effet : la fertilisation et les amendements (les pucerons sont sensibles à une fertilisation excessivement azotée ; Hasken & Poehling, 1995) ; l'irrigation ; le désherbage ou la taille peuvent conduire à blesser les plantes et rendre plus facile l'attaque ; le labour a un effet sur la biodiversité du sol : les paillages sont des refuges à limaces ; mais plus généralement, tout ce qui génère des stress (de chaleur, de froid, de compaction, de nutrition...) qui redoubleraient le stress d'attaque par les bioagresseurs.

Un troisième élément est le contrôle cultural, souvent préventif et qui demande une planification. Il s'agit d'une ancienne démarche de protection qui n'était plus utilisée depuis l'apparition des pesticides. Elle réclame une bonne connaissance des cultures, des bioagresseurs et de leurs ennemis naturels (Hill, 2004). Le contrôle cultural le plus connu est la technique des rotations de culture, détaillée plus loin, mais l'installation des cultures a aussi son importance. On installe la plante au bon moment pour lui éviter, à la fois, des stress abiotiques, qui pourraient l'affaiblir et la rendre plus vulnérable à ses ennemis, et des stress biotiques. Par exemple, en présence d'une infestation de limaces au mois de mai, on peut envisager, sans trop de soucis, une installation de plants de tomates un peu âgés, mais en revanche, l'installation de très jeunes plants de laitue est à déconseiller. Il est plus prudent d'entreprendre un traitement avant l'installation ou de la reporter, pour laisser les plantules atteindre une taille importante et qu'elles soient moins vulnérables. La diversification se fait aussi dans l'espace, en intercalant des espèces différentes, des cultivars résistants, des bandes de fleurs ou de mulch vivant. Des installations plus espacées en hiver, permettent une aération qui réduit les risques de maladies fongiques. Diverses manipulations de l'habitat visent à attirer et à retenir les ennemis naturels sur place.

L'emploi de cultivars résistants est évidemment une autre solution, on parle parfois de contrôle génétique à ce sujet. Il existe des cultivars qui ont été sélectionnés pour résister, par exemple, à diverses maladies fongiques. Des techniques de greffe permettent aussi un renforcement des plants. Enfin, des organismes ont été génétiquement modifiés pour inclure des gènes de résistance (maïs, coton...).

9.8.4 Surveillance et décision d'intervention

La surveillance permet de suivre, dans le temps et dans l'espace, la progression des populations nuisibles. Des systèmes de surveillance, de prédiction épidémiologique et d'alerte existent pour les professionnels (voir pour un exemple avec la pomme de terre et la tomate : https://agro.au.dk).

Dans notre potager, quelques petites sorties nocturnes pour voir où en sont les limaces, quelques coups d'œil au dos des feuilles de pommes de terre pour scruter les œufs de doryphores, donnent une idée de la situation.

Pour la prise de décision, des seuils ont été définis dans certains cas, pour savoir quand les dommages vont menacer la récolte et quel seuil de perte faut-il ne pas dépasser : on parle de lutte raisonnée. Cela fonctionne surtout pour les insectes, moins pour les maladies, mais les auteurs suggèrent qu'il n'est pas réaliste de penser que de tels seuils vont être disponibles pour toutes les cultures, pour tous les bioagresseurs et pour tous les environnements. La situation est encore pire dans le potager avec de multiples cultures, de multiples ennemis et de faibles moyens.

> Du côté de chez Stéphane : L'important, c'est que notre décision, de déclencher une intervention ne soit pas automatique et que *notre seuil d'inaction s'élève*. Toute présence d'ennemis n'entraîne pas de gros dommages. Tout dommage, même important, n'entraîne pas forcément de problèmes de récoltes. Quel peut bien être le seuil économique pour un amateur (*cf.* section 9.3.2) ? Est-ce que la perte de vingt plants de tomate ou de quelques pommes de terre réclame l'utilisation d'un biopesticide[354] ? Parfois, et je pense, par exemple, à des pucerons sur un rosier, c'est plutôt un *seuil esthétique* qui semble être dépassé.

[354] Se souvenir, lorsque nous avons ces récoltes, que chez le producteur du coin, les ventes de primeurs sont bien passées et le prix est donc redevenu correct.

9.8.5 Interventions

Le principe de l'IPM, en ce qui concerne les traitements directs, est de n'avoir recours au contrôle chimique qu'en dernier recours ; préalablement, il existe en effet de nombreuses alternatives. Pour le jardinier amateur, il faut d'abord retenir que de multiples techniques de contrôle existent, en plus des techniques de prévention. C'est donc en articulant, selon la situation, des techniques différentes, que la méthode a des chances de fonctionner. De plus, dans un potager, il y a beaucoup de cultures et on n'est pas obligé d'intervenir partout de la même façon : cela peut-être sur l'ensemble du jardin, sur le potager uniquement, sur une planche ou même sur un simple rang.

En ce qui concerne le contrôle mécanique, nous avons déjà souligné que le labour a un effet sur les habitants du sol, spécialement sur les pathogènes. Le contrôle physique peut lui aussi être particulièrement efficace : contre les insectes (altises, mouche du poireau, pucerons du haricot...) et les oiseaux, divers filets sont véritablement utiles et ont une bonne durée de vie ; contre divers mammifères, il existe des clôtures adaptées ; enfin, contre les limaces, la cueillette manuelle nocturne reste une valeur sûre.

Le contrôle biologique de conservation est le plus classique pour le jardinier amateur. Nous détaillons plus loin des techniques de manipulation de l'habitat, cherchant à fournir le gîte ou le couvert à des ennemis naturels ou à perturber les bioagresseurs.

Le contrôle chimique fait bien partie de l'IPM. Mais le principe est, dans un premier temps, d'utiliser le meilleur pesticide disponible, celui qui serait efficace sur le bioagresseur concerné, sans trop d'effets sur les autres organismes. Il existe des bases de données permettant des

comparaisons : https://ephy.anses.fr. Dans un deuxième temps, il s'agit de n'employer que la dose nécessaire, de diminuer la fréquence d'application ou de ne traiter qu'une partie des cultures. Plus généralement, c'est la résistance aux pesticides qui doit être évitée, du fait de leur application trop systématique. Nous exposerons, un peu plus loin, quelques résultats d'essais concernant des pesticides faits maison (savon, extraits d'ail, lait...).

9.8.6 Évaluation

Pour évaluer l'efficacité des différentes méthodes de lutte contre les ennemis des cultures, sont souvent mentionnées : la production potentielle (maximum), l'absence (absolue) des ravageurs ou la production obtenue avec l'emploi de pesticides. Avec de tels points de comparaison, le résultat sera invariablement défavorable ! Il faut tenir compte du fait que l'IPM a pour objectif de protéger la santé humaine et l'environnement, particulièrement sa biodiversité, tout en autorisant une production importante, à des coûts raisonnables (de lutte). Il s'agit, par conséquent, d'une évaluation multicritères, devant être menée pendant plusieurs années.

9.8.7 Critique de l'IPM

La lutte intégrée contre les ennemis des cultures existe maintenant depuis plus de 60 ans, et un bilan peut en être fait (Deguine et al., 2021). Malgré un certain nombre de succès remarqués, l'utilisation de pesticides a, en réalité, augmenté de 25 % entre 2011 et 2018 en France ; et c'est un phénomène mondial. La protection revient, le plus souvent, à avoir directement recours aux pesticides synthétiques, voire même de façon préventive. Les pesticides semblent, en effet, offrir une garantie à court terme, simple à appliquer, et de coût raisonnable. C'est là, *le contraire de l'esprit* de la lutte intégrée, qui prône une pyramide des moyens dont les pesticides forment le dernier étage et donc le recours le plus rare (*cf.* Figure 112). Il est vrai que la directive européenne contient quand même trois étapes, sur huit, uniquement dédiées à l'emploi des pesticides synthétiques...

Plus généralement, il est reproché à l'IPM une multitude d'appellations, un pullulement de ses définitions (plus d'une centaine)

et la myriade de pratiques qui s'ensuivent ; et dont certaines sont, comme nous l'avons souligné, opposées à l'esprit originel de sa création par des entomologistes (réduire les pesticides et leur substituer des méthodes de contrôle biologique) ; alors que d'autres élargissent la réflexion comme l'IPPPM[355] !

Et même si plusieurs techniques de contrôle sont employées, elles sont en fait plutôt juxtaposées[356] qu'intégrées ; pas hiérarchisées comme elles devraient l'être selon la pyramide de l'IPM ; et la priorité n'est pas donnée à la prévention, prévention qui demanderait une reconstruction du système de culture (polyculture, rotations longues, manipulations conséquentes de l'habitat), des connaissances importantes en écologie, des approches participatives (scientifiques et agriculteurs) et collectives (plusieurs fermes), pour gérer les problèmes causés par les bioagresseurs mobiles sur un plus grand espace.

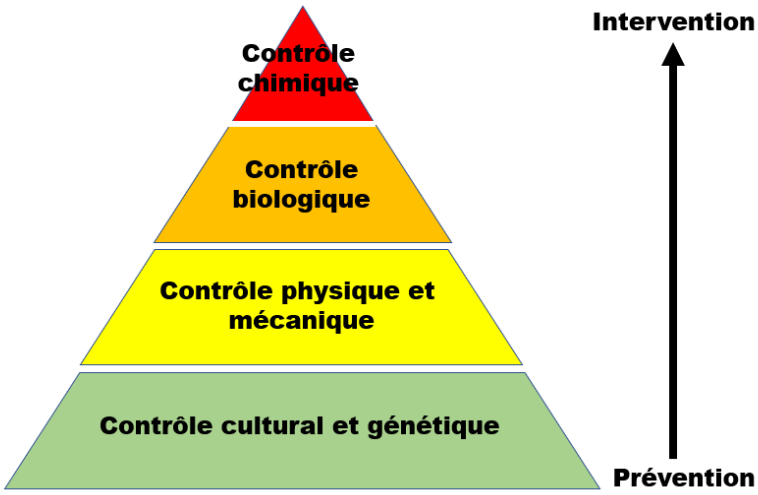


Figure 112 : Pyramide de l'IPM.

9.8.8 Production intégrée

Comme le dit Lucas (2007), l'arrivée des pesticides a conduit à une « *déconnexion* progressive des actes techniques visant à augmenter le

[355] Integrated Pest Pollinitor Predator Management.
[356] Sachant que leurs effets pourraient s'avérer antagonistes.

potentiel de production et des actes techniques permettant de préserver ce potentiel de production jusqu'à la récolte ».

Il s'agit, déjà, de sortir d'un système de protection centré sur le bioagresseur (integrated *pest* management) ou sur le couple « bioagresseur vs. ennemi naturel », pour protéger globalement *toutes* les cultures de *tous* les bioagresseurs. C'est un peu le sens du décentrement qu'offre l'une des appellations françaises de l'IPM : la protection intégrée des cultures.

La sémantique, casse-t-elle les briques de la pyramide IPM ? Il est parfois souligné qu'on s'attache plus à traiter des symptômes qu'à traiter la racine du mal ; c'est pourquoi d'aucuns prêchent radicalement pour un cadre de pensée plus systémique : la production intégrée, basée sur le fonctionnement et la santé écologique de l'agrosystème, en *utilisant en premier lieu la biodiversité et la santé du sol*.

La protection des cultures ne peut être séparée de la gestion générale de la ferme et de la préservation des ressources (eau, énergie...). Il s'agit de pratiques préventives permettant de développer les services écosystémiques, et plus seulement de protéger une monoculture de blé des attaques d'un puceron. Pour finir, comme j'ai commencé, sur une parole de Lucas (2007), cela nécessite des véritables « ruptures dans la conception même des systèmes de culture ». Et des potagers ?

> Du côté de chez Stéphane : J'avoue que je trouve qu'on en demande beaucoup aux agriculteurs et aux scientifiques chargés de les « accompagner » (en étant, il me semble, dotés de faibles moyens) par rapport à d'autres secteurs d'activité. La protection agroécologique des cultures est, à mes yeux, une science multidisciplinaire participative complexe en construction.
>
> En tant que jardinier amateur, nous pouvons être d'autant plus sensibles à ces enjeux et nous retrouver finalement : à en apprendre le plus possible sur l'écologie ; à observer plus systématiquement les visiteurs et résidents du jardin ; et à bricoler des solutions, avec comme cap les services

écosystémiques[357], comme priorité la prévention et comme pratiques celles que je vais à présent détailler (rotations, manipulations de l'habitat, contrôle physique des bioagresseurs et... pesticides).

9.9 Méthodes spécifiques de lutte contre l'adiversité

9.9.1 Rotations

Une rotation est une suite (dans le temps) de cultures différentes sur le même espace, que l'on oppose à une monoculture continue. C'est une très ancienne pratique agricole qui a été largement remplacée, à la suite de la Seconde Guerre mondiale, par l'emploi de fertilisants et de pesticides. Mais elle revient à l'ordre du jour, car la production agricole conventionnelle semble atteindre un plateau et ses impacts environnementaux négatifs ne sont plus à rappeler. Si les rotations, pour le maïs par exemple, représentent environ 80 % des cultures, ces rotations ont raccourcies ; elles sont souvent une simple alternance sur deux ans de type maïs/soja, plutôt que de longues rotations incluant des foins ou des pâturages, comme précédemment.

Les rotations ont un effet positif sur la production, par rapport à une monoculture continue. En fait, quelles que soient les quantités de fertilisants ajoutés, les rotations ont un effet additionnel sur la production qui est évalué à 20 % par Zhao et al. (2020), mais qui varie fortement en fonction du climat, du sol et des pratiques (labour, fertilisation[358]). Les causes de cet effet ne sont pas clairement élucidées ; il est prouvé que l'ajout de plantes fixatrices d'azote apporte un effet fertilisant à la culture suivante, mais cela ne suffit pas à expliquer l'effet rotation ; de plus, les apports en d'autres nutriments semblent limités.

---

[357] Voir le chapitre consacré à ce thème.

[358] Elles semblent particulièrement efficaces si l'apport de fertilisant azoté est faible.

Il faut, sans doute, aussi compter sur une réduction des mauvaises herbes, des ravageurs et des maladies. Plus les cultures de la séquence sont différentes, et plus cette réduction est importante. Cela ne fonctionne pas avec tous les bioagresseurs : ainsi, pour que l'effet rotation fonctionne bien, il faut que les bioagresseurs soient peu mobiles, qu'ils soient spécifiques à une plante-hôte et qu'ils aient une faible capacité de survie sur plusieurs années. Pour ce qui est des mauvaises herbes, il faut que la culture précédente soit couvrante, et une combinaison avec un labour est recommandée. Au final, ce sont sur les maladies fongiques et les nématodes que les rotations fonctionnent le mieux. L'activité des organismes du sol augmente avec les rotations, mais elles paraissent, *a contrario*, limiter l'effet des pathogènes présents dans la rhizosphère.

Seules des rotations très longues, incluant des foins ou jachères, doublées d'apports de fumier, parviennent à conserver la santé physique du sol. Les rotations courtes ont, en revanche, un moindre effet (et parfois même un effet négatif par rapport à des monocultures continues à forte biomasse) sur la structure du sol, son contenu en matière organique, ses capacités hydriques et son érosion (Bullock, 1992).

Dans le potager, sur une petite surface, le problème est que de multiples cultures se succèdent et se mélangent, y compris sur une même planche (45 espèces au total sur 65 m^2, pour ma part, avec deux ou trois cultures dans l'année par planche), et que trouver un système de rotations adapté est, par conséquent, extrêmement compliqué. Premièrement, on peut aller au plus simple et se concentrer sur les cultures où l'effet est le plus grand (+34 % pour les pommes de terre et patates douces selon Zhao et al., 2020) ; ou sur des cultures auxquelles nous tenons particulièrement, souvent les tomates ; ou insérer, le plus souvent possible, des cultures de fabacées ? Deuxièmement, on peut s'inspirer du système groupé en parcelles de Jean-Martin Fortier (voir section 7.6.5). Troisièmement, il est possible d'avoir recours à... une programmation mathématique mixant rotation et cycles de culture ; pour en avoir une idée, taper dans *Google Scholar* les trois mots-clés : *vegetable rotations programming* ; et prévoir quelques longues soirées libres en hiver pour lire les références indiquées...

9.9.2 Manipulation de l'habitat

À qui se fier ?

Il y a deux écueils pour savoir qui nous devons écouter, quand nous allons modifier notre jardin, et pas seulement notre potager, afin d'y accueillir plus de biodiversité. Le premier est que, même si la littérature scientifique s'est largement penchée sur le problème en ce qui concerne les grandes monocultures, un jardin (et un potager) n'est ni très grand, ni une monoculture. Dès lors, dans quelle mesure les résultats obtenus nous importent-ils ? La notion, par exemple, de culture intercalaire, où la culture principale est entrecoupée par des bandes d'une autre culture, par des fleurs ou par des mauvaises herbes, a-t-elle un sens, alors que c'est le dispositif usuel dans un potager, avec deux planches qui se jouxtent ou, très souvent, de rayons de légumes différents à l'intérieur de la même planche ? Comment faire autrement, en gérant simultanément une trentaine d'espèces sur 65 mètres carrés ? Sans parler de la mitoyenneté avec le voisin et son verger, ou au contraire, son immense pelouse bien tondue, ou enfin de la proximité d'un petit bois ?

Le second écueil, malgré de nombreux conseils donnés au niveau du potager, est de se prononcer sur la pertinence de tels conseils. Sont-ils appuyés par des faits ? Non, et pour une raison fort simple : c'est très difficile à réaliser ! Il faut imaginer suivre, pendant quelques années, un bon nombre de jardins, et y décompter les milliers d'individus de milliers d'espèces (araignées, annélides, mollusques, insectes, batraciens, serpents, rongeurs, oiseaux ; je ne considère même pas le cas des espèces microscopiques), y compris les végétaux ; espèces parfois très ressemblantes et parfois même non identifiées ; pour ensuite rapporter les variations observées à des caractéristiques du site ; ou mieux encore : organiser ces caractéristiques lors d'une expérimentation, afin d'obtenir des relations de cause à effet.

Ces nombreux conseils sont très souvent destinés à des animaux supérieurs (oiseaux, papillons, abeilles...) qui ont, en outre, une grande capacité de déplacement. Mais *la cigogne ne fait pas la biodiversité* ; la véritable biodiversité est ailleurs, résidant souvent à vie au jardin. Il n'est point besoin de l'attirer, mais seulement d'instaurer les conditions de son développement et de sa reproduction. La biodiversité

est, par exemple, dans un certain nombre de consommateurs des cultures, comme les pucerons (ce qui nous dérange, mais qu'il faudrait donc accepter : ne serait-ce que pour faire venir les animaux supérieurs qui s'en nourrissent), mais *surtout, chez les décomposeurs* qui forment la très grande majorité de la biodiversité et pratiquement la base de la chaîne alimentaire. Nuançons... La véritable base est constituée par les plantes... On en arrive donc à une première conclusion : *c'est d'abord avec des plantes que nous allons installer la biodiversité* (ce que confirment les résultats cités plus loin). Et nous allons laisser les pollinisateurs, les herbivores et surtout, à leur mort, les décomposeurs, en disposer.

Je vais donc ici m'appuyer sur les rares articles scientifiques qui abordent le problème *à l'échelle qui nous intéresse* et, en particulier, le projet BUGS (*Biodiversity Urban Gardening in Sheffield*). Il s'agit d'une étude sur plusieurs années, concernant 61 jardins de ville, qui ont été étudiés en long et en large, et avec peu de travers, dans une série d'articles académiques (une quinzaine, j'en cite trois par la suite). Ce projet a été ensuite étendu à cinq autres villes, pour en arriver à un total de plus de 250 jardins. L'un de ces articles est particulièrement intéressant, il met en place de véritables expériences dans ces jardins, afin de tester ce qui fonctionne en termes de biodiversité. Ce sont des aménagements assez simples et réversibles, pour obtenir la participation des jardiniers[359]. L'autre caractéristique de ces dispositifs est qu'ils puissent avoir des effets sur une courte échelle de temps.

Quelques idées reçues

Contrairement à ce qu'on pourrait penser, les jardins, y compris ceux des villes, ont une diversité végétale nettement plus élevée que les zones naturelles. Thompson et al. (2003) montrent qu'il y a dans les jardins des villes 438 espèces[360] sur 120 m^2, alors que, selon les environnements naturels considérés en Grande-Bretagne, cela va de 49 à 179. Ils concluent même : « The world record for plant diversity

---

[359] Il est ainsi intéressant de savoir que ceux-ci ont refusé de laisser une partie de leur pelouse non tondue, par rapport à la pression sociale exercée par leurs voisins.

[360] 120 m^2 est la surface que recouvre les quadrats dans les 60 jardins, de surcroît, on est loin de la saturation de l'échantillonnage, il en existe peut-être deux fois plus.

remains unknown, but is almost certainly held by a garden somewhere. » (forêt tropicale comprise...). Ils l'expliquent par deux faits. Le premier est que les jardiniers ne prennent généralement que peu d'exemplaires de chaque espèce, et par leur soin, ceux-ci arrivent à se maintenir. Le second est que les jardiniers piochent dans une immense biodiversité, y compris exotique.

Une autre idée reçue concerne ces plantes exotiques. En fait, il est souvent conseillé, pour la biodiversité, d'implanter des plantes indigènes. Ceci nécessite d'abord de préciser ce qu'est une plante indigène... Une définition d'une plante indigène est qu'elle est venue s'installer sans assistance de l'homme. Cela est loin de régler tous les problèmes, car il s'avère que des plantes que l'on pensait indigènes sont finalement venues, il y a quelques centaines d'années, grâce à l'homme. En fait, à part dans certaines îles, la plupart des espèces sont distribuées un peu partout. Et si ce n'est pas exactement le cas de l'espèce, c'est le cas d'une espèce du même genre ou de la même famille ; autrement dit, d'une plante relativement similaire, capable de s'adapter au sol, au climat et aux organismes vivants. C'est pourquoi les espèces exotiques ne sont pas un frein à la biodiversité, *elles viennent s'y ajouter* ! Salisbury et al. (2015, 2017) créent même la catégorie d'espèce presqu'indigène, en considérant les espèces d'origine d'Europe du Nord, qui ont le potentiel de s'acclimater immédiatement, par opposition à des espèces véritablement exotiques. Dans une expérience comparant plantes indigènes, presqu'indigènes et exotiques, ils observent, en termes de pollinisation et d'attraction de la biodiversité d'invertébrés, que les plantes indigènes sont effectivement un peu plus performantes. Toutefois, les plantes exotiques accomplissent également ces services, parfois même plus efficacement pour certains groupes d'animaux spécialistes, et elles fleurissent assez tard, permettant d'étendre la saison. Leur recommandation est, d'une part, de constituer des compositions mixtes, avec une proportion plus élevée de plantes indigènes et presqu'indigènes, et d'autre part, de ne surtout pas raisonner à partir de ce critère, mais à partir des fonctions qu'une plante, quelle que soit son origine, est capable de remplir : c'est-à-dire la morphologie de sa fleur, la destinant à un certain type de visiteurs, la date et la durée de sa floraison.

Du côté de chez Stéphane : On va revenir sur l'idée même de plantes indigènes. Gröning et Wolschke-Bulmahn (2003) exposent historiquement que « l'enthousiasme pour les plantes indigènes », même s'il est revenu sur le devant de la scène dans les revues de jardinage et chez les architectes paysagers, n'est pas neuf : l'idée date du dix-neuvième siècle. Avant cela, la communauté scientifique a plutôt une approche internationale et il est bien vu que les jardins contiennent des espèces exotiques. Avec la création de l'idée d'état-nation, des courants de pensée vont mêler écologie naissante et nationalisme. L'idée de plante native se teinte alors d'une opposition aux plantes exotiques qui deviennent agressives et invasives. Au mieux, on a vu naître l'idée de vrais jardins anglais ou vrais jardins français, jusqu'aux délires du national-socialisme qui élabore une doctrine d'un paysage et jardin allemand, appelé *Blut- und Bodenverbundene Garten*. (Oui, cela parle bien du sang et du sol...) Gröning et Wolschke-Bulmahn (2003) expliquent qu'il est difficile de débattre de ces idées de plantes indigènes, car elles sont émotionnellement chargées et ils veulent en exposer l'origine. Ils souhaitent, surtout, insister sur le fait que ce n'est sans doute pas la meilleure façon de générer des idées nouvelles pour créer des jardins ; façon qui reposerait plutôt sur des concepts nouveaux, des matériaux nouveaux et des plantes nouvelles. Il citent en conclusion Rudolf Borchardt, un auteur juif persécuté, qui souligne que, sans les plantes exotiques, les jardins et les potagers européens seraient d'une grande monotonie, et qui avance que : « Les jardins connectent les gens, le temps et les latitudes. ».

Dans la même veine nationaliste, il existe une méthode agricole alternative dite *natural farming zero budget*, développée en Inde, qui tente de limiter les intrants, et pour la fertilisation, repose sur le fumier des vaches. Fort bien. Mais il est précisé qu'il faut utiliser du fumier de vache

indienne, qui a un meilleur effet[361]. Décidément, les vaches sacrées font aussi de sacrées merdes.

Taille des jardins

La taille des jardins est l'élément déterminant qui permet de contenir ou non certains éléments, comme de grands arbres, des arbustes, des haies, des surfaces de pelouse non tondues, des friches, une serre, un potager, des tas de compost et des étangs. Faute de place, ces éléments sont moins présents en proportion dans les petits jardins, qui réunissent d'abord une maison, un garage, une pelouse, quelques bordures fleuries et des allées (Loran et al., 2008). Dès lors, le potentiel d'attraction de la biodiversité et la fourniture de services écosystémiques y sont moins importants.

Arbre

S'il est un résultat bien étayé par le projet BUGS, c'est que la biodiversité dans le jardin est corrélée à la présence d'arbres (Smith et al., 2006). Ils sont à la fois des collections de microhabitats (Larrieu et al., 2018) et des réserves de nourriture, tant à la chute des feuilles pour les décomposeurs qu'à la floraison pour les butineurs. Parmi les multiples autres services écosystémiques qu'ils peuvent rendre, nous insisterons sur les confitures avec les arbres fruitiers. Point n'est besoin d'une forêt domestique, un arbre isolé a même une *importance disproportionnée* sur la biodiversité (Fisher et al., 2010) ; les suivants y ajoutant bien sûr quelque chose, mais de façon plus marginale. Reste le délicat problème du positionnement de cet arbre dans un très petit jardin...

Arbre mort

Les arbres n'ont d'ailleurs pas besoin d'être vivants pour constituer des sources de biodiversité : les souches mortes en étant

[361] C'est écrit dans divers papiers plus ou moins recommandables à mon sens, et dans le plus ridicule « faux » article scientifique que j'ai lu dans ma longue carrière de chercheur : Bishnoi, R., & Bhati, A. (2017). An overview: Zero budget natural farming. *Trends in Biosciences*, *10*(46), 9314-9316. Il est en ligne, je vous conseille sa lecture, en particulier la section *Materials and methods*, la bibliographie et le fait qu'il ait été accepté en trois jours. Une honte.

particulièrement pourvues. Pour les « simuler », il est possible de se contenter d'empiler du bois mort, stratagème dont l'intérêt a été démontré par Gaston et al. (2005), mais qui demande, pour trouver sa pleine efficacité, du bois assez ancien et pas seulement des tailles fraîches.

Hôtel à insectes

Les hôtels à insectes sont finalement des substituts d'arbres morts ou vivants. Les résultats obtenus sont variables. Gaston et al. (2005) ont essayé des systèmes censés attirer certains types de bourdons avec des pots de terre (retournés) ou des boîtes (trouées...) en bois, et cela n'a pas été un succès. En revanche, d'autres systèmes, plutôt destinés aux abeilles et aux guêpes solitaires, ont eu plus de réussite : il s'agit soit de tiges de bambous réunies, soit de trous de divers diamètres réalisés dans du bois non traité. L'étude montre également qu'il vaut mieux les placer au soleil, pour un meilleur taux d'occupation (38 % vs. 15 % à l'ombre).

Von Königslöw et al. (2019) prolongent ce travail en comparant des versions commerciales avec des hôtels qu'ils ont eux-mêmes élaborés (selon l'état des connaissances scientifiques). Ces derniers ont été plus occupés (37 % vs. 15 %) et par un plus grand nombre d'espèces (22 vs. 8). Ces hôtels combinent bambous, roseaux et bois dur (en évitant plutôt les conifères) percé de trous de longueurs diverses, mais au moins de 15 cm, et de diamètres également variés se situant plutôt entre 4 et 8 mm. Les cavités doivent être correctement percées et lisses, afin de limiter les blessures à l'entrée. D'après les auteurs, en avril 2019, il y avait 1 000 offres commerciales d'hôtels à insectes sur Amazon, avec des prix s'étalant de 5 € à 269 €. À vos perceuses[362] ! Enfin, la majorité des abeilles et guêpes solitaires habitent dans le sol, ce sont donc plutôt des friches qu'il faut leur réserver.

Haie

Une taille au-dessous des arbres : les haies. Comme je l'ai déjà évoqué brièvement dans le chapitre sur le vent, les haies rendent de

[362] On peut trouver des indications détaillées sur la construction en éléments supplémentaires de leur article : https://static-content.springer.com (pages 17-19).

nombreux services écosystémiques (Montgomery et al., 2020). Tout d'abord des services d'approvisionnement, elles protègent les cultures du vent et peuvent fournir du bois d'œuvre, de chauffage et de la nourriture, selon leur composition. Les services de régulation consistent en la limitation du ruissellement, et en une facilitation de l'infiltration, particulièrement en pente ; en la diminution de l'érosion éolienne et hydrique ; en la séquestration du carbone, et en ce qui nous intéresse ici : le contrôle biologique. Les haies attirent particulièrement les carabes, les scarabées, les araignées et les chauves-souris (mais aussi, bien entendu, d'autres habitants comme... les pucerons). Concernant les services socio-culturels, les haies constituent un marqueur du paysage et une délimitation pour les propriétaires, en particulier dans des territoires de type bocage. Parmi les services de support, c'est particulièrement la biodiversité qui est augmentée. Une étude, en Europe du Nord-Est, a montré, pour une occupation de 10 % de la surface, qu'elles formaient 43 % de l'habitat sauvage. C'est déjà la biodiversité du sol qui est clairement améliorée, avec les bactéries, les champignons et surtout les vers de terre ; mais aussi les papillons, les petits mammifères (rongeurs), et de façon emblématique, les oiseaux. Les services de pollinisation rendus sont également importants. Toutes les haies ne se valent pas, et selon leur âge, leur géométrie et leur composition, les services sont plus ou moins bien délivrés. Dans un jardin privé, ce sont généralement de petites haies qui sont moins riches en biodiversité, d'après Montgomery et al. (2020). Enfin, leur gestion compte et ces auteurs soulignent qu'il vaut mieux ne pas multiplier les tailles, pour laisser la floraison et la biodiversité se développer.

Les haies sont, en quelque sorte, des « murs végétaux ». Les murs et les tas de pierres génèrent une végétation spécifique (lichens, mousses, plantes de rocailles) et la biodiversité qui s'ensuit ; sans oublier les anfractuosités abritant une faune appréciant les endroits secs et chauds. Nous n'irons pas plus loin à ce sujet, mais les jardins de pierre forment un écotype en soi[363].

---

[363] Par exemple en Grèce, avec : Krigas, N., Panagiotidou, M., & Maloupa, E. (2017). Incorporating Biogeographical Principles in Horticulture:: Design and Creation of the Ionian Islands Unique Rock Garden in Thessaloniki, Greece. *Sibbaldia: the International Journal of Botanic Garden Horticulture*, *15*, 129-146.

Bande fleurie

Les bandes fleuries sont de petites parcelles attenantes aux cultures, dans lesquelles sont réunies des espèces, essentiellement choisies pour leurs fleurs, afin d'augmenter la biodiversité et de maîtriser les bioagresseurs. Il existe des mélanges, un peu passe-partout, qui sont proposés à la vente, mais la technique peut être beaucoup plus ajustée. Luka et al. (2016) préparent, pour le chou et un de ses principaux ravageurs, la noctuelle du chou, un mélange spécifique (sarrasin, vesce, bleuet, coquelicot) dans le but d'attirer des ennemis naturels, parasites des œufs et des larves. Le mélange a été constitué par des fleurs adaptées à la morphologie des insectes parasites et le nectar leur correspond également. Des bleuets sont, de surcroît, ajoutés au sein du champ, comme plantes compagnes des choux. Suivant les années, la manœuvre est plus ou moins efficace sur les ravages des noctuelles et sur le rendement, avec un effet décroissant selon la distance à la bande fleurie[364]. Les bandes et plantes compagnes n'attirent pas que les parasitoïdes visés, mais aussi d'autres auxiliaires intéressants (carabes, araignées, etc.). Les auteurs reconnaissent que l'effet se produit avec un peu de retard et qu'il est sans doute nécessaire de combiner ce dispositif avec des contrôles biologiques (lâchers massifs des parasitoïdes, en parallèle dès le début de culture). La technique est donc intéressante, mais, dans un potager, on peut difficilement cibler tous les bioagresseurs de tous nos légumes : il est possible de perdre en efficacité. Toutes les bandes ne fonctionnent pas forcément, ainsi des mini-parcelles d'orties, censées attirer des (larves de) papillons, n'ont eu aucun effet intéressant (Gaston et al., 2005). Le secret semble être que la bande soit bien fleurie, qu'elle le soit le plus longtemps possible durant la saison et que les fleurs aient des morphologies différentes, afin de convenir à divers types d'insectes. Ceci dit des fleurs ornementales sont souvent présentes, non loin du potager, et font très bien l'affaire[365] ; les légumes fleurissent également, si on leur en laisse le temps, ainsi que... les pelouses.

---

[364] C'est pourquoi, dans d'autres études, les bandes fleuries sont insérées au centre de la culture ou en mosaïque.

[365] Seules de rares fleurs, très modifiées par la sélection, ne sont pas du tout attractives.

Pelouse

Chollet et al. (2018) ont étudié des pelouses urbaines à Rennes ; pelouses non irriguées, non fertilisées et subissant trois fréquences de tonte (20, 10 ou 1 fois par an). Initialement semées sous forme de gazon, elles ont, au fil du temps, pu se transformer en une communauté plus ou moins diverse de plantes. Il s'avère que la fréquence de tonte réduit fortement la biodiversité, tant spécifique, que fonctionnelle et phylogénétique. Or, ces deux dernières sont usuellement associées à divers services écosystémiques : pollinisation et aspect esthétique, en particulier.

Un point important est que seule la réduction drastique des tontes a un effet[366], et les auteurs conseillent de combiner des tontes intensives, pour les espaces très utilisés par les habitants, et des véritables prairies urbaines ne subissant qu'une seule tonte par an. Mais au moins une tonte ! car sinon, les espaces se transforment et peuvent avoir, au final, une moindre biodiversité. De plus, cette tonte doit plutôt être repoussée à fin juillet que réalisée au printemps, ce qui laisse le temps à divers invertébrés de s'y mieux développer.

Il paraît possible d'étendre ces idées au sein de notre propre jardin, si la place n'y manque pas. Ceci dit, la baisse de la fréquence de tonte permet, sans changer la composition de la végétation, de laisser le temps à une floraison spontanée d'apparaître. En passant simplement d'une tonte par semaine à une tonte toutes les trois semaines, on observe 2.5 fois plus de fleurs et une plus grande abondance et diversité d'abeilles (Leman et al., 2018).

Tas de compost et paillage

Il en va des herbacées et petits arbustes comme des arbres, ils restent intéressants lorsqu'ils sont morts... puisqu'ils sont alors destinés à l'armada des décomposeurs.

Un tas de compost a la capacité d'attirer, par sa (relative) chaleur, son humidité et la nourriture disponible, de nombreux habitants

[366] Le fait de passer de 20 à 10 tontes n'en a pas.

(Gaston et al., 2006), en particulier des orvets et des couleuvres[367] ! Les mulchs organiques sont, pour les mêmes raisons, un bon refuge à la diversité que nous aimons, ainsi qu'aux limaces.

Fertilisation

Le *Park Grass Experiment* est une des plus longues expériences agronomiques jamais tentées, qui se déroule, sans interruption, depuis 1856 à Rothamsted. Dans ces parcelles de prairie, ont été utilisées, année après année, les mêmes doses et type de fertilisants. Crawley et al. (2005) décrivent la richesse spécifique végétale observée ; celle-ci est clairement plus faible en sol acide et elle est aussi plus faible dès que des fertilisants sont employés : du phosphore surtout, de l'azote, mais aussi des fertilisants organiques, comme du fumier. Lorsque le sol est très fertile, s'installe un petit groupe de plantes très compétitrices qui génèrent d'ailleurs une importante biomasse. (C'est le but recherché par toute fertilisation...) En sol pauvre, d'autres plantes sont capables d'exploiter des niches écologiques et on observe une coexistence avec les plantes précédentes, mais l'ensemble est de plus petite taille. Une des méthodes, pour augmenter la biodiversité, à l'extérieur du potager, est par conséquent de ne pas chercher une fertilisation maximale dans l'ensemble du jardin, et particulièrement dans la pelouse.

Étang et bassin

L'eau est le premier habitat de la vie sur Terre, et lui reste indispensable ; aussi, les jardins pourvus d'étangs ou de bassins développent une diversité qui leur est particulière. Elle est d'autant plus florissante que ces points d'eau sont placés dans un endroit ensoleillé et qu'ils contiennent des plantes aquatiques ; mais elle devient, au contraire, plus restreinte avec la présence de poissons (Thompson[368], 2011).

---

[367] Edgar, P., Foster, J., & Baker, J. (2010). *Reptile habitat management handbook*. Bournemouth: Amphibian and Reptile Conservation. wwwhttps://www.lbp.org.uk.

[368] Ce n'est pas une publication scientifique, mais l'auteur y résume le projet BUGS : Thompson, K. (2011). *No nettles required: the reassuring truth about wildlife gardening*. Random House.

L'expérience de Gaston et al. (2005) est particulièrement enrichissante, elle montre que l'implantation de très petits bassins (en plastique, 28 litres de contenance et 0.25 m^2 de surface, donc adaptés à toutes les tailles de jardin), non enterrés, mais pourvus de « rampes » pour y accéder, suffit à attirer significativement plus de biodiversité, dont des grenouilles, mais aussi, à coup sûr, sur une durée d'un mois, des larves de moustiques[369]....

> Du côté de chez Stéphane : Un exemple ne vaut pas démonstration, mais il y a deux bassins enterrés, d'environ un mètre carré de surface, dans mon jardin : l'un au soleil,
>
>
>
> appelé le bassin méditerranéen (ci-contre), au soleil et avec des nymphéas et des laitues d'eau et... qui fourmille de vie ; et l'autre bassin, appelé Joe[370], situé à l'ombre et sans plantes, est une sorte de désert aquatique (à l'œil nu...) qui sert quand même à étancher la soif de certains petits animaux, mais avant tout, de réservoir pour arroser le potager.

Hétérogénéité de l'habitat

Benton et al. (2003), à la lecture de la littérature, font l'hypothèse que l'hétérogénéité de l'habitat est la clé de la biodiversité. Ainsi, la biodiversité plus importante dans les fermes biologiques ne viendrait pas seulement, ou même pas principalement, de l'absence de pesticides, mais de la plus grande diversité des habitats proposés.

Ils soulignent que cette diversité doit s'entendre : au niveau spatial du paysage (diversité γ), au sein de la ferme (diversité β) et dans les parcelles (diversité α), seuls ces deux derniers niveaux étant du ressort individuel ; mais aussi au niveau temporel, dans la succession des cultures, par exemple.

Enfin, si les manipulations de l'habitat servent assurément à développer la biodiversité, elles autorisent également de nombreux effets esthétiques dans le jardin.

---

[369] On parle alors de *jardin des piqûres*.

[370] Joe... bassin

9.9.3 Contrôle physique de l'adiversité

Les techniques de contrôle physique modifient l'environnement du bioagresseur, de telle façon qu'il ne cause plus de dommages à la culture (Vincent et al., 2003).

Contrôle physique passif

La technique la plus efficace est née pour protéger les plants de tomates de la mouche blanche (Weintraub, 2009). Il s'agit de sortes de moustiquaires, appelées écrans d'exclusion des bioagresseurs, qui sont employés dans les serres. L'efficacité s'est avérée remarquable, même si l'étanchéité est difficile à maintenir, en particulier aux entrées, et si l'aération est réduite. Cette technique a été généralisée au champ, avec l'apparition des filets anti-insectes, le plus souvent supportés par des arceaux ; il en existe également pour se protéger des oiseaux. Il s'est avéré que les voiles de croissance P17, simplement déposés sur les cultures, outre leur intérêt pour la température, limitent au printemps l'impact des bioagresseurs ; en été, les voiles d'ombrage ont un effet similaire, d'autant plus qu'il en existe désormais des versions colorées, accentuant leur efficacité. Il n'est pas toujours nécessaire de couvrir la culture : des clôtures fermées par ces voiles anti-insectes, d'une hauteur de un mètre, atténuent les dégâts des mouches mineuses (chou, poireau...) qui volent assez bas. Des clôtures sont aussi employées contre divers mammifères.

Les paillages, parmi leurs multiples intérêts, réduisent aussi, dans une certaine mesure, les dégâts des insectes (mais pas des limaces...). Certaines couvertures de sol en plastique, avec des couleurs particulières, y parviennent également.

Moins classiques, des tranchées assez profondes, avec des pentes à 45°, et soit couvertes de plastique, soit de sciure, forment aussi des barrières intéressantes contre certains insectes marchant ou rampant.

Divers systèmes de pièges sont développés, particulièrement dans les vergers, soit pour perturber les bioagresseurs, soit pour les attirer puis les engluer ou les noyer. D'autres pièges mécaniques sont destinés aux rongeurs.

Contrôle physique actif

La plus ancienne technique est le simple ramassage manuel des doryphores ou des limaces. Elle réclame pas mal de travail pour être efficace, mais reste raisonnable pour un petit potager. Elle a été améliorée, à grande échelle, par des systèmes pneumatiques qui aspirent ou soufflent sur les cultures, pour supprimer les insectes. Il existe des méthodes basées sur le son, mais dont l'efficacité semble limitée.

D'autres techniques sont thermiques : bien entendu, la conservation des récoltes y a recours, avec le froid ; mais la solarisation, les flammes ou la vapeur sont employées, avant l'installation des cultures, pour débarrasser le sol de champignons pathogènes, de nématodes et de graines de mauvaises herbes.

L'eau est utilisée, avec parfois des « inondations », mais ce sont le plus souvent des arrosages par aspersion qui visent à limiter la présence des thrips, des acariens ou des altises.

9.9.4 Pesticides

Effets des pesticides

Les pesticides augmentent la quantité (+30 %) et la qualité, au moins cosmétique, des récoltes. Rappelons qu'ils constituent une solution efficace, à court terme, contre les ennemis des cultures, sont simples d'emploi et leur coût est facilement amorti. Les pesticides sont aussi très utiles pour lutter contre diverses maladies, comme la malaria, ou conserver des aliments, des fibres... L'effet de ces produits décline cependant, face à diverses résistances des bioagresseurs. Le Japon est largement champion du monde de leur utilisation (~19 kg/ha), la France arrivant loin derrière (~5 kg/ha), mais devant les États-Unis ! Ce sont d'abord des herbicides qui sont employés (47.5 %), puis des insecticides (29.5 %) et des fongicides (17.5 %) ; le reste étant destiné aux nématodes, acariens, mollusques, rongeurs...

Depuis l'ouvrage « Printemps silencieux » de Rachel Carson, une prise de conscience a eu lieu et les effets négatifs des pesticides ont été mieux cernés. À l'évidence, les pesticides ne ciblent pas toujours de façon très précise ; ainsi, un fongicide ne fait pas forcément de différence entre les champignons pathogènes et les champignons

bénéfiques. Par ruissellement, volatilisation, évaporation, lixiviation, les pesticides se retrouvent et se dégradent dans l'atmosphère, dans les sols et dans les eaux, où ils peuvent persister quelques jours à quelques années... Pour la pollution des eaux, les poissons sont un excellent bio-indicateur : ils sont en contact avec les pesticides par leur respiration (branchies), leur peau et leur alimentation ; en se nourrissant de plancton, d'algues ou d'animaux aquatiques, eux-mêmes contaminés, les poissons bio-accumulent des composés issus de pesticides. Et donc, chez les poissons, de nombreux problèmes de comportement, des modifications hématologiques, des déformations morphologiques, des difficultés de reproduction et finalement une mortalité plus élevée ont été mis en lien avec la pollution par les pesticides.

C'est ainsi, sans surprise, que des phénomènes similaires ont été observés chez les êtres humains : ce sont les personnes travaillant avec des pesticides qui sont le plus à risque (agriculteurs, ouvriers les fabriquant, etc.). On a relevé des associations avec diverses maladies respiratoires, des problèmes dermatologiques, des soucis de reproduction, des maladies dégénératives, de multiples cancers (poumon, prostate). L'étude de Nascimento et al. (2020) est frappante à ce sujet : elle montre que les personnes, ainsi exposées, ont cinq fois plus de chance d'avoir des problèmes de fonctionnement de leur ADN ; et que cela s'avère plus grave que de fumer ! À part les travailleurs, les personnes qui résident à proximité des champs traités courent également des risques.

Concernant le grand public, les résidus de pesticides sont présents dans de nombreux fruits et légumes, particulièrement à leur surface. Les précautions minimales sont donc de les laver[371], peler, bouillir, consommer cuits, traiter avec du vinaigre, du sel... ce qui réduit de façon importante leur présence (Bajwa & Sandhu, 2014).

Les pesticides sont classés en fonction de leur niveau de toxicité, par exemple dans le *système général harmonisé de classification et d'étiquetage des produits chimiques*. Ce sont plutôt des évaluations à court terme, celles à long terme étant nettement plus complexes à

[371] À condition d'avoir la chance de vivre dans un pays où l'eau potable existe et est régulièrement analysée.

réaliser. La toxicité dépend de la dose et de la date d'application : une période de latence est normalement exigée entre l'application et la récolte. Pour finir, on distingue souvent les pesticides artificiels (dits aussi pesticides de synthèse) des pesticides naturels ou biopesticides.

Biopesticides

Les biopesticides sont des « organismes vivants ou des produits issus de ces organismes, ayant la particularité de limiter ou de supprimer les ennemis des cultures » (cité dans Deravel et al., 2014). On peut trouver, dans le Tableau 1 de cet article[372], une liste de produits commercialisés et de leurs cibles.

Les biopesticides microbiens peuvent être basés sur des bactéries, des champignons ou des virus. L'organisme le plus employé est la bactérie *Bacillus thuringiensis* qui agit contre certains insectes, mais d'autres, des genres *Bacillus* ou *Pseudomonas*, sont utilisés contre les maladies fongiques. Les virus sont plutôt insecticides, alors que les champignons luttent contre d'autres champignons ou des nématodes. Les biopesticides végétaux utilisent des métabolites secondaires des plantes (neem, pyrèthre...) ou leurs propriétés physiques (huiles...). Les pesticides animaux sont soit directement des prédateurs (coccinelles, acariens, nématodes, trichogrammes...), soit des substances tirées d'animaux, qui visent parfois à simplement créer une confusion (phéromones). Enfin, certaines plantes (maïs, pomme de terre...) ont été génétiquement modifiées pour intégrer des pesticides naturels (bactériens).

Les biopesticides ont normalement un spectre d'action plus limité que les pesticides de synthèse, un effet moindre sur les auxiliaires bénéfiques, les pollinisateurs en particulier, et une toxicité généralement plus faible pour les mammifères. Ils ont une durée moyenne de vie moins longue dans le sol (6 jours en moyenne contre 39). En revanche, ils sont sensibles aux conditions climatiques, plus lents dans leur action, moins efficaces à court terme et largement plus onéreux.

Toutefois, ils ont toute leur place dans une stratégie de lutte intégrée, comme premier recours, ou dans le cadre de rotations avec

[372] Disponible en ligne : https://www.cabidigitallibrary.org

des pesticides de synthèse, afin de limiter l'emploi de ces derniers et le développement probable de résistances.

En Europe, la même législation leur est appliquée qu'aux autres produits phytosanitaires : ils doivent démontrer leur efficacité et on doit évaluer leurs conséquences sur la santé humaine, animale et environnementale. Il arrive ainsi que certains ne soient pas homologués, car leur origine biologique ne garantit pas qu'ils soient sans risques. Il existe une catégorie un peu particulière, les « Préparations Naturelles Peu Préoccupantes (PNPP) », qui ont droit à une procédure allégée et dont la seule chose préoccupante est peut-être leur effet (*cf.* le chapitre sur le purin d'orties).

Pesticides faits maison

Dougoud et al. (2019) opèrent une revue de littérature des pesticides faits maison avec des méthodes traditionnelles ; tout ne nous intéresse pas, car certaines plantes référencées ne survivent pas sous nos climats. Quelques-unes de ces préparations sont connues depuis plus de 2 000 ans, ce qui ne garantit pas *de facto* leur efficacité[373] ; des études ont en effet montré que certaines des préparations traditionnelles utilisées par des agriculteurs... n'avaient aucun effet. Les auteurs se concentrent sur les dix plantes les plus recommandées et les plus étudiées. Ce sont très clairement les préparations à base de neem, qui ont été les plus conseillées et testées, mais nous considérerons aussi celles à base de piment et d'ail.

Globalement, le constat est celui de la *grande variabilité* des effets observés, quelle que soit la plante considérée. Cela provient, d'une part, du matériau d'origine (contenant plus ou moins de principes actifs selon la région, la partie prélevée, le stade de la récolte et la conservation), et d'autre part, de la technique de préparation (broyage, concentration, adjuvants[374]), sans même parler des méthodes d'application. Si l'effet de réduction de certains bioagresseurs a été parfois assez bien étudié, les effets sur la santé humaine, sur des

[373] Pour reprendre les auteurs : « The pest control methods using traditional knowledge are based on centuries-long empirical observations, but *may also be tainted with belief* ».

[374] Souvent du savon qui permet de mieux recouvrir les feuilles.

organismes non ciblés (pollinisateurs, ennemis naturels) et sur l'environnement (air, sol et eaux) sont inexplorés. Les rares travaux semblent indiquer une moindre toxicité : c'est assez clair pour les produits qui sont également alimentaires, beaucoup moins avec des produits comme le tabac (la nicotine étant reconnue comme nocive) ou des plantes comme l'arbre à poison (intégré dans l'étude, mais qui contient de la roténone, interdite de par ses effets catastrophiques sur les poissons).

Les versions commerciales passent, elles, par une série de tests démontrant leur efficacité, répétée sur plusieurs essais et plusieurs années, par rapport à des contrôles. Leur innocuité est étudiée pour la santé humaine, et dans une moindre mesure, pour l'environnement. De toute façon, il reste bon de prévoir un équipement de type masque, lunettes et gants pour la préparation et l'application des produits faits maison.

L'ail semble ainsi sans effets collatéraux, au moins sur l'homme, mais a plusieurs fois prouvé son efficacité[375], avec une influence sur les populations d'acariens et sur divers insectes, ce qui est sans doute dû à ses composés soufrés. Le margousier (neem) n'est pas un arbre de nos contrées, on ne peut donc le travailler nous-même, mais de nombreux pesticides biologiques commerciaux l'emploient. Leur efficacité est largement démontrée sur les acariens et sur les insectes, probablement par l'intermédiaire de limonoïdes. Ils semblent relativement sûrs pour la santé humaine et l'environnement. Le piment a, en revanche, moins fait la preuve de son intérêt, bien que les capsicoïdes soient à la base de plusieurs insecticides.

À supposer que le matériau de base soit de qualité, le problème qui reste entier pour le jardinier amateur est celui de la bonne préparation de ces pesticides. Je ne vais prendre que deux exemples. Al-Naseri et al. (2014) étudient l'intérêt du lait[376] dans le traitement de l'oïdium, une maladie fongique. Un premier essai sur tomate, petit pois et

---

[375] Il existe un tableau dans l'article récapitulant les études et les concentrations employées, le tout disponible en ligne : https://link.springer.com

[376] Considéré légalement comme une substance de base pouvant permettre de produire des PNPP : http://substances.itab.asso.fr/fiches-substances-de-base

pastèque, nous apprend qu'une concentration de 0.1 de lait en poudre (soit à peu près du lait normal), chaque semaine pendant un mois, conduit à une réduction des infestations, par rapport à un contrôle (simple application d'eau sur les feuilles, pas de lait), mais de façon plus ou moins importante selon le légume[377]. D'autres études ont aussi montré des résultats encourageants sur le concombre, la courge et la courgette. L'expérience se prolonge, uniquement sur la tomate, et montre que l'infestation se réduit encore, quand la concentration augmente : à 0.2, l'effet est le même qu'avec un contrôle employant un fongicide biologique commercial. De même, la fréquence d'application augmente l'efficacité : une application bi-hebdomadaire étant meilleure. Cela étant, augmenter les doses et les applications a des implications nettes en termes de coûts financiers et de travail, qu'il faut prendre en considération. Enfin, si l'application préventive est plus rapide à agir, il s'avère que l'application curative n'est pas dénuée d'efficacité. Sans surprise, les conditions météorologiques ont une influence et le traitement est plus intéressant lorsqu'il y a du soleil (et peu d'humidité, qui défavorise le champignon).

L'étude de Tremblay et al. (2008) concerne le puceron du pêcher, pour lequel un insecticide biologique (commercial, mais on pourrait le fabriquer) à base de savon peut être utilisé, à une certaine concentration. Or, les auteurs montrent qu'une guêpe parasitoïde, ennemi naturel du puceron, est encore plus affectée que ce dernier à la même concentration : on peut donc tuer des insectes bénéfiques en même temps. D'autre part, cela montre que l'utilisation simultanée de ce pesticide naturel avec un contrôle biologique à l'aide de ce parasite (possible dans une serre) est contre-productive et qu'il faut donc, d'abord employer le biopesticide, et un ou deux jours plus tard, le contrôle biologique. Les auteurs étudient non seulement la mortalité de l'ennemi naturel, mais aussi des effets plus fins sur des déformations possibles des larves, une fois adultes, et sur la fécondité.

---

[377] On pouvait s'en douter, car ce qu'on appelle globalement oïdium n'est en fait pas causé par les mêmes champignons.

> Du côté de chez Stéphane : Je passe sur l'énorme complexité expérimentale de ce type d'études, mais je m'étonne un peu de la légèreté avec laquelle certains, *pourtant si compétents quand il s'agit d'épidémiologie vaccinale*, bricolent dans leur coin ces produits, sans aucune étude de relation dose-réponse, de *timing*, de dégradation au champ et d'effets indésirables sur les autres organismes, en particulier les ennemis naturels.

Pour qui souhaite en savoir plus, il faut signaler le remarquable travail d'une organisation : CABI (*Centre for Agriculture and Bioscience International*, https://www.cabi.org) qui fournit en ligne un guide des produits biologiques (et parfois faits maison) de protection, en français (https://bioprotectionportal.com), et des cours gratuits sur la lutte intégrée contre les ennemis des cultures : https://bioprotectionportal.com/courses-and-apps

9.10 Changement climatique, cultures et adiversité

Quelles prédictions peut-on faire à ce sujet ? La réponse des scientifiques est simple, nette et je vais l'argumenter : *on ne sait pas ce qui va se passer en ce qui concerne les bioagresseurs avec le changement climatiqu*e. Je me permets de souligner que cette réponse dit quelque chose de la recherche : elle sait reconnaître ses limites.

Partons de la situation, précédemment étudiée, de la courbe de dommages du blé d'hiver et de son puceron (*cf.* section 9.3.2). Comme le dit Tammers, en 1961 dans la dernière phrase de son article : « Des variations saisonnières sont généralement observées dans les réponses des cultures aux agressions ». Le problème, c'est que les saisons, elles-mêmes, vont changer ! Et le triangle de la maladie nous dit que le blé et le puceron et leur interaction vont changer !

La hausse moyenne des températures est censée avoir un effet d'accélération : le blé d'hiver risque d'avoir une croissance plus soutenue et les pucerons une reproduction plus importante ; il est difficile de dire qui va l'emporter. La synchronisation va aussi être modifiée, on sait que les organismes démarrent déjà plus tôt en saison

et opèrent sur une durée plus longue. Par exemple, certains pucerons ont huit jours d'avance par degrés supplémentaires en janvier-février (Sutherst et al., 2013). Les événements extrêmes de chaleur, plus nombreux, peuvent aussi avoir un effet différenciant, selon les températures respectives de stress des deux protagonistes. Des données historiques ont montré qu' il y avait, en période de réchauffement, un effet de déplacement des espèces vers le nord. Or, la vitesse de dispersion des bioagresseurs est souvent assez élevée. Il se peut qu'un nouveau ravageur, venant du sud, fasse son apparition, et dépourvu d'ennemis naturels sur place, supplante le puceron indigène. On a même observé des cas d'hybridation d'espèces proches, dus à ces nouvelles coexistences rendus possibles par les déplacements. Le moindre nombre de jours de gel peut avoir un effet ambivalent, car si les cultures ont moins de blessures par lesquelles les bioagresseurs trouvent une porte d'entrée, ces derniers seront peut-être plus nombreux à passer l'hiver.

L'incertitude redouble avec les précipitations, dont on sait qu'elles vont être localement modifiées, mais que les sécheresses et les inondations vont probablement augmenter. Un stress de sécheresse, couplé avec un autre de température, affaiblit les défenses des plantes... Mais, en même temps, cela peut réduire les risques d'agression par des pathogènes qui ont besoin d'humidité, comme les champignons. À l'inverse, les crues, et donc les engorgements, avantagent les champignons face à des plantes en situation d'hypoxie.

L'augmentation du dioxyde de carbone peut intensifier la production des plantes, et sans doute leur rapport C/N. Pour les herbivores, l'effet risque aussi de dépendre de quelle partie ils se nourrissent : les mangeurs de feuilles peuvent prospérer, alors que le renforcement probable de la lignine peut protéger la plante des infections des pathogènes.

Si tout cela n'était pas assez compliqué, il faut ajouter que le changement climatique n'est que l'un des changements globaux qui se présentent ! Le changement démographique est annoncé, avec une nécessité d'accroître la production, ce qui peut difficilement se concevoir si les pertes sont importantes, rendant alors le problème du contrôle des bioagresseurs primordial. On peut s'attendre à de nouvelles technologies génétiques modifiant la résistance des cultivars,

mais tiendront-elles leurs promesses ? Le pétrole doit avoir passé son pic de production, ce qui remet en cause, à la fois, le transport à l'échelle mondiale des productions alimentaires et le prix des inputs (carburant des machines agricoles et engrais chimiques, ce qui va modifier les prix des traitements[378]). Les cycles de l'azote et du phosphore ont été altérés. L'utilisation du sol se transforme aussi (artificialisation, déforestation, dégradation des surfaces arables...). *Ouf.*

Bref, les événements sont imprévisibles. Dès lors, que dire de la meilleure méthode de gestion des bioagresseurs ? La même chose. La seule prévision que l'on puisse, en fin de compte, avancer, c'est qu'il y aura beaucoup de travail pour la recherche agronomique.

9.11 Références

Al-Naseri, S. F. M., Godfrey, D., & Scott, E. (2014). The efficacy of milk for managing powdery mildew in horticultural crops. *Iraq Journal of Agriculture, 19*(2), 0-0.

Arora, R. K., Sharma, S., & Singh, B. P. (2014). Late blight disease of potato and its management. *Potato Journal, 41*(1).

Bajwa, U., & Sandhu, K. S. (2014). Effect of handling and processing on pesticide residues in food-a review. *Journal of Food Science and Technology, 51*, 201-220.

Barua, A., Williams, C. D., & Ross, J. L. (2021). A literature review of biological and bio-rational control strategies for slugs: current research and future prospects. *Insects, 12*(6), 541.

Barzman, M., Bàrberi, P., Birch, A. N. E., Boonekamp, P., Dachbrodt-Saaydeh, S., Graf, B., ... & Sattin, M. (2015). Eight principles of integrated pest management. *Agronomy for Sustainable Development, 35*, 1199-1215.

Benton, T. G., Vickery, J. A., & Wilson, J. D. (2003). Farmland biodiversity: is habitat heterogeneity the key?. *Trends in Ecology & Evolution, 18*(4), 182-188.

[378] Si l'on se cantonne simplement à nos développements sur le niveau économique des dommages, sans même parler de voir plus loin que le bout du champ...

Brandt, K., Leifert, C., Sanderson, R., & Seal, C. J. (2011). Agroecosystem management and nutritional quality of plant foods: the case of organic fruits and vegetables. *Critical Reviews in Plant Sciences, 30*(1-2), 177-197.

Bullock, D. G. (1992). Crop rotation. *Critical Reviews in Plant Sciences, 11*(4), 309-326.

Chollet, S., Brabant, C., Tessier, S., & Jung, V. (2018). From urban lawns to urban meadows: Reduction of mowing frequency increases plant taxonomic, functional and phylogenetic diversity. *Landscape and Urban Planning, 180*, 121-124

Colwell, R. K. (2009). Biodiversity: concepts, patterns, and measurement. *The Princeton Guide to Ecology*, *663*, 257-263.

Cooper, G. (2001). Must there be a balance of nature?. *Biology and Philosophy, 16*, 481-506.

Crawley, M. J., Johnston, A. E., Silvertown, J., Dodd, M., Mazancourt, C. D., Heard, M. S., ... & Edwards, G. R. (2005). Determinants of species richness in the Park Grass Experiment. *The American Naturalist, 165*(2), 179-192.

Dainese, M., Martin, E. A., Aizen, M. A., Albrecht, M., Bartomeus, I., Bommarco, R., ... & Steffan-Dewenter, I. (2019). A global synthesis reveals biodiversity-mediated benefits for crop production. *Science Advances, 5*(10), eaax0121.

Deguine, J. P., Aubertot, J. N., Flor, R. J., Lescourret, F., Wyckhuys, K. A., & Ratnadass, A. (2021). Integrated pest management: good intentions, hard realities. A review. *Agronomy for Sustainable Development, 41*(3), 38.

Deravel, J., Krier, F., & Jacques, P. (2014). Biopesticides, a complementary and alternative approach to the use of agrochemicals. A review. Biotechnologie, Agronomie, *Société et Environnement, 18(2)* 220-232.

Diz-Pita, É., & Otero-Espinar, M. V. (2021). Predator–prey models: A review of some recent advances. *Mathematics, 9*(15), 1783.

Douglas, M. R., & Tooker, J. F. (2012). Slug (Mollusca: Agriolimacidae, Arionidae) ecology and management in no-till field crops, with an emphasis on the mid-Atlantic region. *Journal of Integrated Pest Management, 3*(1), 1-9.

Dougoud, J., Toepfer, S., Bateman, M., & Jenner, W. H. (2019). Efficacy of homemade botanical insecticides based on traditional knowledge. A review. *Agronomy for Sustainable Development, 39*(4), 37.

Edwards, C. A., Arancon, N. Q., Vasko-Bennett, M., Little, B., & Askar, A. (2009). The relative toxicity of metaldehyde and iron phosphate-based molluscicides to earthworms. *Crop Protection, 28*(4), 289-294.

Fürstenberg-Hägg, J., Zagrobelny, M., & Bak, S. (2013). Plant defense against insect herbivores. *International Journal of Molecular Sciences, 14*(5), 10242-10297.

Gallai, N., Salles, J. M., Settele, J., & Vaissière, B. E. (2009). Economic valuation of the vulnerability of world agriculture confronted with pollinator decline. *Ecological Economics, 68*(3), 810-821.

Gaston, K. J., Smith, R. M., Thompson, K., & Warren, P. H. (2005). Urban domestic gardens (II): experimental tests of methods for increasing biodiversity. *Biodiversity & Conservation, 14*, 395-413.

Ginn, F. (2014). Sticky lives: slugs, detachment and more-than-human ethics in the garden. *Transactions of the Institute of British Geographers, 39*(4), 532-544.

Goodman, D. (1975). The theory of diversity-stability relationships in ecology. *The Quarterly Review of Biology, 50*(3), 237-266.

Green, R., & Shou, W. (2014). Modeling community population dynamics with the open-source language R. In *Engineering and Analyzing Multicellular Systems: Methods and Protocols*, p. 209-231.

Gröning, G., & Wolschke-Bulmahn, J. (2003). The native plant enthusiasm: Ecological panacea or xenophobia?. *Landscape Research, 28*(1), 75-88.

Hasken, K. H., & Poehling, H. M. (1995). Effects of different intensities of fertilisers and pesticides on aphids and aphid predators in winter wheat. *Agriculture, Ecosystems & Environment, 52*(1), 45-50.

Higley, L. G., & Pedigo, L. P. (1993). Economic injury level concepts and their use in sustaining environmental quality. *Agriculture, Ecosystems & Environment, 46*(1-4), 233-243.

Hill, S. B. (2004). Redesigning pest management: a social ecology approach. *Journal of Crop Improvement, 12*(1-2), 491-510.

Ibanez, F., Bang, W. Y., Lombardini, L., & Cisneros-Zevallos, L. (2019). Solving the controversy of healthier organic fruit: Leaf wounding triggers distant gene expression response of polyphenol biosynthesis in strawberry fruit (Fragaria x ananassa). *Scientific Reports, 9*(1), 19239.

IPBES (2019). Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services. Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.10413114

Knodel, J. J. (2017). Flea beetles (Phyllotreta spp.) and their management. In *Integrated management of insect pests on canola and other Brassica oilseed crops* (pp. 1-12). Wallingford UK: CABI.

Krupinsky, J. M., Bailey, K. L., McMullen, M. P., Gossen, B. D., & Turkington, T. K. (2002). Managing plant disease risk in diversified cropping systems. *Agronomy Journal, 94*(2), 198-209.

Larrieu, L., Paillet, Y., Winter, S., Bütler, R., Kraus, D., Krumm, F., ... & Vandekerkhove, K. (2018). Tree related microhabitats in temperate and Mediterranean European forests: A hierarchical typology for inventory standardization. *Ecological Indicators, 84*, 194-207.

Larsson, H. (2005). A crop loss model and economic thresholds for the grain aphid, Sitobion avenae (F.), in winter wheat in southern Sweden. *Crop Protection, 24*(5), 397-405.

Le Gall, M., & Tooker, J. F. (2017). Developing ecologically based pest management programs for terrestrial molluscs in field and forage crops. *Journal of Pest Science, 90*, 825-838.

Lerman, S. B., Contosta, A. R., Milam, J., & Bang, C. (2018). To mow or to mow less: Lawn mowing frequency affects bee abundance and diversity in suburban yards. *Biological Conservation, 221*, 160-174.

Li, Z., Costamagna, A. C., Beran, F., & You, M. (2024). Biology, ecology, and management of flea beetles in Brassica crops. *Annual Review of Entomology, 69*(1), 199-217.

Loram, A., Warren, P. H., & Gaston, K. J. (2008). Urban domestic gardens (XIV): the characteristics of gardens in five cities. *Environmental Management, 42*, 361-376.

Lucas, P. (2007). Le concept de la protection intégrée des cultures. *Innovations Agronomiques, 1*, 15-21.

Luka, H., Barloggio, G., & Pfiffner, L. (2016). Les bandes fleuries régulent les ravageurs des cultures maraîchères et favorisent la biodiversité. *Recherche Agronomique Suisse, 7*(6), 268-275.

Montgomery, I., Caruso, T., & Reid, N. (2020). Hedgerows as ecosystems: service delivery, management, and restoration. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 51*, 81-102.

Nascimento, F. D. A., Silva, D. D. M. E., Pedroso, T. M. A., Ramos, J. S. A., & Parise, M. R. (2022). Farmers exposed to pesticides have almost five times more DNA damage: a meta-analysis study. *Environmental Science and Pollution Research, 29*(1), 805-816.

Oerke, E. C. (2006). Crop losses to pests. *The Journal of Agricultural Science, 144*(1), 31-43.

Pathak, V. M., Verma, V. K., Rawat, B. S., Kaur, B., Babu, N., Sharma, A., ... & Cunill, J. M. (2022). Current status of pesticide effects on environment, human health and it's eco-friendly management as bioremediation: A comprehensive review. *Frontiers in Microbiology, 13*, 962619.

Pieterse, C. M., Poelman, E. H., Van Wees, S. C., & Dicke, M. (2013). Induced plant responses to microbes and insects. *Frontiers in Plant Science, 4*, 475.

Salisbury, A., Armitage, J., Bostock, H., Perry, J., Tatchell, M., & Thompson, K. (2015). EDITOR'S CHOICE: Enhancing gardens as habitats for flower-visiting aerial insects (pollinators): should we plant native or exotic species?. *Journal of Applied Ecology, 52*(5), 1156-1164.

Salisbury, A., Al-Beidh, S., Armitage, J., Bird, S., Bostock, H., Platoni, A., ... & Perry, J. (2017). Enhancing gardens as habitats for plant-associated invertebrates: should we plant native or exotic species?. *Biodiversity and Conservation, 26*(11), 2657-2673.

Santacruz, A., Toro P, M., & Salazar G, C. (2011). Slugs control methods (Deroceras sp. Müller) in lettuce and broccoli crops. *Agronomía Colombiana, 29*(2), 434-440.

Scholthof, K. B. G. (2007). The disease triangle: pathogens, the environment and society. *Nature Reviews Microbiology, 5*(2), 152-156.

Smith, R. M., Warren, P. H., Thompson, K., & Gaston, K. J. (2006). Urban domestic gardens (VI): environmental correlates of invertebrate species richness. *Biodiversity & Conservation, 15*, 2415-2438.

Stephenson, J. W. (1968). A review of the biology and ecology of slugs of agricultural importance. *Journal of Molluscan Studies, 38*(3), 169-178.

Sutherst, R. W., Constable, F., Finlay, K. J., Harrington, R., Luck, J., & Zalucki, M. P. (2011). Adapting to crop pest and pathogen risks under a changing climate. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 2*(2), 220-237.

Suzuki, N., Rivero, R. M., Shulaev, V., Blumwald, E., & Mittler, R. (2014). Abiotic and biotic stress combinations. *New Phytologist, 203*(1), 32-43.

Tammes, P. M. L. (1961). Studies of yield losses; II. Injury as a limiting factor of yield. *Tijdschrift over Plantenziekten*, *67*, 257-263.

Thompson K, Austin KC, Smith RM, Warren PH, Angold PG, Gaston KJ (2003) Urban domestic gardens (I): Putting small-scale plant diversity in context. *Journal of Vegetation Science 14*(1): 71–78.

Tremblay, É., Bélanger, A., Brosseau, M., & Boivin, G. (2008). Toxicity and sublethal effects of an insecticidal soap on Aphidius colemani (Hymenoptera: Braconidae). *Pest Management Science: Formerly Pesticide Science*, *64*(3), 249-254.

Vacante, V., & Bonsignore, C. P. (2018). Natural enemies and pest control. In *Handbook of pest management in organic farming* (p. 60-77). Wallingford UK: CAB International.

Vincent, C., Hallman, G., Panneton, B., & Fleurat-Lessard, F. (2003). Management of agricultural insects with physical control methods. *Annual Review of Entomology, 48*(1), 261-281.

Von Königslöw, V., Klein, A. M., Staab, M., & Pufal, G. (2019). Benchmarking nesting aids for cavity-nesting bees and wasps. *Biodiversity and Conservation*, *28*(14), 3831-3849.

Weintraub, P. G. (2009). Physical control: an important tool in pest management programs. In I. Ishaaya and A. Horowitz (Eds.), *Biorational Control of Arthropod Pests: Application and Resistance Management* (p. 317-324). Springer.

Zhao, J., Yang, Y., Zhang, K., Jeong, J., Zeng, Z., & Zang, H. (2020). Does crop rotation yield more in China? A meta-analysis. *Field Crops Research, 245*, 107659.

10 Espèces, cultivars et semences

Appeler un chat un... Felis catus !

10.1 Espèces

10.1.1 Qu'est-ce qu'une espèce ?

Une chose au moins est certaine : le concept d'espèce est extrêmement utile en biologie de l'évolution, en écologie et dans l'étude de la biodiversité ; car l'espèce est l'unité de base employée pour offrir une représentation organisée du monde vivant. Mais pour autant, cela ne nous dit rien de ce qu'est une espèce ! La tentative de définition la plus connue est celle du concept d'espèce biologique : une espèce est un groupe de populations inter-fertiles, présentant un mécanisme d'isolation reproductive, c'est-à-dire des propriétés biologiques de leurs individus empêchant la fusion avec d'autres populations. Il s'agit au fond « de prévenir la production d'un trop grand nombre de combinaisons génétiques incompatibles et dysharmonieuses (Mayr, 1996) ».

D'une part, il y a clairement des difficultés avec cette définition en ce qui concerne les organismes asexués ; d'autre part, si elle est assez opérationnelle au niveau local et à un moment donné, c'est moins le cas avec des zones géographiques plus larges ou des périodes de temps plus longues. Comment peut-on détecter, pour des populations géographiquement séparées, un mécanisme d'isolation reproductive qui reste alors forcément invisible ? On en revient à l'inférer, à partir de bases morphologiques, génétiques et comportementales, pour décider si nous avons affaire à une sous-espèce ou à une nouvelle espèce (ou même à un hybride, si une zone commune existe). De même, sur la longue durée, il est difficile de savoir si une espèce est restée elle-même, bien qu'un peu transformée, ou si elle a, en quelque sorte, pu devenir une nouvelle espèce. L'extraordinaire théorie de Darwin repose sur l'idée que la variation intraspécifique et interspécifique est plus un continuum dynamique que des frontières intangibles constituées de sauts qualitatifs.

En vérité, il semble qu'une définition unique et objective de ce qu'est une espèce n'ait pas été trouvée (Mallet, 2001), ce qui n'empêche que ce terme fait référence à un phénomène concret de la nature et que ce n'est pas une simple construction de l'esprit humain (Mayr, 1996).

10.1.2 Classifications des espèces

Botanique de supermarché

Les légumes ont quelque chose en commun : nous les mangeons. Une classification traditionnelle consiste à les catégoriser selon les parties que nous consommons, ce qui donne quelque chose comme : légume-feuille, légume-racine, légume-fruit et autres légumes. Cette méthode, un peu grossière, a été appelée ironiquement « botanique de supermarché » (Radovitch, 2018). Elle n'est pas sans raison : il y a, au sein de ces catégories, quelque ressemblance dans les pratiques culturales, et surtout, dans les pratiques de conservation. Cependant, cette typologie pose un problème d'ordre anatomique, car sont classées, dans les légumes-racines : de véritables racines (carotte), mais aussi des tubercules qui sont des tiges (pomme de terre), des bulbes qui sont des feuilles regroupées (oignon) et des hypocotyles (radis). Ces quatre catégories ont donc parfois été étendues, en leur ajoutant les légumes-graines, les légumes-tiges et les légumes-fleurs.

Cette classification est employée pour le calendrier lunaire biodynamique, mais aussi, plus utilement, pour organiser des rotations. Dans ce second cas, la pratique a un certain sens, car il se trouve que les véritables familles botaniques sont généralement incluses dans une seule de ces catégories ; en tournant d'un groupe à l'autre, nous allons donc effectivement changer de famille botanique, c'est-à-dire d'espèces partageant plus ou moins les mêmes bioagresseurs... et c'est là que réside la véritable raison de la réussite de ce type de rotation ! Mais, en dehors des bioagresseurs, les plantes d'une même famille partagent bien d'autres choses qui ne se retrouvent pas de façon homogène au sein de ces quatre catégories. Il vaut donc mieux en venir directement à la plus précise et plus scientifiquement fondée classification botanique.

Taxonomie botanique

Les organismes vivants sont tous différents, mais le niveau de ces différences varie considérablement. La taxonomie a pour objectif de classer les organismes en niveaux (emboîtés) de différences : deux pruniers se ressemblent plus entre eux qu'un prunier et une laitue.

Traditionnellement, les différences furent d'abord d'ordre morphologique ou anatomique, car plus facilement observables. Ainsi, le système sexuel du botaniste suédois Linné reposait sur les caractéristiques florales. L'inconvénient était le manque de « qualité prédictive » de tels regroupements : des plantes assez peu reliées pouvaient cependant se retrouver dans le même groupe.

La classification est ensuite devenue phénétique, c'est-à-dire basée sur des différences concernant de nombreux aspects simultanément, en espérant ainsi refléter mieux les relations entre les plantes.

Puis, à la suite de Darwin, s'est imposée l'idée que les regroupements devaient être phylogénétiques, fondés sur l'apparentement entre les plantes, et donc leur histoire évolutive (Haider, 2018). Des images de l'arbre du vivant sont alors apparues, pour nous, ici, limité aux plantes, qui serait peut-être mieux représenté en tant que corail des plantes[379] (Podani, 2020) ; une idée suggérée initialement par Darwin. Dans les années 1990, la révolution biomoléculaire a permis de juger des apparentements sur des proximités génétiques : les organismes se ressemblant ont en effet une plus grande part de leur ADN en commun, qui provient d'un ancêtre commun. Ces mesures génétiques viennent compléter les caractéristiques morphologiques, mais également cytologiques (*e.g.* nombre de chromosomes), physiologiques (*e.g.* type de photosynthèse), chimiques (*e.g.* présence de glucosinolates dans les choux) et écologiques (*e.g.* plante aquatique).

Sur la base de ces multiples types de différences, on repère un premier niveau de regroupement qui est l'espèce, c'est-à-dire les organismes qui ont le plus en commun sur le plan phénotypique et génotypique. Sur ce socle, les espèces les plus proches sont regroupées en genres. Les espèces d'un même genre sont encore suffisamment

[379] Lire l'article, en libre accès, avec deux figures magnifiques : https://pbsociety.org.pl/journals

proches pour que l'hybridation reste souvent possible[380]. Un genre est typifié par une espèce particulièrement représentative. Au-dessus, les genres les plus proches sont regroupés en familles ; l'un des genres servant alors à typifier la famille (*cf.* Figure 113).

Figure 113 : Une partie d'une planche de mon potager, où l'on peut apercevoir des choux Kale, des choux 'Noir de Toscane' (même espèce *Brassica oleracea* de la famille des brassicacées), de la moutarde (*Brassica juncea*, même genre), du pak-choï (*Brassica rapa* var. *chinensis*, même genre aussi) et des chicorées (autre famille botanique : les astéracées).

Pour le jardinier amateur, les niveaux de genre et de famille vont présenter un intérêt particulier, car ils regroupent, par construction, des plantes qui ont de nombreuses choses en commun ; et il est, d'une certaine façon, possible de prédire plusieurs caractéristiques d'une plante, sachant qu'elle appartient à une famille donnée, et plus encore à un genre. Illustrons ceci par deux exemples. Premièrement, la carotte et le persil appartiennent à une même famille qui portait autrefois le nom d'ombellifères (à présent, les apiacées), signifiant que leurs fleurs étaient disposées d'une façon caractéristique ; de surcroît, leurs fruits

[380] Très courant au potager dans le genre *Brassica*, par exemple.

ont la particularité d'être des diakènes ; enfin, leurs graines sont fort ressemblantes, et sur un plan pratique, elles présentent des difficultés de germination similaires. Deuxièmement, les bioagresseurs sont très souvent les mêmes pour une même famille : ainsi, dans celle des brassicacées (choux, dont choux chinois, roquette, radis, moutarde, navet), le filet anti-insectes est de rigueur pour se protéger des altises.

Pour reprendre notre classification botanique, au-dessus du niveau de famille, les regroupements continuent avec les ordres, les classes, les phyla (divisions) et les règnes. On s'intéressera peu à ces niveaux, moins opérationnels, cependant, il est bon de savoir que, dans le règne végétal[381], même si on compte douze phyla, on classe plus expéditivement les plantes dans un ordre évolutif, avec les mousses (plantes non-vasculaires), les fougères (plantes sans graines), les gymnospermes (plantes sans fleurs, comme les conifères) et les *abominablement mystérieuses*[382] angiospermes (plantes à fleurs). Nos légumes appartiennent à ce dernier phylum, qui se subdivise en la classe des monocotylédones (dont la graine ne contient qu'une seule feuille primordiale, qui apparaît dès l'émergence de la plantule, comme chez le poireau) et des dicotylédones (avec deux feuilles primordiales, comme chez le radis).

Les derniers éléments importants pour les botanistes sont, d'une part, d'avoir une description précise d'une espèce, dont on peut se faire une idée pour des légumes en tapant « laitue cultivée » dans l'outil : https://www.tela-botanica.org. Ceci dit, en apprendre un peu plus sur les mauvaises herbes nous intéresse tout autant ! D'autre part, il faut savoir reconnaître les plantes, entre autres[383], pour éviter de les

---

[381] En passant, je n'ai pas défini jusqu'ici ce qu'était une plante. Il s'agit d'un organisme photosynthétique dont les plastes proviennent originellement d'une symbiose entre un organisme eucaryote et une cyanobactérie.

[382] Une expression de Charles Darwin, du fait de leur diversification incroyablement rapide... à l'échelle évolutive...

[383] Mais aussi, scientifiquement, pour mesurer la biodiversité, entreprendre des actions de conservation, évaluer le caractère invasif d'espèces exotiques, découvrir de nouvelles espèces, et pour le semencier, créer des programmes d'amélioration basés sur des espèces proches.

confondre et de s'intoxiquer[384] ! Cette identification se fait soit par des clés de détermination et des flores sur papier, soit par des outils connectés de reconnaissance par image, comme https://plantnet.org. Les dernières avancées techniques laissent entrevoir la possibilité de créer des codes-barres pour les espèces (Hebert et al., 2003 ; Saddhe & Kumar, 2018). Ce code-barres serait basé sur un petit nombre de gènes permettant, après un rapide séquençage, une identification fiable. Il deviendrait alors possible d'identifier une plante à partir d'un simple fragment, quel que soit son stade de développement, d'améliorer la détection des nouvelles espèces et d'affiner la classification. Cette expertise d'identification, devenant à la portée de tous, autoriserait des opérations à grande échelle (*e.g.* détermination de la biodiversité).

Classification APG

En 1988, le Angiosperm Phylogeny Group (APG) proposa une nouvelle classification des plantes à fleurs, obtenue par consensus entre de nombreux taxonomistes. Cette initiative a permis de réorganiser les familles botaniques, à la lumière des résultats les plus récents, basés sur le séquençage d'ADN. Nous en sommes actuellement à la troisième révision (APG IV, 2016), où les changements se font plus rares ; on s'attend à ce que les prochaines révisions confirment cette stabilité. Aussi, cette classification fait de plus en plus autorité, et c'est celle que je suivrai, même si elle peut surprendre par certaines innovations (le genre *Allium* désormais dans la famille des Amaryllidacées et les chénopodiacées dorénavant incluses dans les amaranthacées).

Autres classifications

D'autres classifications des espèces s'avèrent néanmoins utiles au potager. Elles sont basées sur le cycle de vie des plantes (annuelles, bisannuelles et vivaces) ; la tolérance à la température (plantes rustiques ou pas, voire regroupement sur la base des températures cardinales) ; la lumière (plantes « de soleil » et « d'ombre » ; plantes de jours courts, longs et neutres) ; le type de photosynthèse (C3, C4 et

[384] Lire l'intéressante étude de l'ANSES, sur 1 872 cas correspondant à une confusion alimentaire entre plantes toxiques et plantes comestibles, disponible ici : https://hal.science

CAM) ; et enfin, comme nous le verrons dans une prochaine section, le mode de reproduction.

10.1.3 Nomenclature des espèces

Les espèces comestibles courantes ont généralement un nom, dit nom vernaculaire, en langue française. Toutefois, si on s'écarte de ces classiques légumes ou fruits, ce n'est pas toujours le cas : en particulier, des plantes nouvelles ont été (et sont encore) introduites, pour lesquelles un nom « français » n'existe pas encore. Les vagues d'immigration en France conduisent à l'importation de légumes, pas toujours cultivés sur place, mais que l'on peut cependant apercevoir dans des commerces exotiques, où ils sont souvent vendus sous leur nom d'origine. De la même façon, lorsque nous allons à l'étranger, nous pouvons faire bien des découvertes, et en ce qui me concerne, j'aime ramener des graines, par exemple de chicorées italiennes. Dès lors, une grande confusion de noms s'installe. L'article de Kays et Dias (1995), qui collectionne les noms de très nombreux légumes dans quinze langues, permet d'éclaircir un peu les choses. Mais le plus simple serait une dénomination internationale des espèces. Autre qu'anglaise... Cette solution existe : c'est le nom scientifique donné à chaque espèce.

Linné a proposé un système binominal[385] simple et efficace, qui a été depuis universellement adopté et qui est celui employé dans le « Code International de Nomenclature pour les Algues, les Champignons et les Plantes ». Une *sorte* de Latin est employé pour ces noms, qui sont écrits en italique. Le nom d'une espèce comprend d'abord le nom du genre auquel elle appartient (avec une majuscule), puis une épithète (sans majuscule) qui rend ce nom unique : ainsi *Lactuca sativa* est la laitue. Ces noms peuvent indiquer des caractéristiques de la plante (*Lactuca* signifiant que la plante contient un latex blanc et *sativa* qu'elle est une plante cultivée), mais ils peuvent également être un hommage à un botaniste célèbre ou une origine géographique. Les noms de famille botanique s'écrivent avec un suffixe en *-aece*, transposé en français en *-acées*. La laitue appartient à la famille des astéracées

[385] Il y a un troisième élément, pas toujours indiqué, qui est l'identité de la personne ayant la première donné le nom à l'espèce.

(asteraceae). Pour un recensement des espèces de plantes et de leur nom scientifique, on peut consulter : http://www.theplantlist.org

10.1.4 Les espèces cultivées

L'origine des espèces... cultivées

On estime le nombre d'espèces de plantes à fleurs entre 250 000 et 500 000 (Dirzo & Raven, 2003). Parmi ces espèces, certaines sont utilisées par l'homme, mais pas forcément cultivées : elles poussent spontanément et sont simplement cueillies. En France, il est encore possible d'ainsi cueillir des pissenlits, de la mâche ou du pourpier sauvage pour les consommer.

Cependant, la majorité de notre nourriture provient de la biodiversité cultivée : il y a environ 2 500 espèces qui ont fait l'objet d'une domestication, initiée vers 11 000 AP[386]. Outre l'alimentation[387], les plantes ont une grande diversité d'utilisation : tinctoriale, médicale, ornementale, monnaie d'échange, usage sacré, construction, fibre, carburant, huile, boisson, fourrage, cosmétique, poison... Une centaine d'entre elles contribuent à 90 % de l'alimentation humaine (en termes de calories) et les trois principales : le maïs, le riz et le blé, à 60 % (Prescott-Allen & Prescott-Allen, 1990).

Purugganan (2022) définit la domestication comme (1) un processus évolutif, (2) provenant d'une interaction mutualiste, (3) incluant la construction d'un environnement où est contrôlée la *fitness* (survie et reproduction) d'une espèce par une autre, (4) tel que le domesticateur recueille des ressources ou services fournis par le domestiqué, (5) apportant des bénéfices en fitness pour les deux partenaires et (6) ne préjugeant pas des espèces en jeu. Sur ce dernier point, il est important de souligner que l'être humain n'est pas le seul domesticateur : différents insectes ayant domestiqué des champignons.

---

[386] *Avant le Présent*, une forme de datation employée par les archéologues : ce présent étant arbitrairement fixé en 1950.

[387] Pour avoir un panorama des plantes comestibles, je suggère la lecture de Chauvet, M. (2018). *Encyclopédie des Plantes Alimentaires*. Éditions Belin/Humensis, Paris.

La domestication est bien un processus évolutif, qui a conduit à une divergence entre les plantes domestiquées et leurs ancêtres sauvages, comme nous le verrons. Mais ce processus doit être considéré comme une coévolution entre l'être humain et les plantes cultivées : *Homo sapiens* a également évolué ; par exemple, dans les populations consommant beaucoup de lait, des persistances du lactase chez l'adulte sont observées. Ce mutualisme a aussi bien fonctionné pour les plantes cultivées, car force est de constater, aujourd'hui, qu'une très grande partie de la surface de la Terre est occupée par des cultures (Purugganan & Fuller, 2009). La domestication a, en outre, des effets sur d'autres organismes en interaction avec les plantes, comme des bactéries symbiotiques ou des champignons mycorhiziens. Une étude montre ainsi qu'une litière de plantes domestiquées est plus rapidement décomposée qu'une litière de plantes sauvages, ce qui semble donc avoir des conséquences sur la rapidité des cycles de nutriments (Garcia-Palacios et al., 2013). La domestication a enfin eu un effet de sélection sur les mauvaises herbes qui se trouvent sur les terrains régulièrement perturbés par l'homme (Vaughan et al., 2007).

Sélection de domestication

Les pressions de sélection qui opèrent dans la domestication sont différentes de celles qui s'exercent dans la nature. Il y a, pour les plantes domestiquées, une sélection consciente par l'être humain, une sélection inconsciente (Zohari, 2004) due à un environnement particulier, le champ ou la serre, et des contraintes (*trade-off*) sur l'évolution possible d'un végétal (Milla et al., 2015).

Dans la sélection consciente, sont recherchées la perte de la toxicité et de l'amertume, le gigantisme de certains organes, la facilité de récolte, la maîtrise de la reproduction, l'élimination de défenses comme des épines... Contrairement à une idée reçue, cette sélection, effectuée par les paysans, n'a pas été forcément très efficace, particulièrement pour le rendement. C'est principalement à partir du développement des connaissances concernant la génétique (fin du dix-neuvième siècle) que l'amélioration consciente a eu des effets rapides et notables.

Dans la sélection inconsciente, dont l'effet est largement sous-estimé, les cultivateurs tentent par leurs pratiques culturales de modifier l'environnement de la plante, afin de lui éviter divers stress ;

que ce soit par l'irrigation, par le travail du sol, par les amendements, par le désherbage, par la lutte contre les bioagresseurs, et par la conservation et le semis des graines, ce qui leur épargne la nécessité de mettre en place divers mécanismes pour assurer la survie de leur descendance (dormance, enveloppe protectrice, dispersion). Tout cela construit de « nouvelles niches écologiques » : le champ et la serre (Martinez-Ainsworth & Tenaillon, 2016) ; dans ces environnements particuliers, la sélection naturelle continue de jouer à chaque cycle annuel de semis et récoltes. C'est un point très important : *les plantes domestiquées ne sont plus adaptées à un environnement naturel*, et par conséquent, envisager une agriculture où des légumes seraient cultivés sans intervention de l'homme ne peut que conduire à un échec. Je ne citerai qu'un exemple : des laitues transplantées dans une planche initialement désherbée, donc avec un mois d'avance sur les mauvaises herbes, conduisent à 40 % de perte de production sans désherbage supplémentaire ou paillage (da Riva et al., 2023). Alors on imagine ce qu'il peut advenir si leurs graines sont jetées dans une prairie[388]... Globalement, les plantes domestiquées sont devenues bien différentes de leurs ancêtres sauvages, ce qui est décrit par l'expression : syndrome de domestication. Certains en concluent, un peu vite, que les plantes cultivées sont, en quelque sorte, des plantes dégénérées, ayant perdu leurs défenses (épines, toxicité...). Pourtant, elles semblent par exemple loin d'être démunies contre les herbivores (Turcotte et al., 2014).

Je me permets de répéter et de souligner cette idée fondamentale : l'environnement naturel des légumes est le champ cultivé, et dans ce cadre, ils ont une remarquable fitness (Purugganan, 2022). S'en éloigner, comme par exemple dans l'agriculture « sans irrigation » (*rain fed agriculture*) ou dans la culture sur couverture végétale, demande *à revoir complètement les pratiques*. Un autre élément de différenciation entre les plantes domestiquées et leurs ancêtres sauvages est le contrôle du mode de reproduction par le domesticateur. Ce dernier choisit souvent la voie végétative : elle conduit, d'une part,

[388] On imaginera d'autant mieux en relisant la partie sur les interactions végétales où je commente une telle pratique avancée par Fukuoka.

à des populations de clones, plus faciles à gérer, mais aussi, d'autre part, à la perte de fertilité chez certaines espèces. Ainsi, les cultivars de patate douce ou d'ail ne produisent que rarement des fleurs, et si c'est le cas, elles s'avèrent stériles.

Des contraintes limitent enfin l'évolution domestiquée, certains traits sont liés : modifier un trait qui nous intéresse peut avoir un effet qui nous intéresse moins sur un autre trait. C'est pourquoi il va sans doute être difficile d'obtenir une variété de tomate économe en eau avec de gros fruits...

Poursuivant la domestication, la diversification se traduit par des changements à l'intérieur de la même espèce (c'est l'objet de la section suivante), changements qui sont parfois plus importants que ne l'était la diversité phénotypique de leur ancêtre ; ce que Darwin, lui-même, a souligné (Purugganan & Fuller, 2009). On peut prendre l'exemple de *Beta vulgaris* qui a donné la bette à couper (le limbe des feuilles nous intéresse), la bette à cardes (le pétiole nous intéresse) et la betterave (le « tubercule » nous intéresse). Au sein même de la betterave, une nouvelle diversité, en fonction du taux de sucre, de la taille de la plante (fourrage), de sa forme, de sa couleur nous attend... En comparant avec la bette maritime, sa probable ancêtre sauvage, la nouvelle diversité cultivée saute aux yeux. La diversification n'a été véritablement organisée qu'à partir du dix-neuvième siècle, avec les premiers sélectionneurs spécialisés, qui étaient en France les Vilmorin, Tézier, Clause, Truffaut, et au sortir de la Seconde Guerre mondiale : l'*Institut National de la Recherche Agronomique*.

On considère cependant que la diversification a globalement eu un effet de goulot d'étranglement (*bottleneck*) sur la diversité génétique des espèces : la perte est estimée à 10 % pour le riz et 80 % pour le maïs (Vaughan et al., 2007). Il y a, en résumé, une perte de diversité génétique due à la perte d'habitat pour les espèces sauvages, à l'intensification de l'agriculture portant sur certaines espèces, et au goulot d'étranglement. Le problème qui se pose est que cette biodiversité peut avoir, d'une part, une valeur en soi, et d'autre part, une utilité pour de futures améliorations.

La dispersion est le processus dans lequel les plantes sont cultivées hors de leur sphère d'origine et où, selon un plus ou moins grand

bonheur, elles sont acclimatées. En termes historiques[389], il y eut plusieurs vagues d'introduction. Dès l'Antiquité romaine, étaient cultivés des céréales, et bien entendu, des légumineuses (fève, lentille, pois chiche), mais aussi des navets, des raves, des carottes, des panais, des oignons, des poireaux, des asperges, des laitues, des chicorées, des arroches, des bettes, des choux et du cresson alénois. Plus exotique, on connaissait déjà les concombres, les melons et les gourdes (qui jouaient le rôle des courges). Au Moyen-âge, dans le sillage des huns et des invasions arabes, apparurent l'ail, l'aubergine et l'épinard. On trouve aussi, dans un document édicté par Charlemagne : le dolique et la roquette. À la Renaissance, arrivèrent des nouveautés italiennes (artichaut) ou les premières introductions du Nouveau Monde : patate douce, pomme de terre, poivron, maïs, haricot vert et tomate ; mais toutes sont loin d'être adoptées « sur le champ ». La période de l'absolutisme fut l'occasion d'autres acclimatations, comme celles du topinambour, de la baselle, de la tétragone, et vit le succès du céleri ou du petit pois frais. L'ère industrielle eut aussi son lot d'introductions, on en retiendra le rutabaga, la claytone de Cuba, la ficoïde glaciale, puis de nombreuses plantes asiatiques : choux pe-tsaï, chou pak-choï, radis daïkon et aussi le retour du fenouil.

On pourra se reporter à l'annexe « Familles botaniques des légumes cultivés au potager » pour plus de renseignements sur les espèces cultivées, leur nom scientifique et leur famille botanique. Les sites Internet de la *Société Nationale d'Horticulture* (https://www.snhf.org) et de la *Royal Horticultural Society* (https://www.rhs.org.uk) proposent des fiches détaillées décrivant la culture des principaux légumes.

Super-domestication

La domestication est un processus dynamique et en cours. Il y a des plantes qui ont été domestiquées, puis abandonnées ; des plantes domestiquées, mais de façon marginale géographiquement ; des populations mêlant la version sauvage et la version domestiquée ; des plantes en cours de domestication ; et des plantes qui vont être

[389] Pour une analyse plus approfondie, on peut consulter : Pitrat, M., & Foury, C. (2015). *Histoire des Légumes*. Éditions Quæ.

domestiquées ou créées (hybride interspécifique). La vitesse de domestication a augmenté au cours de l'histoire de l'agriculture, du fait d'une sélection plus consciente, de meilleures connaissances et de meilleures techniques agricoles, et des méthodes modernes d'amélioration des plantes.

La domestication initiale a employé la sélection massale. Grosso modo, on sélectionnait les individus les plus prometteurs, en vue d'améliorer la prochaine récolte. Cela a fonctionné, mais de manière très lente ; modifier la taille des graines des céréales a ainsi pris entre 500 et 2 000 ans, d'après Purugganan et Fuller (2009). Au cours du dix-neuvième siècle, des sélectionneurs sont parvenus (sans maîtriser la théorie) à élaborer plus rapidement, par des techniques généalogiques[390], des variétés améliorées. Puis, suivant les débuts de la génétique avec Gregor Mendel, des progrès très importants ont été constatés, avec des techniques d'hybridation, au début du vingtième siècle. Depuis les années 1980, une nouvelle phase commence, où la maîtrise des connaissances concernant la génétique et les outils d'ingénierie génétique ouvrent une ère de changements plus radicaux, et encore plus rapides : celle de la super-domestication. Il devient possible de transférer des gènes entre espèces, où une reproduction sexuelle n'est pas possible, ou d'envisager de modifier le type de photosynthèse des plantes.

> Du côté de chez Stéphane : La domestication est un processus récent et rapide dans l'histoire de l'évolution, mais plutôt lent à l'échelle humaine. D'autre part, la sélection massale opère à une échelle spatiale assez grande, on accole ainsi souvent le nom d'une région, voire d'une ville, à une variété de légumes. Mon *opinion* est donc que les tentatives de produire, soi-même, ses graines, à l'aide de quatre ou cinq porte-graines, de plus sans connaissances de la reproduction des plantes et de la génétique, ni techniques (respect des dates de maturité, séchage, évitement des maladies...), afin de les « adapter à ses conditions spécifiques », sont une

[390] Nous reparlerons en détail de ces techniques dans la section sur les cultivars.

belle preuve d'optimisme. Il y a un adage qui dit « Good seed doesn't cost, it pays! » (cité dans Vavrina, 1996). Il y a longtemps, dans les pays développés, que la production de semences est devenue une activité spécialisée, complètement séparée de la production légumière, et s'est même scindée en obtenteurs (ceux qui créent les variétés) et producteurs de semences (ceux qui les multiplient). Il n'en reste pas moins que c'est très amusant d'essayer, *pour l'expérience*, d'aller de la graine à la graine. Puis de recommencer.

Les espèces sous-utilisées

Seule une proportion des légumes que l'on trouve en supermarché peut être produite de façon satisfaisante en zone tempérée ; mais il y en a beaucoup d'autres qui ne sont pas dans les supermarchés et qui peuvent cependant être cultivés chez nous. Il s'avère que, sur le nombre de plantes déjà utilisées par les humains comme sources de nourriture, seul un tiers est véritablement cultivé. On parle d'espèces sous-utilisées (Padulosi et al., 2002), s'il est considéré qu'elles n'ont pas réalisé leur potentiel. Une plante peut avoir été, par le passé, cultivée en France, puis pratiquement abandonnée (comme le dolique, par exemple, à l'apparition du haricot américain) ; ou bien, ne pas être sortie de sa sphère géographique d'origine. Ainsi, on peut considérer, en France, que le maïs doux est une plante peu présente dans les potagers, alors que sa culture en amateur peut être largement plus développée dans des pays voisins, avec des subtilités qui nous échappent (les variétés pop-corn, les baby-maïs).

Les plantes sous-utilisées sont, d'abord, un enjeu pour les pays sous-développés. Là, elles peuvent contribuer à la sécurité alimentaire ; à équilibrer le panier alimentaire, avec des vitamines et minéraux indispensables ; à mettre en valeur des terres pauvres qui ne conviennent pas aux cultures classiques, trop exigeantes ; à fournir un petit apport de revenu ; et à préserver une identité culinaire et culturelle. Dans les pays développés, le panier alimentaire s'est également rétréci, avec la simplification de l'agriculture et la domination de quelques espèces. C'est aussi un moyen d'enrichir la cuisine ou de retrouver des saveurs oubliées. En temps de changement climatique, des espèces peuvent se révéler intéressantes. La diversité

végétale a un intérêt en soi, mais pour certains maraîchers ou semenciers, cela peut procurer un marché de niche ; et pour le jardinier amateur, procurer des sujets de curiosité.

Je vais prendre comme exemple le maceron (*Smyrnium olusatrum*), une culture que j'ai entreprise dans mon propre potager. Ce légume, déjà conseillé par Charlemagne (capitulaire de Villis) a peu à peu disparu des jardins, remplacé par le céleri. Le problème, avec ces légumes « originaux », est d'ordre agronomique, économique, génétique et culturel. Au point de vue agronomique, le savoir-faire traditionnel a été perdu, la recherche sur cette plante est lacunaire[391] et il est possible qu'elle ait été abandonnée pour un « manque de compétitivité ». Au point de vue culturel, il est clair que personne ne le connaît et que vous pouvez écrire dans votre moteur de recherche « maceron + recette » : vous obtiendrez alors beaucoup de renseignements sur le... macaron. Tout est bon dans le maceron (feuilles, racines), enfin, disons... tout est comestible ; je vais être franc comme Charlemagne, mais pour un palais du vingt et unième siècle, le goût est peut-être *un peu fort*. Au plan économique, la commercialisation reste donc à trouver ; des marchés de niche sont envisageables, mais la plante n'est pas des plus attractives visuellement. L'un des plus grands problèmes est peut-être d'ordre génétique : il va être difficile de se procurer des semences. Il n'y en a pas chez les semenciers classiques, il faut utiliser un circuit parallèle, avec des risques de qualité inégale. Seule l'espèce type est disponible, mais sans doute avec une grande variabilité des accessions. Or, on souhaiterait pourtant trouver un cultivar au goût atténué...

Il faut savoir qu'il existait, en 2002, six millions d'accessions disponibles dans les banques mondiales de gènes, destinées à l'agriculture et à la nourriture ; mais que la plupart sont celles des espèces les plus cultivées. Pour les espèces sous-utilisées, Pedulosi (2002) estime qu'il y aurait, en moyenne, huit accessions par espèce... et la variabilité génétique du maceron est sans doute en partie perdue.

---

[391] Pour un chercheur, c'est toujours risqué de travailler sur une plante rare : les fonds pour la recherche et les revues disposées à accepter des publications sont plus nombreux pour la pomme de terre (qui a d'ailleurs une revue dédiée : *Potato Research* !).

Même avec de la bonne volonté, tout reste donc à faire pour un semencier.

Tout reste à faire également pour le jardinier curieux, car le sujet n'est pas développé dans les ouvrages de jardinage grand public. Aussi, pour avoir des repères, on trouvera dans la partie « Cabinet de curiosités » de nombreuses plantes sous-utilisées (*cf.* Figure 114, pour quelques exemples), avec les renseignements scientifiques facilitant leur culture.

Figure 114 : À gauche le maceron, en haut la claytone de Cuba, en bas le cresson alénois, et à droite une petite chicorée amère de Castelfranco. Photographie prise le 28 janvier 2023 ; ces plants ont passé l'hiver sans protection.

10.2 Cultivars

10.2.1 Qu'est-ce qu'un cultivar ?

Les botanistes ont depuis longtemps admis la possibilité de distinguer des groupes de plantes à l'intérieur d'une espèce. Certaines populations isolées géographiquement ont acquis des caractéristiques particulières et sont reconnues en tant que sous-espèces. Même pour des populations observées dans la même région, des différences peuvent exister, elles sont alors plutôt appelées variétés (e.g. *Brassica oleracea*

var. *botrytis*, le chou-fleur versus *Brassica oleracea* var. *gemmifera*, le chou de Bruxelles). Enfin, à un niveau inférieur, la catégorie de forme est aussi évoquée pour des petits groupes d'individus.

Toutefois, ces distinctions botaniques reposent essentiellement sur des caractéristiques morphologiques et sont loin de correspondre à ce qui intéresse celui qui cultive des plantes. Premièrement, des variations mineures de forme peuvent avoir une importance : on pense immédiatement aux rosiers, mais dans le potager, le basilic est aussi fortement polymorphe (couleur, forme, goût). Deuxièmement, les caractéristiques agronomiques ne sont pas prises en compte par la botanique : précocité, rapidité, rusticité, résistance aux maladies ou à la montaison... Troisièmement, l'homogénéité du matériel est essentielle pour le jardinier et les plantes cultivées sont dorénavant souvent issues de quelques individus sélectionnés : il ne s'agit plus de véritables populations. Quatrièmement, cette uniformité est renforcée par les méthodes de propagation de l'horticulture, très couramment asexuées, donc générant des populations de plantes clones ; ou résultant de programmes garantissant un haut niveau de stabilité : les hybrides F1, par exemple. Cinquièmement, il existe des hybrides interspécifiques ou des plantes obtenues par transgénèse, qui ne « cadrent » plus avec les classifications botaniques.

Le concept de cultivar a été introduit par le « Code International de Nomenclature pour les Plantes Cultivées (CINPC) » en 1958. Il s'agit d'une catégorie de plantes, qui ne correspond pas aux taxons du code botanique : ce sont des plantes cultivées qui sont distinctes (d'autres plantes cultivées) ; homogènes, car en général, issues d'un petit nombre de plantes sélectionnées ayant des qualités intéressantes ; et stabilisées grâce à des moyens de reproduction spécifiques (Pringle, 1975). C'est une classification clairement anthropocentrée, avec des objectifs utilitaires. Elle peut concerner des arbres comme des annuelles herbacées ; des plantes obtenues et propagées par des techniques très différentes ; le terme peut même être employé au sujet de variétés-populations, plus hétérogènes et moins stables. Toutefois, il est à présent restreint aux cultivars inscrits au « Catalogue officiel français des espèces et variétés végétales ».

En ce qui concerne la nomenclature, le nom d'un cultivar comprend d'abord le nom du taxon botanique (espèce, voire genre) auquel il

appartient, suivi entre guillemets simples d'un nom portant des majuscules initiales, écrit en lettres romaines et en langage vernaculaire (pas de Latin) : *Brassica rapa* 'De Croissy' ou *Brassica oleracea* var. *capitata* 'Brady'. Notons que les innovations sont extrêmement nombreuses et que des groupes du CINPC s'assurent, d'une part, que deux cultivars ne portent pas le même nom, et d'autre part, qu'un cultivar ne porte pas plusieurs noms différents.

10.2.2 Qualités d'un cultivar

Quelles sont les qualités recherchées chez un cultivar ? Bien entendu, l'importance de la production ou sa rapidité (qui varient généralement en sens opposés), une bonne conservation et une apparence attractive ; mais aussi, de plus en plus souvent, une exigence portée par les consommateurs concernant les qualités nutritionnelles.

Afin de pouvoir couvrir l'ensemble de la saison, avec différents cultivars, sont attendues des qualités telles que : en saison froide, la précocité, la rusticité et un zéro de germination assez bas ; ou bien en saison chaude, la résistance aux fortes chaleurs et à la montaison.

Diverses résistances aux stress biotiques tels que les maladies, les herbivores et la compétitivité avec les mauvaises herbes sont fortement souhaitées, et plus encore en agriculture biologique, où il existe moins de moyens de lutte.

Se diriger vers une agriculture plus durable demande également de minimiser les intrants de fertilisation de synthèse ; il faut alors se reposer sur des amendements organiques. Des plantes avec des systèmes racinaires plus développés et avec plus de capacités pour établir des relations mutualistes avec la rhizosphère sont une solution (Tamilselvi & Arumugam, 2017) ; et ce, particulièrement dans les périodes de l'année où la minéralisation est retardée. L'efficacité de l'utilisation de l'eau est évidemment une autre propriété désirable. La plupart des cultivars ont été développés pour une agriculture conventionnelle, avec des intrants immédiatement disponibles et de l'irrigation ; d'autres systèmes de culture seraient probablement plus productifs avec des cultivars agronomiquement adaptés.

Avec le changement climatique, les stress biotiques et abiotiques vont également changer. Des cultivars performants dans ces nouvelles conditions sont une voie d'amélioration importante.

Quelles que soient les qualités que présente un cultivar, elles doivent le rendre clairement distinct (D) des autres cultivars ; homogène (H), c'est-à-dire que ces qualités se retrouvent chez tous les individus ; et stable (S), autrement dit avec un mode de reproduction qui permette de retrouver ces qualités d'une saison à l'autre. On parle de critères DHS.

10.2.3 Catalogue officiel

Qu'est-ce qui peut nous garantir que les qualités annoncées sont bien présentes dans le cultivar ? C'est à la demande des agriculteurs que les premières réglementations ont été instaurées dans les années 1920 (Masson et al., 2014). Depuis 1942, le catalogue officiel français et ses règles d'inscription sont du ressort du *Comité Technique Permanent de la Sélection des plantes cultivées*. L'inscription au catalogue français entraîne automatiquement celle au catalogue européen. Pour que des cultivars soient commercialisés, la règle générale est qu'ils soient inscrits au catalogue, après avoir été testés selon les critères DHS. Notons enfin que toutes les espèces ne sont pas concernées par le catalogue, il ne s'agit que des 36 espèces représentant les légumes les plus classiques (Santamaria & Signore, 2021 ; le lien vers le texte : https://eur-lex.europa.eu).

Les expertises sont réalisées par le *Groupe d'Étude et de contrôle des Variétés Et des Semences* (GEVES). Pour les plantes légumières, il existe pour l'heure quatre listes qui reflètent différents niveaux d'exigence, selon les utilisateurs visés : professionnels maraîchers, jardiniers amateurs, passionnés de conservation et de biodiversité. Les listes « a » et « b » sont plutôt destinées aux professionnels. Les deux plus récentes sont la liste « c » des variétés de conservation et la liste « d » des variétés « sans valeur intrinsèque pour la production ». Selon le catalogue, au 29 janvier 2023, sur les listes « a », « b », « c » et « d », étaient respectivement inscrits 2279, 201, 8 et 284 cultivars. On peut consulter le catalogue ici : https://www.geves.fr, ainsi que les fiches descriptives complètes des cultivars inscrits.

La lecture du catalogue officiel étant un peu aride, les catalogues commerciaux de semences indiquent généralement les qualités les plus saillantes des cultivars, en les accompagnant de photographies alléchantes. Il est dommage qu'il n'y ait pas, en France, de tests indépendants, afin de comparer les cultivars ; aux États-Unis surtout (*All-America Selection* winners : https://all-americaselections.org), et au Royaume-Uni (*Award of Garden Merit* : https://www.rhs.org.uk), existent des classements rigoureusement établis. Malheureusement, ces semences primées ne sont guère disponibles dans nos magasins de proximité. Reste Internet, si on n'est pas trop à cheval sur *Amazon*...

Il a été aussi mis sur pied un système de certification d'obtention végétale qui protège les droits intellectuels du sélectionneur. Il est délivré par l'*Instance Nationale des Obtentions Végétales* en France. On ne peut, en revanche, breveter du matériel végétal en Europe.

10.2.4 Reproduction des plantes

Si on souhaite produire ses propres graines, il est bien évidemment indispensable de connaître les processus de reproduction utilisés par les plantes potagères, ce qui permet de conserver l'identité du cultivar. Un autre intérêt est... d'éviter l'empoisonnement (*cf.* plus loin avec les courges). Nous allons également mieux comprendre comment les cultivars sont créés, car il me semble que de nombreux malentendus persistent à ce sujet.

Les plantes à fleurs ont, plus que d'autres organismes, une grande diversité de modes de reproduction. L'immobilité en est, en grande partie, responsable et les vecteurs de pollinisation ont entraîné des coévolutions et une diversité surprenante de formes et de structures de fleurs. Dans la nature, on peut parfois observer des différences de systèmes reproductifs chez des espèces proches, ou au sein de la même espèce, en particulier pour des populations isolées. Une constatation étonnante s'est récemment imposée : il y a aussi de la sélection sexuelle chez les plantes à fleurs, avec des compétitions entre mâles et choix des femelles (Barrett, 2010) !

Les plantes, par leurs nombreuses floraisons, peuvent multiplier les paternités et maternités. Chaque graine provient d'un gamète mâle et

d'un gamète femelle, ainsi, par exemple, les grains de maïs disposées sur un même épi vont quand même avoir des ADN différents.

Pour y mettre un peu d'ordre, nous allons distinguer quatre éléments : le type de reproduction, le type de fleur, le type de fécondation et le type de pollinisation ; un résumé est présenté dans la Figure 115.

Type de reproduction	végétative	asexuée	sexuée	sexuée	sexuée	sexuée
Type de fleur			Hermaphrodite cléistogame	Hermaphrodite sans auto-incompatibilité	Hermaphrodite avec incompatibilité ou fleurs mâles et femelles (monoécie)	Fleurs mâles et femelles (dioécie)
Type de fécondation		Apogamie	Autogamie totale	Autogamie forte	Allogamie forte	Allogamie totale
Exemple au potager						

Figure 115 : Modes de reproduction des plantes potagères.

La reproduction des plantes peut être non seulement sexuée, mais aussi végétative. Les plantes ont en effet une croissance « infinie », une organisation modulaire et chacune de leurs cellules est, en théorie, totipotente, c'est-à-dire qu'elle peut, au besoin, devenir cellule de racine, de tige, de feuille... La reproduction végétative peut avoir lieu par l'intermédiaire d'organes spécialisés (bulbe, tubercule, stolon, drageon...) ou non-spécialisés (par bouturage et marcottage spontanés). Dans tous ces cas, les nouvelles plantes sont des clones de la plante-mère. Pour garantir la préservation de qualités désirées chez un cultivar, le procédé de bouturage a été extrêmement développé par l'être humain, ainsi que la technique, non-présente dans la nature, de la greffe. Il est ainsi classique de bouturer la patate douce, voire même des gourmands de tomate. Un problème courant est que des maladies peuvent s'installer et être transmises au cours des « générations »,

comme c'est parfois le cas chez la pomme de terre[392]. Un cas tout à fait particulier de reproduction asexuée est l'apogamie : une graine est obtenue sans fécondation et les plantules sont identiques à la plante-mère ; c'est le cas, rare au potager, du pissenlit.

Au sein de la reproduction sexuée, il va falloir distinguer la fécondation croisée (allogamie) et l'autofécondation (autogamie). Des combinaisons sont possibles et on calcule ainsi des taux de fécondation croisée. Toutefois, il apparaît, en réalité, que les plantes sont soit fortement allogames, soit fortement autogames (Barrett, 2010). En considérant simultanément le type de fleurs, nous allons encore distinguer plusieurs possibilités. Premièrement, l'autogamie totale provient du fait que les fleurs qui sont hermaphrodites, de surcroît ne s'ouvrent pas (cléistogamie), et conséquemment, produisent des descendants fidèles à la plante-mère (pois, haricot), sauf en cas de mutations. Deuxièmement, il existe ensuite une autogamie forte, où les fleurs hermaphrodites ne présentent pas d'auto-incompatibilité, comme par exemple un décalage entre la maturité des organes mâles et femelles : les descendants sont donc, là encore, largement fidèles à la plante-mère (laitue). Notons, en passant, que l'autogamie n'est pas sans poser problème, à cause de ce qu'on appelle la dépression de consanguinité : un phénomène qui fait que l'autofécondation peut conduire à une descendance dégénérée ; mais les plantes autogames sont généralement parvenues à limiter ce problème. Elles présentent cependant parfois un syndrome d'autofécondation : leurs fleurs ont tendance à être plus petites et plus discrètes (voire même ne pas s'ouvrir). Plus n'est en effet besoin d'attirer le gogo pollinisateur en se parant de couleurs criardes, en portant un parfum enivrant et en payant sa tournée de nectar ! Troisièmement, lorsque des systèmes d'auto-incompatibilité sont mis en place chez des fleurs hermaphrodites, il peut y avoir alors une allogamie forte (chicorée amère, *Cichorium intybus*). Quatrièmement, les fleurs peuvent également être soit mâles soit femelles, ce qui va généralement conduire

[392] On utilise parfois des cultures *in-vitro* de cellules saines pour repartir du bon pied, ce qui a été le cas pour la 'Belle de Fontenay' : Perennec, P., Fauquet, C., & Fargette, D. (1988). La sanitation virale de la pomme de terre en France : techniques, organisation, réglementation de la production de plants.

également à une allogamie forte, même lorsqu'elles sont situées sur la même plante, qui est alors dite monoïque (*e.g.* courgette). Cinquièmement, l'autogamie peut devenir totale si les fleurs mâles et femelles sont sur des plantes distinctes, on les dit alors dioïques (6-7 % des plantes à fleurs), assez rares au potager, car ce sont souvent des plantes pérennes. On a quand même l'épinard, l'asperge ou... le cannabis.

Enfin, la pollinisation peut avoir lieu par différents vecteurs, des animaux (des insectes le plus souvent, des oiseaux, et même des chauves-souris) ou le vent (10 % des plantes à fleurs, et au potager : le maïs).

10.2.5 Théorème de Hardy-Weinberg

La forme la plus ancienne de cultivar est la variété-population. Il s'agit d'une population de plantes qui se reproduisent, saison après saison, par pollinisation naturelle, qu'elles soient autogames ou allogames. Une fois que cette population nous « convient », il est intéressant de savoir comment la conserver en l'état. De plus, ceci nous donnera des clés de compréhension pour son éventuelle « amélioration ».

Le théorème de Hardy-Weinberg montre qu'il est possible de conserver dans une population, de génération en génération, une stabilité allélique et génotypique en termes fréquentiels, sous cinq conditions.

La première est d'avoir affaire à une population de grande taille. Or, dans un potager, on en vient le plus souvent à ne garder que quelques porte-graines, pour des problèmes de surface et de quantité souhaitée. Il peut alors se produire un phénomène, dit de dérive génétique : les lois probabilistes ne permettent plus de conclure à la stabilité de la population, et au bout de peu de générations, les descendants sont bien différents de leurs ancêtres.

La deuxième condition est l'inexistence de migrations. Mais si plusieurs variétés de la même espèce sont cultivées, au même moment, dans notre potager ou dans le voisinage, la pollinisation peut causer de fortes déconvenues sur le résultat. L'exemple le plus problématique est, sans doute, celui des courges, où une fécondation non-intentionnelle

avec des variétés non-comestibles peut nous entraîner... à l'hôpital. Dans l'étude de Roux et al. (2018), sur 197 patients passés par des centres antipoison français, et pour lesquels on connaissait la provenance de la courge : 105 étaient fournies par le jardin familial !

La troisième condition est une fécondation aléatoire. C'est cependant l'exception pour les plantes autogames. Cela ne conduit pas forcément à une instabilité allélique, mais les génotypes deviennent, de génération en génération en génération, plus homozygotes et vont donc se reproduire à l'identique : on parle alors de lignée pure. Au final, on obtient une population de lignées pures qui ne se croisent plus, ce qui est typiquement le cas pour des haricots verts.

La quatrième condition est moins problématique, il s'agit de l'absence de mutations. Le nombre de mutations spontanées est considéré comme faible et le phénomène doit avoir peu d'impact. En fait, ces mutations sont délibérément augmentées dans certaines techniques d'amélioration.

Enfin, il doit y avoir absence de sélection naturelle, c'est-à-dire de génotypes susceptibles d'avoir une descendance plus importante que d'autres. Nous avons déjà vu que cette sélection pouvait être inconsciente et simplement provenir du *fait de cultiver*, et plus précisément du mode de culture.

Bref, la conservation, et *a contrario*, la sélection, réclament la connaissance et la maîtrise de nombreux paramètres.

10.2.6 Amélioration des plantes

Par le terme d'amélioration des plantes, il faut entendre que ces plantes vont posséder des qualités souhaitées par le cultivateur : il n'existe pas, *per se*, une plante meilleure qu'une autre.

Sélection massale

L'idée, sans doute vieille comme l'agriculture, est de récolter à part les individus qui semblent les plus intéressants dans une population, de les employer pour semer la génération suivante, puis de recommencer.

C'est une technique peu efficace pour les plantes autogames, et dès que la notion de lignée pure (voir section suivante) a été comprise, elle a été abandonnée. Pour les plantes allogames, elle permet de réaliser,

assez lentement, quelques progrès. En fait, la méthode est intéressante lorsque nous avons affaire à des caractères très héritables et qui dépendent peu du milieu, comme la précocité, la couleur ou la résistance aux maladies. En revanche, elle est bien moins valable lorsque nous recherchons des caractères complexes, dépendant de nombreux gènes, moins héritables et plus soumis au milieu, comme le rendement peut l'être. En effet, les plants peuvent avoir un fort rendement parce qu'ils ont effectivement un bon génotype, mais aussi parce qu'ils sont plantés dans une zone favorable. ; on sélectionne donc aussi des plants médiocres, mais qui ont été, par hasard, bien positionnés... ce qui rend les progrès peu rapides. D'autre part, les interactions entre gènes font qu'une sélection perçue comme intéressante par un cultivateur, toujours basée sur un trait phénotypique, va entraîner des désavantages pour d'autres traits moins visibles.

Si la sélection est trop forte, c'est-à-dire basée sur un nombre réduit de plantes-mères, le risque de dérive génétique augmente (ce que l'on peut rechercher !), mais surtout, il peut se produire chez les plantes allogames une dépression de consanguinité qui aboutit... à une perte de rendement. Il apparaît cependant que ce soit essentiellement la sélection inconsciente qui ait joué dans la sélection massale, ce qui explique que la méthode soit parvenue, au fil du temps, à créer des variétés-population locales très adaptées. J'ai déjà cité, dans le chapitre sur la température, les légumes lyonnais qui correspondent assez bien à mon potager, mais chaque région possède les siens.

Cette technique ancestrale a été améliorée, dès le dix-neuvième siècle, chez Vilmorin (et ailleurs). Primo, on commence à cette époque à *mesurer effectivement* le progrès accompli sur les caractères difficiles à appréhender, comme le rendement ; on ne le fait plus *à la grosse*. Secundo, on homogénéise les conditions de culture, afin d'évacuer le plus possible l'effet de l'environnement, pour ne plus observer que le seul effet du génotype. Tertio, on isole le champ, afin que des pollinisations croisées n'aient pas lieu avec d'autres populations. Quarto, on choisit pas mal de plantes pour éviter la dérive génétique et réduire les risques de consanguinité. Petit à petit, par sélection récurrente, c'est-à-dire en répétant la technique de sélection, ici massale, se crée une amélioration continue.

La sélection familiale est un autre perfectionnement. Il s'agit de sélectionner des plants-mères intéressants et d'en semer ensuite la descendance sur des zones séparées, par exemple sur une même ligne[393]. Les meilleures lignes seront alors sélectionnées, ou même les meilleurs plants sur les meilleures lignes, et une récurrence pourra alors être instaurée.

Mieux encore, le défaut de la méthode précédente réside dans le fait que la descendance subit une pollinisation croisée, et donc que les avantages des meilleurs plants-mères sont ainsi dilués. Il s'agit tout bonnement de revenir aux plants-mères que nous avons conservés, soit sous forme végétative, soit par autofécondation, soit en épargnant une partie des graines. Les plants-mères des meilleures lignes serviront donc aux futurs croisements. On parle de sélection sur demi-frères[394]. Là aussi, une récurrence peut s'installer.

Ces méthodes sont à présent moins employées, car les hybrides se sont largement imposés pour les plantes allogames (lorsque c'est possible). Une variation est cependant encore très utilisée : il s'agit des variétés synthétiques. La technique consiste, comme dans la sélection précédente, à choisir les meilleurs plants-mères (une dizaine) et de les laisser se croiser librement pendant deux ou trois générations. C'est toujours la même génération, par exemple la troisième, qui sera utilisée comme semences commerciales, ce qui évite de trop grandes dérives. On repart ainsi, chaque année, des mêmes plants-mères pour commercialiser, au bout de trois saisons, les plants de la bonne génération.

Lignées pures

Avec la famille Vilmorin, on assiste au dix-neuvième siècle à un renversement complet de la conception de la sélection. On ne va plus s'intéresser à sélectionner une population de bons parents et à en mélanger la descendance, mais on va, d'une part, choisir individuellement des plants, et d'autre part, s'intéresser séparément à

---

[393] Et le statisticien ajouterait que le mieux est de répéter aléatoirement de telles lignes, pour limiter les effets environnementaux !

[394] La sélection est basée sur les meilleures lignes qui sont des demi-frères, puisqu'ils proviennent du même plant-mère, mais sont de « pères » différents.

la performance de leur descendance. La technique est particulièrement adaptée aux plantes autogames. En effet, comme Johanssen (Roll-Hansen, 1989) l'a montré, une population autogame est concrètement un ensemble de lignées pures. Une lignée pure est une plante homozygote, c'est-à-dire que la plupart de ses gènes – et au moins ceux qui nous intéressent – portent deux allèles identiques. Dès lors, ces plantes vont produire, par autofécondation, une descendance homogène, stable et identique à la plante-mère. Pour prendre, comme Johanssen, l'exemple des haricots, il s'agit de sélectionner les plants prometteurs, puis de cultiver leur descendance, en gardant leur identité. Les meilleures descendances sont celles qui ont le meilleur génotype, car en moyenne, si l'expérience a été bien menée, les effets de l'environnement sont évacués. Et, fait très important, il est *inutile ensuite de resélectionner* cette meilleure variété, car sa descendance lui sera parfaitement fidèle[395].

Le revers de la médaille de cette stabilité, c'est qu'il ne peut plus y avoir de progrès sur cette lignée pure. C'est pourquoi, dès le 19e siècle, l'hybridation a constitué une stratégie d'amélioration des lignées pures autogames. Il s'agit de trouver deux parents aux qualités complémentaires et de forcer[396] leur croisement. À partir de là, on obtient une plante hybride dite F1 qui est homogène et hétérozygote. Ensuite, on laisse jouer l'autofécondation, pour récolter une génération F2 qui n'est plus homogène et mêle hétérozygotie et homozygotie. Il faut alors plusieurs générations d'autofécondation et de sélection pour réduire, de moitié à chaque fois, le taux d'hétérozygotie et fixer les caractères d'intérêt. Différentes variantes existent (sélection par *bulk*, par *single-seed-descent* ou haplodiploïdisation, je renvoie à Gallais, 2018, p. 126). Il est possible aussi de renforcer un caractère unique, mais complexe, comme le rendement. En partant de deux lignées pures, déjà performantes, on trouve, parmi les hybrides générés, quelques-uns d'entre eux qui s'avèrent plus performants que les deux ascendants.

---

[395] À tempérer toutefois, car les mutations et des pollinisations croisées, phénomènes de probabilité faible, finissent immanquablement par se produire. C'est pourquoi les générations sont surveillées et il est possible de repartir de semences de base pour retrouver la pureté originelle.

[396] Car elles sont autogames...

Un dernier élément important est que, pour développer de nouveaux cultivars, il faut au départ du matériel génétique diversifié, soit des cultivars déjà améliorés et homogènes, soit des variétés-populations hétérogènes, soit des accessions de cultivars anciens ou des plantes sauvages compatibles. C'est pourquoi une activité de conservation s'est développée chez les sélectionneurs, mais aussi dans des banques de gènes qui gardent, en tout cas pour les espèces comme le blé ou le maïs, des collections impressionnantes.

Avec les plantes allogames, ces techniques ont eu moins de succès. Contrairement aux plantes autogames, elles souffrent rapidement d'une dépression de consanguinité à la suite d'autofécondations successives. C'est pourquoi les méthodes de sélection sont différentes, plutôt basées sur des populations ou des hybrides particuliers.

Hybrides

On peut considérer, au moins en théorie, qu'une population de plantes allogames est un croisement entre lignées pures. Le principe de l'hybridation simple est, à partir de lignées pures obtenues par autofécondation, de déterminer le meilleur croisement. Cependant, cela n'est pas sans soulever quelques problèmes pratiques. Premièrement, les lignées pures de plantes allogames souffrent de dépression de consanguinité, le rendement baisse et les plantes sont moins fertiles. Une solution est d'employer des hybrides doubles (les deux parents sont des hybrides simples) ou des hybrides trois voies (un hybride simple croisé avec une lignée pure). Deuxièmement, il est nécessaire de créer une stérilité mâle pour être certain que les descendants sont bien hybrides. Sur le maïs, c'était facile de le faire manuellement, mais le plus souvent, il faut disposer d'une solution génétique, voire chimique. Troisièmement, la plante doit présenter un bon taux de multiplication pour la rentabilité de l'affaire, ce qui n'est pas le cas avec des espèces comme les pois ou les haricots[397].

Avec l'hybridation, on peut soit rechercher une complémentarité intéressante chez les parents, comme des résistances à diverses maladies, soit un fort effet sur le rendement chez les plantes allogames,

[397] Deux espèces qui ne sont pas allogames d'ailleurs !

effet qu'on appelle hétérosis. Chez les plantes autogames, l'effet d'hétérosis est faible, mais le croisement permet très rapidement d'obtenir des plantes avec des qualités complémentaires ; la tomate fait ainsi l'objet de nombreuses hybridations, l'un des ancêtres (1963) étant la 'Montfavet F1'. Bien entendu, la génération suivante (F2) ne garde ni les performances, ni l'homogénéité de la première.

L'homogénéité des nouveaux cultivars

Toute l'amélioration des plantes a finalement visé à créer des cultivars à la fois performants et homogènes, au point que beaucoup sont à présent constitués d'un unique génotype, comme dans les lignées pures, les hybrides F1 ou les clones de la reproduction végétative ; cela fait une grande différence avec les anciennes variétés-population, très hétérogènes. Ces cultivars homogènes sont bien adaptés à un milieu donné et y démontrent généralement des performances bien supérieures. Leur uniformité permet une standardisation de culture pour l'agriculteur et une standardisation du produit final pour le consommateur.

Un reproche souvent adressé à ces cultivars très « pointus » est qu'ils sont peut-être moins adaptables à des milieux différents que des variétés-population, plus « souples » ? Il s'avère en fait que les cultivars modernes semblent aussi capables d'une bonne adaptation à différents milieux. Une autre critique est la sensibilité aux pathogènes de telles populations, un risque surtout présent pour les cultures à grande échelle. Ce risque est réel, mais il est possible d'employer plusieurs variétés homogènes différentes, avec des capacités de résistance à différents pathogènes, pour se constituer une « assurance ».

On peut certes améliorer les variétés-population, mais le progrès est lent, même pour des caractères simples de résistance aux maladies ; et plus encore, pour des caractères complexes comme le rendement. Et en fait, *de toute variété-population, même améliorée, on peut toujours tirer des lignées pures ou des hybrides plus performants.*

Si les variétés-population sont reproductibles par l'agriculteur, il ne faut pas oublier que la chose n'est pas si facile (*cf.* théorème de Hardy-Weinberg) et que la qualité des semences n'est pas forcément au rendez-vous non plus. Mais il ne faut pas être naïf, les variétés hybrides

rapportent plus à l'obtenteur, puisque l'autoproduction de semences n'est plus possible. Cet argent supplémentaire, en partie attribué à la recherche, a probablement permis plus de progrès qu'avec des variétés-population améliorées, même certifiées. Comme le souligne Gallais (2018) : « le progrès génétique n'est pas gratuit, il faut bien que quelqu'un le paie ».

Biotechnologies

Les techniques d'ingénierie génétique ont démontré de multiples intérêts pour la santé humaine et animale, et leurs innovations sont fortement espérées. En ce qui concerne les végétaux, il semble, comme pourrait le dire Gregor Mendel, qu'il y ait « deux pois deux mesures », car les biotechnologies soulèvent alors de nombreuses résistances.

Ces biotechnologies ne sont pourtant pas une nouveauté, la mutagenèse a été, en effet, employée dès les années 1930. Il s'agit, soit chimiquement, soit à l'aide de radiations, de multiplier les mutations qui se produisent spontanément dans la nature ; ces techniques sont autorisées en Europe. La transgenèse a été développée depuis les années 1990 et permet de transférer, à l'aide de bactéries, des gènes d'un être vivant à un autre, ce dernier pouvant être d'une espèce différente. Bien entendu, cela réclame préalablement de connaître le génome de ces espèces, une entreprise qui n'est possible que depuis peu de temps. C'est dans ce cas qu'on commence à parler d'organismes génétiquement modifiés (OGM) et les premiers développements ont concerné le maïs, puis le coton. À la fin des années 2010, on a vu apparaître des techniques de modification génétique encore plus précises, dites d'édition du génome. En janvier 2024, les OGM ne pouvaient être cultivés ou consommés en Europe, du fait du principe de précaution.

Mais, en fait, sait-on ce qu'on risque ? L'Académie des sciences américaine s'est penchée sur 900 articles concernant l'emploi des OGM dans l'agriculture, et ses conclusions sont : qu'aucune preuve n'existe sur la dangerosité pour l'alimentation humaine ; que ces cultures ne présentent pas de risques supplémentaires pour l'environnement, par rapport aux cultures conventionnelles (et d'ailleurs nécessitent moins de pesticides) ; et que la production est plus importante et plus rentable pour l'agriculteur (NASEM, 2016). Une idée fixe est vite rattrapée par la réalité, et en janvier 2024, 37 prix Nobel et 1 500

scientifiques ont demandé à la Commission européenne d'assouplir la réglementation sur l'utilisation des nouvelles techniques génomiques (https://www.weplanet.org). Considérant les défis urgents qui se présentent, à savoir nourrir une population humaine grandissante, utiliser moins d'intrants pour protéger l'environnement et opérer dans un contexte de changement climatique, il paraît dès lors difficile de se priver, en plus, des atouts que semblent présenter des plantes performantes. Pour conclure sur le sujet, je conseille vivement la lecture d'un article, en libre accès[398], d'un chercheur éthiopien (Teferra, 2021) ; il est parfois bon de savoir que nos priorités de sécurité sont... situées.

Et pour l'agriculture biologique ?

Pour ce qui est de l'agriculture biologique, des progrès importants ont eu lieu en ce qui concerne la partie agronomique, mais la partie amélioration génétique a été pratiquement laissée de côté ; ce qui peut expliquer le manque de productivité observé par rapport à l'agriculture conventionnelle. Si des firmes commerciales ne s'intéressent pas forcément à ces petits marchés, il existe des techniques participatives d'amélioration de plantes, où des cultivars sont développés en partenariat entre des agriculteurs et des universités. Cette démarche a connu certains succès dans les pays en voie de développement.

10.3 Semences

« Before vegetables are harvested, before their growth and development, even before the seedling becomes photosynthetically competent, the source of the vegetable - the seed - holds major keys to final product yield » (Taylor, 2020).

Il existe plusieurs matériels de multiplication des plantes : tubercules, boutures... Mais cette partie sera uniquement consacrée aux graines. Si la qualité des graines de céréales, qui est à la fois le produit de la récolte présente et le potentiel de la récolte future, a été l'objet de la sélection variétale, c'est moins le cas pour les légumes, où il s'agit

[398] https://onlinelibrary.wiley.com

souvent d'un autre organe, exception faite des fabacées et du maïs doux (Brocklehurst, 1985).

10.3.1 Qu'est-ce qu'une graine ?

Chez les angiospermes, le grain de pollen est constitué d'une cellule qui donnera le tube pollinique et d'une cellule générative. Après la pollinisation, le tube pollinique se développe dans le style et contient trois noyaux : deux spermatiques provenant de la cellule générative et celui de la cellule-tube. L'un des noyaux spermatiques fusionne avec le noyau de la cellule-œuf, donnant le zygote qui deviendra l'embryon ; et l'autre noyau spermatique fusionne avec les deux noyaux polaires de l'ovule, pour donner une cellule triploïde qui deviendra, par la suite, l'endosperme. C'est ce qu'on appelle la double fécondation. Selon les espèces, l'endosperme se développe pour constituer l'organe de réserve de la graine ou ce rôle est assuré par les cotylédons. Les réserves sont constituées de protéines, de lipides et de glucides. Une fois l'embryon formé, les réserves constituées et le tégument (enveloppe assurant sa protection) terminé, la graine dite orthodoxe se déshydrate : c'est le cas des espèces potagères. Les graines récalcitrantes sont celles qui gardent une grande quantité d'eau, ce qui rend leur conservation problématique. Il y a une large variation de taille, de forme et de couleur de graines, y compris parfois au sein d'une même espèce (par exemple, les mâches à grosse graine et à petite graine). Nous avions évoqué, dans une partie précédente, le fait singulier que certaines graines ne sont pas produites par reproduction sexuelle : on parle d'apogamie.

La graine est ce qui permet à la plante d'évoluer par la reproduction sexuée, de se disperser et de survivre jusqu'à un moment favorable à sa germination. Ces éléments sont mis à profit par l'homme pour créer les semences.

10.3.2 Qu'est-ce que la qualité des graines ? Comment la mesurer ?

Un bon lot de graines produit, rapidement et de façon uniforme, des plantules conformes à ce qui nous intéresse et en bonne santé. Des tests, proposés par l'*International Seed Testing Association* (ISTA),

permettent de s'en assurer ; ces tests sont standardisés pour obtenir des résultats fiables et comparables.

Le test de pureté variétale sert à déterminer si les graines appartiennent bien à la variété recherchée. Les techniques vont de la simple observation de la couleur des graines à des tests biochimiques ou moléculaires, pour vérifier, par exemple, que des ♥GM ne se sont pas glissés dans le lot.

Le test de pureté pondérale consiste à estimer la présence d'autres espèces, qu'elles soient des mauvaises herbes ou d'autres cultures, ou de matériaux divers comme de la terre ou des débris de culture.

Les tests de germination se déroulent en conditions idéales. Pour chaque espèce, les substrats sont déterminés (*e.g.* sable humide, papier humide...), ainsi que la température (alternée ou constante), le nombre de graines testées et la durée de l'observation (jusqu'à 35 jours pour la fainéante tétragone...). Les procédures statistiques sont prédéfinies et le mode de compte-rendu également. Les traitements, parfois nécessaires pour lever la dormance, sont indiqués. En 2009, c'était plus de 320 espèces de grandes cultures et de légumes, qui voyaient ainsi leurs tests de germination standardisés par l'ISTA.

Pour les trois tests précédents, la Communauté européenne formule des exigences minimales concernant les espèces légumières principales. Pour l'oignon[399], par exemple, la pureté spécifique doit être supérieure à 97 % de la masse, la teneur maximale en graines d'autres espèces de plantes être inférieure à 0.5 % de la masse et la faculté germinative être supérieure à 70 % ; l'échantillon testé devant représenter plus de 25 grammes.

Les semences commercialisées en France doivent répondre à des exigences réglementaires. Pour les semences agricoles (céréales, betterave, pomme de terre, etc.), la certification des semences est obligatoire et comprend trois éléments : certification variétale, technique (*e.g.* taux de germination) et sanitaire. Pour les semences potagères, dites semences « standards », la certification n'est pas

[399] Règlement technique du contrôle des semences standard de légumes. Arrêté daté du 28 mai 2020 publié le 30 mai 2020 au Journal Officiel : https://info.agriculture.gouv.fr

obligatoire, mais il y a des contrôles aléatoires a posteriori, qui sont effectués par la *Direction de la Qualité et du Contrôle Officiel*.

Les tests de vigueur permettent de s'assurer du comportement au champ, dans des conditions plus difficiles que celles du test de germination ; ce qui nous intéresse pour le semis direct en particulier. Cette vigueur est essentiellement reliée au (non-) vieillissement du lot de semences. Sharma (2018) décrit ainsi le *cold test* qui vérifie la germination en condition de température froide et le *accelerated aging test*, faisant de même en condition chaude. Il est possible, par ailleurs, de regarder si les plantules peuvent percer un papier ou émerger au milieu du gravier ! Enfin, à partir de la taille atteinte par les plantules et leur masse sèche en quelques jours, différents indices de vigueur sont calculables.

Les tests sanitaires évitent qu'une graine soit contaminée dès sa naissance, par des bactéries, des champignons, des virus ou des ravageurs (*e.g.* bruche du pois, *Bruchus pisi* L) ; ce problème pourrait, en effet, s'étendre d'autant plus rapidement. Des traitements sont alors parfois entrepris.

La teneur en eau de la graine est également importante, elle a une incidence sur sa capacité de conservation.

10.3.3 Facteurs influençant la qualité des graines

Tout au long de la vie de la graine, divers facteurs vont en influencer la qualité finale. Le génotype de la graine, même s'il est parfois difficile à distinguer de l'effet du milieu, joue un rôle, par exemple, sur le zéro de germination. Le mode de production de la semence peut également avoir un impact, comme dans le cas de la vigueur hybride et leur uniformité de germination.

Les conditions environnementales au champ ont un effet ; les graines sont plutôt produites dans des régions au climat chaud et sec. La température pendant le développement peut avoir une influence. Ainsi, la photodormance des graines de laitue est nettement moins élevée si les graines ont été produites alors que la température était élevée (Brocklehurst, 1985).

Les graines (et avant les fleurs) ne se développent pas toujours en même temps sur la plante, et la qualité s'en ressent si toutes sont

récoltées au même moment. Ainsi, pour la carotte, espèce à la germination particulièrement délicate, car son embryon n'est pas complètement développé, l'ombelle du méristème apical devance les autres ombelles d'une à deux semaines ; la différence de performance est d'autant plus prononcée que les graines sont récoltées tôt. La position sur la plante joue donc un rôle, de même que le timing de récolte. Plus la carotte est prélevée tard, plus l'embryon est développé, et donc la germination facile.

Les opérations de récolte peuvent entraîner des dommages, selon le niveau d'humidité de la graine. Il a ainsi été démontré, pour le petit pois et d'autres graines de grosse taille, qu'un niveau d'humidité moyen permettait de limiter les détériorations de l'enveloppe.

Après la récolte, les opérations de séchage sont très importantes, car la teneur en eau de la graine est un facteur essentiel de sa bonne conservation. Les graines sont hygroscopiques : elles échangent de l'eau avec l'atmosphère jusqu'à un point d'équilibre dépendant de l'humidité et de la température de l'air. Cette teneur en eau à l'équilibre a été modélisée par Cromarty et al. (1982 ; équation 3.5) :

$$MCe = (1 - Do) \times \frac{\sqrt{-440 \times ln(1 - RH)}}{1.1 + \frac{T}{90}}$$

avec MCe qui est la teneur en eau à l'équilibre (en % ; base sèche), Do la teneur en huile de la graine (en écriture décimale et pas en % ; base sèche), RH l'humidité relative (en écriture décimale et pas en %) et T la température ambiante (°C).

Pour faire court, plus le taux d'humidité relative baisse et plus l'air ambiant est chaud, plus basse est la teneur en eau, donc le séchage efficace. On voit aussi que la teneur en huile de la plante joue un rôle, une teneur élevée[400] entraînant un meilleur séchage. La Figure 116 montre, pour une température de 20 °C, l'effet de l'humidité relative

[400] Ce qui est généralement le cas des espèces à petites graines, qui stockent leurs réserves sous cette forme, contrairement aux espèces à grosses graines qui utilisent plutôt l'amidon.

de l'atmosphère sur la teneur en eau de l'oignon (Do=0.190) et du petit pois (Do=0.012).

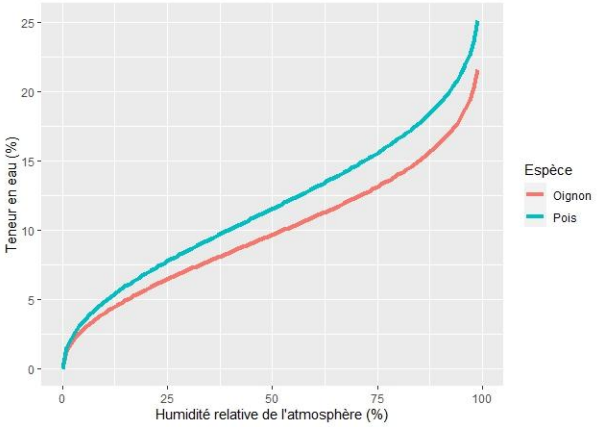


Figure 116 : Teneur en eau (% de la masse fraîche) de graines d'oignon (Do=0.190) et de pois (Do=0.012), séchées à une température de 20 °C, en fonction de l'humidité relative de l'air ambiant.

Diverses opérations sur les graines jouent sur leur qualité, comme le tri des résidus, des traitements sanitaires pour éliminer maladies et ravageurs. Des techniques de préparation sont parfois employées pour lever la dormance de la graine à l'aide de régulateurs ou pour augmenter sa vigueur par utilisation de solutions osmotiques (*priming* en anglais). Le plus simple des primings est une technique bien connue : le trempage préalable des graines (sur lequel nous reviendrons). Il existe également des techniques d'enrobage de la graine qui, d'une part, facilitent la précision des semis, et d'autre part, permettent d'ajouter des ingrédients actifs, soit pour la protéger des agresseurs, soit pour lui offrir un « bon départ ».

Pour finir, la taille des graines affecte la faculté germinative, la vitesse de germination, la vigueur des plantules, et au final, la production, pour de nombreuses espèces (Ambika et al., 2014). Les grosses graines supportent également mieux les conditions de stress et montrent des facultés plus élevées à émerger à une plus grande profondeur de semis. L'explication généralement donnée à leur supériorité est la plus grande disposition de réserves, permettant d'aider l'embryon à ses débuts.

10.3.4 Est-ce que les semences AB c'est assez bien ?

Une des obligations de l'agriculture biologique est d'employer, sauf dérogation pour indisponibilité, des graines certifiées AB. Le jardinier amateur soucieux de l'environnement peut donc y songer, mais quelles différences observe-t-on avec les graines conventionnelles ?

Divers chercheurs ont produit des graines eux-mêmes, selon les deux systèmes. Gindri et al. (2017) comparent de nombreuses variétés de haricot et ne trouvent pas de différences consistantes entre les deux systèmes. En revanche, Kalapchieva (2013), sur les pois, a montré un taux de germination inférieur des graines produites biologiquement, ainsi qu'un plus grand nombre de graines de petit calibre, et également des attaques de bruches beaucoup plus nombreuses.

Concernant des graines biologiques et conventionnelles de semenciers professionnels, Orzeszko-Rywka et al. (2018) ont effectué une comparaison sur laitue, épinard, betterave et concombre. Ils trouvent, du côté des graines conventionnelles, que le poids de mille graines est globalement plus élevé (sauf laitue), que les impuretés sont plus rares (laitue), que les graines abîmées s'avèrent moins nombreuses (concombre), que les taux de germination au laboratoire et au champ sont plus élevés et que la germination est plus rapide (sauf épinard) et plus uniforme (sauf épinard). Le prix au poids est, en outre, de 1.8 à 3.5 fois moins élevé. Les auteurs soulignent enfin le manque de variétés AB possédant des qualités de résistance à diverses maladies.

Merfield (2012) confirme que le nombre d'espèces et de cultivars avec des semences biologiques augmente, mais est encore faible (d'où les systèmes de dérogation). La production de cultivars destinés à l'agriculture biologique est une tâche complexe : à côté des exigences usuelles de productivité et d'apparence, s'ajoute la nécessité d'une adaptation à la fertilisation organique et d'une meilleure résistance aux maladies et ravageurs.

De Groot et al. (2004) ajoutent qu'il est plus complexe de recueillir des graines saines en agriculture biologique, du fait de pesticides moins efficaces, particulièrement pour des plantes bisannuelles qui sont exposées pendant deux saisons aux risques. De plus, les traitements autorisés sur ces graines sont plus rares. On voit, malgré tout, apparaître des propositions intéressantes de traitements à l'eau chaude,

d'utilisation d'huile essentielle de thym ou d'acide ascorbique... qu'il va falloir inclure dans la réglementation AB. Il est souligné que les cultivars pour l'agriculture biologique devraient présenter encore plus de vigueur que les autres, en particulier pour prendre de l'avance sur les mauvaises herbes : le gros problème de l'agriculture biologique, au printemps lorsque la minéralisation est faible. Il faudrait donc des méthodes de tri encore plus efficaces pour ne proposer que des graines très performantes. Enfin, les auteurs confirment que les prix peuvent être trois fois plus élevés.

Sur ce dernier point, pour en avoir le cœur net, j'ai pris une culture très répandue : la laitue feuille de chêne blonde ; et le 5 février 2024, j'ai comparé les prix sur différents sites Internet. Il est bien connu que les magasins Lidl ont une offre imbattable : 15 centimes pour un gramme de telles graines. On peut ne pas aimer la grande distribution, et dans ce cas, trois semenciers français (petites entreprises de moins de 50 salariés) proposent des semences conventionnelles à 30, 49 et 125 centimes le gramme. Enfin, trois semenciers français en AB les vendent à 140, 340 et 815 centimes le gramme. La conclusion est que les modèles économiques sont différents. Et que certains modèles sont plus différents que d'autres...

10.3.5 Conservation des graines

Une fois la graine parvenue à maturité, sa détérioration commence. Nous ne pouvons que la retarder. Ainsi, avec le temps, une graine passe successivement par un stade de perte de vigueur (germination plus lente et difficile en conditions extrêmes), à des anormalités, puis à l'absence de signe de croissance en dehors de la graine (qui conserve une activité interne) jusqu'à... plus rien. Les longévités extrêmes de milliers d'années sont controversées, en revanche, certaines de l'ordre d'une ou deux centaines d'années sont avérées. Les techniques de conservation les plus intéressantes semblent être celles aux températures largement inférieures à 0 °C (Roos, 1986), utilisées dans les banques de conservation de semences.

Pour le jardinier amateur, les éléments principaux qui jouent sur la conservation de la graine sont l'espèce et les conditions de la conservation, en premier lieu la température et l'humidité.

En ce qui concerne l'effet de l'espèce, l'étude de Priestley et al. (1985) estime le temps moyen, en années, pour baisser à 50 % le taux de germination, avec un stockage à l'air libre en zone tempérée. L'annexe « Longévité des graines » présente ces éléments. Les espèces à problèmes sont souvent des apiacées et des astéracées.

Toutefois, l'effet des conditions de stockage est plus important. Il est depuis longtemps connu qu'il doit avoir lieu à basse température et faible humidité. La première règle pratique est que la somme de la température (en °F) et du taux d'humidité relative (en %) doit être inférieure à 100. La deuxième règle pratique est proposée par Harrington (1959) : (1) pour chaque 1 % supplémentaire de teneur en eau de la graine, sa durée de vie est divisée par deux, et (2) pour chaque augmentation de 5 °C de la température, c'est la même chose ; les deux facteurs jouant indépendamment. La méthode la plus précise nous est fournie par le modèle d'Ellis et Roberts (1980) :

$$v = \phi^{-1}(K_i - \frac{p}{\sigma}) \text{ avec } \sigma = 10^{K_E - C_W log_{10}(m) - 0.0307t - 0.000501t^2}$$

où v est la faculté germinative au bout de p jours, K_i le taux initial de germination du lot de semences[401], t la température de conservation (°C), K_E et C_W des paramètres constants, propres à l'espèce (que l'on trouve dans la littérature, suite à des expériences) et m la teneur en eau de la graine. $\phi()$ est la fonction de répartition de la loi normale centrée réduite. La Figure 117 montre, pour l'oignon et le pois, la longévité de graines laissées à l'air libre[402], à une température de 10 °C et une humidité relative de 75 %, en partant d'un taux initial de germination commun de 85 %. On voit que les graines d'oignon, au bout d'un an, approchent 50 % de germination, alors que les graines de pois résistent bien mieux. La conclusion est qu'il faut les stocker dans de meilleures conditions.

---

[401] Transformé à l'échelle probit.

[402] Les valeurs de température et d'humidité utilisées sont les valeurs moyennes sur 15 ans dans ma région.

Quelles sont les propositions de l'*International Board for Plant Genetic Resources* pour la conservation des graines orthodoxes (Cromarty et al., 1982) ? Pour la conservation longue des collections de base, la graine est séchée jusqu'à une teneur en eau de 5 %, puis elle est enfermée dans un contenant étanche, afin qu'elle reste à cette teneur de 5 %, et le contenant est maintenu à une température de -18 °C. Pour la conservation de moyenne durée des collections actives, celles pour lesquelles les banques de gènes sont sollicitées régulièrement pour des programmes d'amélioration, la graine est séchée de la même façon, puis elle est laissée dans des contenants ouverts qui sont maintenus à une température entre 0 °C et 10 °C, avec un taux d'humidité maîtrisé[403], autour de 15 %.

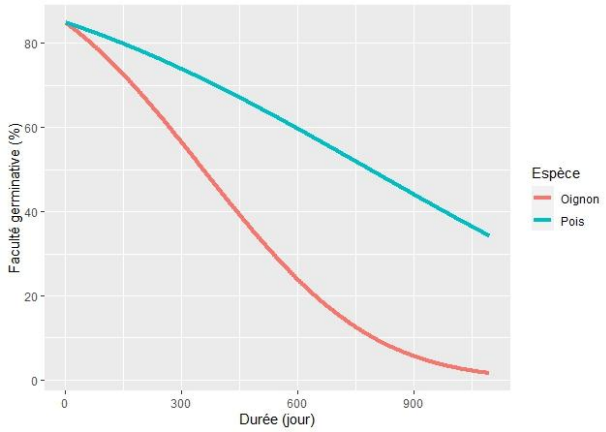


Figure 117 : Modélisation de la longévité de graines d'oignon et de pois laissées à l'air libre (RH=75 % et t=10 °C) pendant trois ans. Pourcentages initiaux de germination identiques à 85 %.

Pour le jardinier amateur, les semences commerciales nous arrivent, sauf exception, dans un très bon état de conservation, avec une teneur en eau faible et dans un packaging étanche. Il convient simplement de les conserver à basse température. Dès que nous déchirons le sachet hermétique, les vrais problèmes vont commencer... Soit nous en épargnons immédiatement une partie dans un nouveau contenant étanche, allant au congélateur ; soit nous employons un contenant

[403] Sinon, la teneur en eau de la graine va vers un nouvel équilibre, plus élevé.

étanche[404], remisé dans un endroit frais ; soit nous achetons les graines à plusieurs et nous les partageons pour ne pas avoir à les conserver plus d'une année[405].

Avec des graines un peu plus âgées, il ne reste qu'à semer plus dru. Toutefois, il faut être conscient du fait que le taux de germination ne sera pas le seul problème : les plants auront moins de vigueur et seront de moins bonne qualité.

10.3.6 Semis des graines

Cela semble facile de semer... mais pour le faire correctement, il vaut mieux répondre aux trois questions suivantes : Peut-on « préparer » la graine ? À quelle profondeur la déposer ? Et existe-t-il une position meilleure qu'une autre ?

Trempage des graines

Harris (2006), dans un article sur les problèmes de fermiers pauvres dans les pays sous-développés, confrontés à des conditions climatiques et pédologiques difficiles, fait le point sur la technique de trempage préalable des graines. S'il existe des techniques très sophistiquées de préparation dans divers liquides ou autres substances, la technique à la portée du jardinier amateur est le simple trempage des graines dans de l'eau, avec séchage éventuel (à l'air libre) avant semis ; un court séchage permettant simplement d'éviter que les graines ne collent aux doigts... Le point délicat est de définir une durée qui permette d'employer cette technique en toute sécurité : un trempage trop long pouvant entraîner des dommages pour la graine et la plantule. Sur un très grand nombre de cultures tropicales, mais également sur le maïs, sur le pois chiche et sur les lentilles qui nous intéressent plus directement, cette durée idéale semble être d'une nuit, soit entre 8 et 12 heures ; pour le maïs, une durée un peu plus longue de 16 à 18 heures est optimale ; et 24 heures pour des tomates[406] (Sabongari &

---

[404] En glissant du gel de silice à l'intérieur, en cas de doute...

[405] Un sachet de 1 gramme de graines de laitue contient environ 1 000 graines, ce qui peut représenter beaucoup de salades d'un même cultivar, au bout du compte, pour un particulier.

[406] Qu'on sème rarement en plein champ, il est vrai...

Aliero, 2004). Globalement, on observe une vitesse de germination plus élevée, une vitesse de levée plus grande, des plantules plus vigoureuses, parfois moins d'attaques de ravageurs et de maladies[407], et au bout du compte, une production plus élevée dans la très grande majorité des cas. Le semis sans trempage donne rarement des résultats équivalents, et très rarement des résultats supérieurs. Le trempage est donc une bonne assurance, à moindre coût. Notons que les résultats semblent encore meilleurs si on ne fait pas sécher les graines entre-temps et si on les sème directement après le trempage. Bien entendu, les conditions de température (et les possibilités d'irrigation) sont différentes sous nos latitudes, toutefois, pour des semis d'été dans un contexte de réchauffement climatique... Soltani et Soltani (2015) montrent, dans une méta-analyse, l'intérêt général de cette méthode et préconisent, eux aussi, une durée de 12 heures.

Une exception a été indiquée par Kidd et West (1918), il s'agit du haricot (*Phaseolus vulgaris*) ; alors que paradoxalement la fève bénéficie de ce traitement, et plus encore avec une durée de trempage plus longue (jusqu'à trois jours !).

Profondeur de semis

La profondeur d'enfouissement des graines a un effet sur leur pourcentage d'émergence, leur vitesse d'émergence et souvent, par là même, la production. Wagenvoort et Bierhuizen (1977) remarquent, en effet, sur huit légumes testés, que la profondeur possible est inversement reliée au poids de mille graines[408] (PMG, qui est une *masse* et pas un poids...). Pas d'inquiétude, il existe tout de même une plage de variation conservant de bonnes qualités de germination pour chaque espèce. Nous allons reprendre cette idée dans la Figure 118, où la profondeur d'enfouissement conseillée pour quelques espèces, bien testée dans le secteur de la production de plants (Vavrina, 2011), est reliée à leur PMG. Les informations concernant le PMG sont tirées de la *Seed Information Database*. Il est assez net que nous avons trois

[407] L'auteur suggère que le stress anaérobie du trempage peut entraîner une réaction de résistance par la suite.

[408] Ils notent, en outre, que l'émergence est moins bonne si la température est plus basse, et qu'il faut peut-être moins enfoncer les semences dans ce cas.

groupes : les petites graines avec un PMG inférieur à un gramme, les grosses graines avec un PMG supérieur à 10 grammes et les graines intermédiaires.

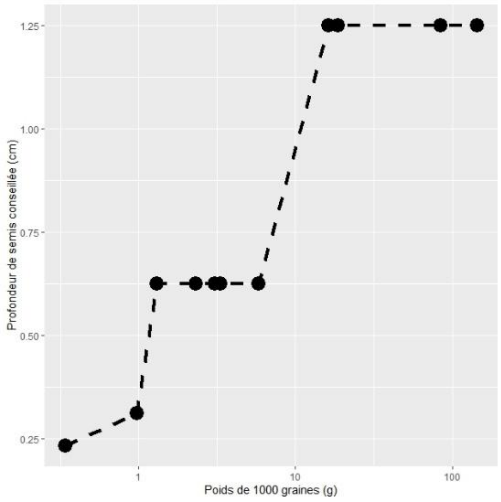


Figure 118 : Relation entre poids de mille graines (échelle logarithmique) et profondeur de semis conseillée dans Vavrina (2011).

La Figure 119 présente les PMG de nombreuses espèces, avec les trois groupes définis bien visibles. Les petites graines (apiacées, astéracées) doivent être placées pratiquement à la surface du sol, surtout pour celles qui ont besoin de lumière afin de lever leur dormance, comme la laitue ou le céleri. Les alliacées, solanacées et brassicacées demandent une profondeur de l'ordre de 1 centimètre ; les amaranthacées, légèrement plus. En revanche, les graines de cucurbitacées peuvent être plus enfoncées dans le sol, et bien plus encore le maïs (4-5 centimètres, suggéré dans Elmore et al., 2014). Quant aux fabacées, la fève peut être déposée à 4 cm (Singh et al., 2010), le haricot à 2.5 cm (Orphanos, 1977) et le pois à 3 cm (Thiyam et al., 2017).

En ce qui concerne les plus petites graines, semées pratiquement à la surface, Berti et al. (2008) indiquent que le fait de plomber le sol, avec un rouleau ou un râteau, a un effet très bénéfique pour l'émergence et l'établissement. Cela entraîne un meilleur contact avec le sol qui permet l'imbibition. (À condition évidemment de vérifier que le sol soit humide ou d'arroser...) Au contraire, cette pratique ne semble pas présenter d'intérêt pour ces mêmes semences plus enterrées

(1.3 cm ou 2.5 cm dans l'article en question), qui ont également une moins bonne performance. Dans ce cas, on peut,,au moins, « plomber à l'arrosoir ».

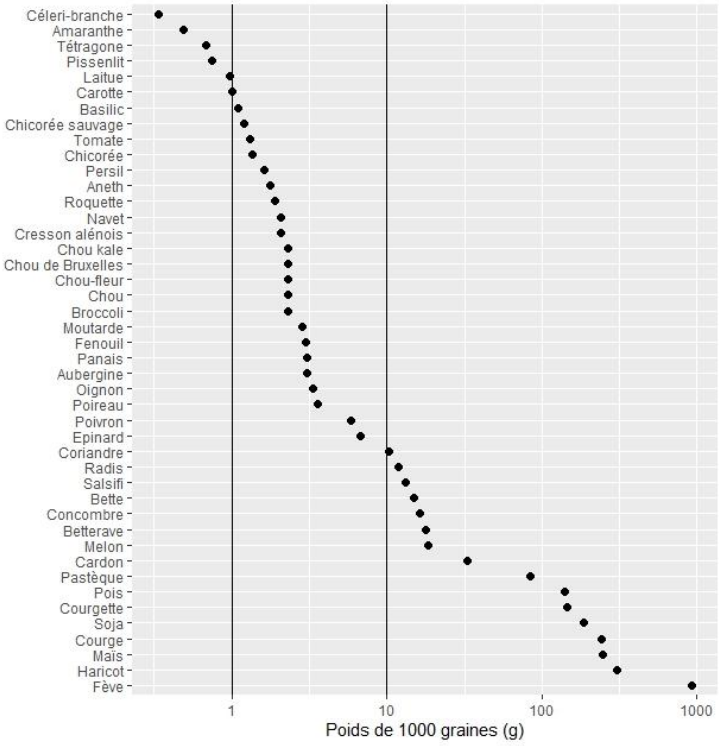


Figure 119 : Poids de mille graines (échelle logarithmique) des principales espèces du potager. Les limites à 1 gramme et 10 grammes permettent de séparer trois groupes de graines, correspondant à des profondeurs différentes de semis.

Orientation des semences pour les grosses graines

Pour les plus grosses graines, peut se poser une question supplémentaire : celle de l'orientation de la graine[409]. Elle a un effet, même dans un milieu parfaitement homogène (Bosy & Aarssen, 1995). Pour le maïs, qui est la seule monocotylédone du lot, la position pointe vers le bas est conseillée par Patten et Van Doren (1970), afin de permettre une émergence plus rapide et un meilleur établissement de la plantule. Si la production finale est peu différente, ils suggèrent

[409] Au moins pour le semis indirect.

néanmoins, en conditions initiales adverses, que la vitesse d'émergence est intéressante pour passer ce cap difficile. Pour le haricot[410], Bowers et Haden (1972) proposent la mise à plat ou bien l'hypocotyle vers le haut. En ce qui concerne le concombre, Mathad et al. (2012) trouvent[411] que la position radicule vers le haut donne les meilleurs résultats et citent d'autres auteurs allant dans ce sens. Pour d'autres cucurbitacées, comme la calebasse gourde ou le genre *Cucurbita* (courge, courgette), ils sont rejoints par Masilamani et al. (2023) et Choi et al. (2014) ; tous suggèrent que la position horizontale est également intéressante. Le cas de la pastèque semble plus délicat, avec Jaskani et al. (2006) qui préfèrent aussi la position radicule vers le haut, mais évoquent des auteurs conseillant la graine à plat ou bien radicule vers le bas, comme Dias et al. (2012). On se contentera donc, dans le doute, de poser la graine à plat pour cette espèce. Ces orientations sont représentées dans la Figure 120.

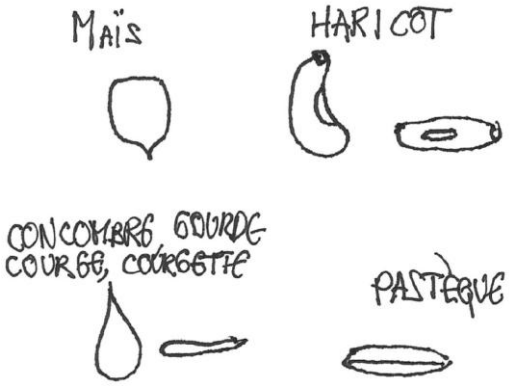


Figure 120 : Orientation pour le semis des principales grosses graines
(le centre de la planète Terre est en bas ;-)

Les graines ne sont pas le seul matériel de multiplication. Le cas de la pomme de terre et de la disposition de son tubercule est ainsi intéressant. D'une part, Kabir et al. (2004) montrent qu'il est contre-

[410] En revanche, pour la fève, autre fabacée à grosse graine, je n'ai rien trouvé dans la littérature.

[411] Dans une communication scientifique d'une grande étrangeté...

productif de découper le tubercule, en espérant une meilleure production totale : c'est avec le tubercule entier que l'on obtient les meilleurs résultats. En ce qui concerne son orientation, il vaut mieux soit positionner les germes vers le haut, soit simplement à l'horizontale ; il est moins intéressant de placer le tubercule au hasard ; et encore moins les germes vers le bas (Chetan et al., 2019). Pour l'ail, Castellanos et al. (2004) montrent l'intérêt de planter la pointe vers le haut. Enfin, le bulbe d'oignon (Masilamani et al., 2023) est logiquement placé racines vers le bas.

10.4 Références

Ambika, S., Manonmani, V., & Somasundaram, G. (2014). Review on effect of seed size on seedling vigour and seed yield. *Research Journal of Seed Science, 7*(2), 31-38.

Angiosperm Phylogeny Group, Chase, M. W., Christenhusz, M. J., Fay, M. F., Byng, J. W., Judd, W. S., ... & Stevens, P. F. (2016). An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG IV. *Botanical Journal of the Linnean Society, 181*(1), 1-20.

Barrett, S. C. (2010). Understanding plant reproductive diversity. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 365*(1537), 99-109.

Berti, M. T., Johnson, B. L., & Henson, R. A. (2008). Seeding depth and soil packing affect pure live seed emergence of cuphea. *Industrial Crops and Products*, *27*(3), 272-278.

Bosy, J., & Aarssen, L. W. (1995). The effect of seed orientation on germination in a uniform environment: differential success without genetic or environmental variation. *Journal of Ecology*, *83*(5), 769-773.

Brocklehurst, P. A. (1985). Factors affecting seed quality in vegetable crops. *Scientific Horticulture, 36*, 48-57.

Castellanos, J. Z., Vargas-Tapia, P., Ojodeagua, J. L., Hoyos, G., Alcantar-Gonzalez, G., Mendez, F. S., ... & Gardea, A. A. (2004). Garlic productivity and profitability as affected by seed clove size, planting density and planting method. *HortScience, 39*(6), 1272-1277.

Chethan, C. R., Tewari, V. K., Srivastava, A. K., Kumar, S. P., Nare, B., Chauhan, A., & Singh, P. K. (2019). Effect of herbicides on weed control and potato tuber yield under different tuber eye orientations. *Indian Journal of Weed Science, 51*(4), 385-389.

Choi, B. S., Lee, J. M., & Choi, G. W. (2014). Post-conditioning Periods and Seed Orientation Affects the Vigor of Cucurbit Seeds with Dry-heat Treatment. *Horticultural Science and Technology, 32*(1), 26-32.

Cromarty AS, Ellis RH, Roberts EH (1982). *The Design of Seed Storage Facilities for Genetic Conservation*, Revised 1985 and 1990 edition. International Board for Plant Genetic Resources, Rome, Italy.

da Riva, N. B., Biffe, D. F., Nalin, D., Mendes, R. R., Ferreira, L. A. I., Silva, V. F. V., & Constantin, J. (2023). Weed interference periods in lettuce crop. *Horticultura Brasileira*, *41*, e2566.

Dias, M. A. N., Sugianto, D., Guner, N., & Hassan, M. (2012). Seed sowing orientation related to seed coat adherence on watermelon. *Brazilian Journal of Agriculture -Revista de Agricultura, 87*(3), 194-201.

Dirzo, R., & Raven, P. H. (2003). Global state of biodiversity and loss. *Annual review of Environment and Resources, 28*(1), 137-167.

Ellis, R.H., & Roberts, E.H. (1980). Improved Equations for the Prediction of Seed Longevity, *Annals of Botany, 45*(1),13–30.

Elmore, R., Al-Kaisi, M., & Hanna, M. (2014). *Corn seeding depth: Back to the basics*. University of Maryland Extension: College Park, MD, USA.

Gallais, A. (2018). *Histoire de la génétique et de l'amélioration des plantes. Histoire de la génétique et de l'amélioration des plantes*. Éditions Quae, 1-288.

García-Palacios, P., Milla, R., Delgado-Baquerizo, M., Martín-Robles, N., Álvaro-Sánchez, M., & Wall, D. H. (2013). Side-effects of plant domestication: ecosystem impacts of changes in litter quality. *New Phytologist*, *198*(2), 504-513.

Gindri, D. M., Coelho, C. M. M., Souza, C. A., Heberle, I., & Prezzi, H. A. (2017). Seed quality of common bean accessions under organic and conventional farming systems. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, *47*, 152-160.

Groot, S. P., Van der Wolf, J. M., Jalink, H., Langerak, C. J., & van den Bulk, R. W. (2004). Challenges for the production of high quality organic seeds. *Seed Testing International, 127*, 12-15.

Harrington, J. F. (1959). Drying, Storage, and Packaging Seed to Maintain Germination and Vigor. Seed Technology Papers. 44.

Harris, D. (2006). Development and testing of "On-Farm" seed priming. *Advances in Agronomy*, *90*, 129-178.

Hayden, C. W., & Bowers, S. A. (1974). Emergence and Yield of Beans Planted with a Seed-Orienting Planter 1. *Agronomy Journal*, *66*(1), 50-52.

Haider, N. (2018). A brief review on plant taxonomy and its components. *The Journal of Plant Science Research, 34*(2), 277-292

Hebert, P. D., Cywinska, A., Ball, S. L., & DeWaard, J. R. (2003). Biological identifications through DNA barcodes. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences, 270*, 313-321.

Jaskani, M. J., Kwon, S. W., Kim, D. H., & Abbas, H. A. I. D. E. R. (2006). Seed treatments and orientation affects germination and seedling emergence in tetraploid watermelon. *Pakistan Journal of Botany*, *38*(1), 89.

Kabir, M. H., Alam, M. K., Hossain, M. A., Hossain, M. M., & Hossain, M. J. (2004). Yield performance of whole-tuber and cut-piece planting of potato. *Tropical Science, 44*(1), 16-19.

Kalapchieva, S. (2013). Study on quanttatove characters of organic seeds in garden pea. *Овощи России*, *21*(4), 39-42.

Kays, S. J., & Dias, J. C. S. (1995). Common names of commercially cultivated vegetables of the world in 15 languages. *Economic Botany, 49*(2), 115-152.

Mallet, J. (2001). Species, concepts of. *Encyclopedia of biodiversity, 5*, 427-440.

Kidd, F., & West, C. (1918). Physiological pre-determination: the influence of the physiological condition of the seed upon the course of subsequent growth and upon the yield. I. The effects of soaking seeds in water. *Annals of Applied Biology, 5*, 1-10.

Le Roux, G., Leborgne, I., Labadie, M., Garnier, R., Sinno-Tellier, S., Bloch, J., ... & Boels, D. (2018). Poisoning by non-edible squash:

Retrospective series of 353 patients from French Poison Control Centers. *Clinical Toxicology, 56*(8), 790-794.

Martínez-Ainsworth, N. E., & Tenaillon, M. I. (2016). Superheroes and masterminds of plant domestication. *Comptes Rendus Biologies*, *339*(7-8), 268-273.

Masilamani, P., Venkatesan, S., Navamaniraj, K. N., Rajarathinam, P., Alagesan, A., & Thiagu, K. (2023). Impact of the orientation of seed placement and depth of its sowing on germination: A review. *Journal of Applied and Natural Science, 15*(1), 314-324.

Masson, F., & Leclerc, C. (2014). Le Catalogue Officiel : Un outil évolutif au service de l'agriculture et de sa multiperformance. *Agronomie, Environnement & Sociétés, 4*, 37-45.

Mathad, R. C., Vasudevan, S. N., Patil, S. B., Kurubar, A. R., & Shakuntala, N. M. (2012) Use of Euclidean six point geometry (« seed of life ») for seed orientation, precision sowing and usable transplants recovey in cucumber. *Proceedings of AIPA 2012*.

Maynard, D. N., & Hochmuth, G. J. (2006). *Knott's handbook for vegetable growers*. John Wiley & Sons.

Mayr, E. (1996). What is a species, and what is not?. *Philosophy of Science, 63*(2), 262-277.

Merfield, C. N. (2012). Problems and progress for organic seed production. *Agronomy New Zealand*, *42*, 89-102.

NASEM (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine). (2016). Genetically engineered crops: experiences and prospects.

Orphanos, P. I. (1977). Emergence of Phaseolus vulgaris seedlings from wet soil. *Journal of Horticultural Science*, *52*(3), 447-455.

Orzeszko-Rywka, A., Rochalska, M., & Ostrowska, M. (2018). Availability and quality of organic seed of some vegetables. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, *63*(3), 36-39.

Padulosi, S., Hodgkin, T., Williams, J. T., & Haq, N. (2002). Underutilized crops: trends, challenges and opportunities in the 21st century. In *Managing plant genetic diversity. Proceedings of an international conference, Kuala Lumpur, Malaysia, 12-16 June 2000* (pp. 323-338). Wallingford UK: CABI Publishing.

Patten, G. P., & Van Doren, D. M. (1970). Effect of seed orientation on emergence and growth of corn maize. *Agronomy Journal*, *62*(5), 592-5.

Podani, J. (2020). The coral of plants. *Acta Societatis Botanicorum Poloniae, 89*(3), 1-21.

Powell, A. (2009, September). What is seed quality and how to measure it. In Responding to the challenges of a changing world: The role of new plant varieties and high quality seed in agriculture. *Proceedings of the Second World Seed Conference*, Rome (pp. 8-10).

Prescott-Allen, R. & Prescott-Allem, C. (1990). How many plants feed the world?. *Conservation Biology*, *4*(4), 365-374.

Pringle, J. S. (1975). The Concept of Cultivar. *Journal of Arboriculture, 2*, 30-34.

Purugganan, M. D. (2022). What is domestication?. *Trends in Ecology & Evolution, 37*(8), 663-671.

Purugganan, M. D., & Fuller, D. Q. (2009). The nature of selection during plant domestication. *Nature*, *457*(7231), 843-848.

Radovich, T. J. (2018). Biology and classification of vegetables. In *Handbook of vegetables and vegetable processing*, 1-23.

Roll-Hansen, N. (1989). The crucial experiment of Wilhelm Johannsen. *Biology and Philosophy, 4*, 303-329.

Roos, E. E. (1986). Precepts of successful seed storage. *Physiology of Seed Deterioration*, *11*, 1-25.

Sabongari, S., & Aliero, B. L. (2004). Effects of soaking duration on germination and seedling growth of tomato (Lycopersicum esculentum Mill). *African Journal of Biotechnology, 3*(1), 47-51.

Saddhe, A. A., & Kumar, K. (2018). DNA barcoding of plants: selection of core markers for taxonomic groups. *Plant Science Today, 5*(1), 9-13.

Santamaria, P., & Signore, A. (2021). How has the consistency of the common catalogue of varieties of vegetable species changed in the last ten years?. *Scientia Horticulturae, 277*, 109805.

Sharma, S. (2018). Seed Vigour Testing: Principles and Methods. *Agrosbios Newsletter, 17*(2), 80-82.

Singh, A. K., Chandra, N., Bharati, R. C., & Dimree, S. K. (2010). Effect of seed size and seeding depth on Fava bean (Vicia fava L.) productivity. *Environment & Ecolology*, *28*(3A), 1722-1527.

Soltani, E., & Soltani, A. (2015). Meta-analysis of seed priming effects on seed germination, seedling emergence and crop yield: Iranian studies. *International Journal of Plant Production*, *9*(3), 413-432.

Tamilselvi, N. A., & Arumugam, T. (2017). Breeding Approaches for Sustainable Vegetable Production–A Review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences, 6*, 2845-2860.

Taylor, A. G. (2020). Seed storage, germination, quality, and enhancements. In *The physiology of vegetable crops* (pp. 1-30). Wallingford UK: CABI.

Teferra, T. F. (2021). Should we still worry about the safety of GMO foods? Why and why not? A review. *Food Science & Nutrition, 9*(9), 5324-5331.

Thiyam, R., Yadav, B., & Rai, P. K. (2017). Effect of seed size and sowing depth on seedling emergence and seed yield of pea (Pisum sativum). *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, *6*(4), 1003-1005.

Turcotte, M. M., Turley, N. E., & Johnson, M. T. (2014). The impact of domestication on resistance to two generalist herbivores across 29 independent domestication events. *New Phytologist*, *204*(3), 671-681.

Vaughan, D. A., Balazs, E., & Heslop-Harrison, J. S. (2007). From crop domestication to super-domestication. *Annals of Botany, 100*(5), 893-901.

Vavrina, C. S. (1996). *An introduction to the production of containerized vegetable transplants*. Univ. FL., Cooperative Extension Service. Bulletin, (302).

Wagenvoort, W. A., & Bierhuizen, J. F. (1977). Some aspects of seed germination in vegetables. II. The effect of temperature fluctuation, depth of sowing, seed size and cultivar, on heat sum and minimum temperature for germination. *Scientia Horticulturae*, *6*(4), 259-270.

Zohary, D. (2004). Unconscious selection and the evolution of domesticated plants. *Economic Botany*, *58*(1), 5-10.

10.5 Ctrl-R

```
#####################################
########## TENEUR EN EAU A L EQUILIBRE
#####################################
# Exemple oignon (Alium cepa)
# La teneur en huile peut être trouvée dans la
# seed information database

library(viabilitymetrics)
SeedEqMC(oilcontent = 19, rh = 75, temp = 10,
basis = "wet")


################################
########## LONGEVITE DES GRAINES
################################
# Toujous sur l oignonoignon, ici longévité sur 3 ans
# trouver d'abord le numéro (vcindex) correspondant à l'espèce
# ici vcindex=5

library(viabilitymetrics)
View(viabilityconstants)
durée<-3*365
period<-1:durée
fvo<-numeric(durée)

mco<-SeedEqMC(oilcontent = 19, rh = 75, temp = 10, basis =
"wet")
for(i in 1:durée){
fvo[i]<-FinalViability(initial = 85, period = period[i],
vcindex = 5, mc = mco, temp = 10,years = FALSE)
}
plot(period,fvo,type="l",ylim=c(0,100),xlab="Jours",ylab="%
de germination")
```

Potivations

Ce que nous étudions dans cette partie sur les « potivations », ce sont les effets, négatifs ou positifs, de la pratique potagère ; que ce soit sur le jardinier, sur son entourage, ou de façon agrégée, sur la société tout entière et sur l'environnement. Un premier chapitre est consacré aux effets économiques, un deuxième aux effets, disons, socio-culturels et de santé, et un troisième aux effets environnementaux. Ce dernier est, en outre, l'occasion de poser un cadre général d'évaluation de l'ensemble des effets, appelé : contribution de la nature (du potager) aux populations (humaines).

Ces divers effets relèvent d'une interaction entre le contexte (climatique, pédologique, topographique, biologique...) et les pratiques potagères (biodiversité végétale, travail du sol, fertilisation, irrigation, fourniture d'habitats, ergonomie du travail, etc.). L'ambition, *in fine*, est de reconsidérer nos propres pratiques, grâce à ce nouveau cadre des contributions.

11 Potag€r

La question économique est, bien entendu, centrale pour les professionnels qui vivent du maraîchage. Elle a aussi toujours été primordiale chez bien des jardiniers amateurs, particulièrement par le passé, où le potager participait à une économie de subsistance ; et c'est encore le cas, aujourd'hui, dans les pays en développement. Cette conception perdure dans le potager archétypal, au sens de Boulianne et Proteau (2020), qui vise explicitement une production importante avec une motivation économique ; l'activité étant, d'ailleurs, largement considérée comme un autre travail. Dans des approches alternatives, la question de la production n'est pas absente : il s'agit souvent de diversifier ses revenus ou d'atteindre une certaine autonomie alimentaire, souvent couplée à une volonté de la compléter par des circuits plus courts de production locale ; mais cela peut aller jusqu'à une recherche de *l'autosuffisance individuelle alimentaire*[412].

La question de l'autosuffisance se pose également à plus grande échelle : le système alimentaire actuel est mondialisé, reposant sur des livraisons en flux tendus, à grand renfort de transports, donc de pétrole, et de chaînes du froid ; il est suspecté d'être hautement vulnérable (Zainuddin & Mercer, 2014). Cela, sans compter une population mondiale en expansion, au niveau de vie croissant, une terre qui, même ronde, possède une surface finie, et un changement climatique défavorable à l'agriculture selon le GIEC. L'agriculture est, elle-même, en partie responsable de cette situation et doit donc, en plus, réduire son empreinte écologique. Dans ce contexte inquiétant, les villes sont sans doute encore moins résilientes que les campagnes ; mais elles constituent également une opportunité de développement d'agricultures urbaines[413] qui permettraient d'augmenter les surfaces

---

[412] Voire même, parfois, complétée par une autosuffisance individuelle énergétique.

[413] Sans oublier que plus de la moitié de la population mondiale habite dans des villes : 55 % des Français vivent dans des unités urbaines de plus de 50 000 habitants (INSEE, 2020), habitants qui ont aussi le droit de s'intéresser au potager.

cultivées, sans diminuer les surfaces encore naturelles[414]. Beaucoup, même parmi les scientifiques, sont assez optimistes sur ce potentiel urbain, mais cette perception reste essentiellement fondée sur les expériences des potagers urbains lors des guerres mondiales, lors des dépressions économiques (Mok et al., 2014), ou bien à Cuba, lors de la chute de l'approvisionnement soviétique (Hanon, 2015). Est-ce que la mise en culture[415] d'espaces verts, de parties de rues, de toits, de pelouses dans des résidences privées ou la création de jardins partagés pourraient limiter les risques de pénuries alimentaires ? Ou même conduire à une autosuffisance urbaine dans des villes assez étalées ?

Ce potentiel demande à être évalué ; c'est pourquoi les questions économiques concernant le potager ont été récemment retravaillées par plusieurs équipes scientifiques[416]. Quelle est la productivité d'un potager ? Quels sont les coûts induits par cette activité ? Réalise-t-on réellement des économies ? Peut-on ainsi couvrir une part importante de ses besoins alimentaires ?

Ces questions semblent simples, mais leur apporter des réponses bien étayées est moins facile qu'il n'y paraît. Certaines études portent sur des jardins expérimentaux, gérés par les scientifiques eux-mêmes, qui sont des spécialistes de l'agronomie : on peut les suspecter de biais par rapport à des potagers aux mains de jardiniers amateurs. Il semble plus réaliste de mener des recherches participatives, où l'on s'assure du

---

[414] Plusieurs autres bénéfices sont attachés à l'agriculture urbaine : réduction de l'effet d'îlot de chaleur urbain, réduction du ruissellement, augmentation de la biodiversité, valeur esthétique, diminution des transports (bien que cela ne fasse pas consensus), relocalisation de la production, emplois ; mais il y a aussi des inconvénients de contamination sanitaire des légumes, des sols, de l'eau...

[415] Outre l'espace, les potagers urbains souffrent de problèmes d'ombrage par d'autres bâtiments, et parfois, de pollution de sols sur des terrains anciennement industrialisés.

[416] Précédemment, il y avait des recherches, mais portant sur les pays en voie de développement. Dans ce contexte, une production privée est alors, à la fois, une question de subsistance alimentaire, mais aussi une possibilité de vendre une parte de sa production. Ces études ont montré la grande importance des femmes dans ce « travail », et même des bénéfices environnementaux, par le recyclage d'une partie des déchets organiques, tâche mal prise en charge par les autorités dans des pays pauvres.

concours de jardiniers qui, pendant une *certaine* période, vont s'engager à peser chacune de leurs récoltes[417], pratiquement chaque jour donc, à les identifier, ainsi qu'à donner des informations complémentaires sur les coûts (irrigation, fertilisation, achat de matériel et de fournitures) et sur leur temps de travail. Cependant, de tels potagers sont, eux aussi, rarement représentatifs ; car ce sont souvent des individus très motivés qui finissent par participer... Pour ne prendre qu'un exemple : l'étude de Zainuddin et Mercer (2014), comprenant 15 potagers à Melbourne, comporte deux jardiniers de profession, beaucoup de membres des catégories sociales supérieures, onze pratiquant la permaculture et trois la biodynamie[418].

En outre, il est besoin de recueillir des informations sur les prix au détail des légumes produits, sur leur valeur nutritionnelle, et même sur la météorologie, comme la quantité de pluie tombée pendant la période de culture. Pour que chacun se rende compte de la tâche, j'engage le lecteur à essayer, pendant un mois, de s'y confronter dans son propre jardin. Cela lui permettra de situer, grossièrement, ses « performances » par rapport à la littérature que je vais à présent décrire. Dans un premier temps, nous allons aborder les aspects économiques, que l'on peut résumer avec la formule :

$$\text{Profit} = \text{Prix} \times \text{Production} - \text{Coûts} \qquad \text{(Eq. 11.1)}$$

11.1 Production d'un potager

La récolte est constituée de choux, de carottes, de tomates, de persil. Le tout est, le plus souvent, résumé par la masse totale en kilogrammes, qui sera appelée production. Pour autoriser des comparaisons plus judicieuses, il faut, d'une part, avoir une idée de la période considérée, ce qui n'est malheureusement pas toujours le cas (Csortan, 2020), et d'autre part, connaître la surface du potager : la productivité par unité

[417] Nous nous concentrons ici sur la production de légumes, mais certaines études mesurent également la production de fruits (arbres fruitiers, pas des tomates), de petits élevages (œufs), de miel voire... de poissons !

[418] Les auteurs ne sont pas dupes « Our suspicion is that relatively high levels of production such as reported in this paper are far from the norm. »

de surface, en kg/m^2, étant majoritairement l'indicateur de performance retenu.

Ainsi, McDougall et al. (2019), sur la base de 13 potagers amateurs, arrivent à une productivité moyenne de 5.94 kg/m^2 (± 4.0, de 1.99 à 15.53 kg/m^2) sur une année[419]. Cette productivité s'avère supérieure à celle obtenue dans une autre étude australienne portant, elle, sur des fermes commerciales : 3.18 kg/m^2. Il est vrai que les jardiniers amateurs en question sont expérimentés, avec en médiane 20 ans de pratique, et qu'ils exercent dans de petits potagers (nous sommes dans une grande ville Sydney), avec une surface médiane de 10.8 m^2.

Cette fois dans une ville moyenne (Guelph) au Canada, mais avec le même type de jardins, la surface médiane étant ici de 12.5 m^2, CoDyre et al. (2015) observent, sur 50 potagers, une productivité moyenne[420] de 1.43 kg/m^2 (± 1.22), mais sur seulement les quatre à cinq mois de la saison de jardinage[421] : tomates (37 %), pommes de terre (12 %), courgettes (7 %), concombres (6 %), légumes-feuilles (6 %) ; des légumes vedettes d'été, que l'on retrouve dans presque toutes les études parcourues. À Tokyo, Tahara et al. (2011) relèvent une moyenne de 4.16 kg/m^2/an dans des jardins municipaux et 8.45 kg/m^2/an avec un encadrement de professionnels.

Duchemin et al. (2008), à Toronto, dénombrent des productivités allant de 0.3 kg/m^2 jusqu'à 5.4 kg/m^2 pour 39 jardins partagés[422], observés sur 18 semaines (mi-juin à fin octobre). Dans ces jardins collectifs, la visée est souvent sociale ; et 20 à 60 % des jardiniers ont

---

[419] Je ne suis pas certain du *sens* de tous ces chiffres après le point décimal... sur 13 potagers... mais je vais rapporter fidèlement les résultats comme ils sont présentés dans ces articles.

[420] Ce ne sont pas exactement des pesées. Les jardiniers indiquent, par exemple, le nombre de laitues qu'ils récoltent et le poids (la masse...) moyen d'une laitue est employé pour alors définir le poids estimé. Dans le total, 4 % du poids est constitué par des fruits.

[421] Nous sommes au Canada, les conditions sont plus rudes et la saison poussante plus courte, on doit donc pouvoir approximativement doubler ce résultat pour une année dans un climat français plus doux, d'autant plus en s'aidant de protections de culture.

[422] Les surfaces ne sont pas précisées, mais par recoupements, les parcelles semblent faire de 10 à 30 m^2.

en effet des revenus faibles. La production par jardinier va de 7 à 28.5 kg de légumes, avec une moyenne de 16 kg. Sachant que la consommation individuelle au Canada, hors pommes de terre, est de 40.5 kg par an : sur la période de culture considérée, ils couvrent donc les besoins alimentaires d'une personne.

Au-delà de la sécurité alimentaire et de l'amélioration des conditions de vie, ces jardins collectifs sont des lieux où les auteurs observent une intégration sociale, particulièrement chez les individus isolés, un développement du sens de la communauté, une éducation à l'écologie, à la solidarité et à l'alimentation.

Le coût de ces opérations de jardinage collectif, non abordé dans l'article, est donc à mettre en rapport avec des bénéfices multidimensionnels sur lesquels nous reviendrons.

La question de la production reste néanmoins importante pour les jardins partagés, car elle peut encourager les autorités locales à développer ces dispositifs. C'est dans ce cadre qu'Algert et al. (2014), sur 10 potagers situés en Californie, menés par des jardiniers expérimentés, obtiennent une moyenne de 3.7 kg/m^2 pour une seule culture de quatre mois en été ; on doit pouvoir doubler sur l'année et passer les 6 kg/m^2/an.

Les auteurs soulignent, là aussi, que cette production est supérieure à celle obtenue en grandes cultures légumières (2.9 kg/m^2 par culture) et plus faible que celle observée avec les techniques maraîchères bio-intensives (4.4 kg/m^2 par culture).

Pour finir, Csortan et al. (2020), à Adelaïde, en climat méditerranéen, relèvent sur 34 jardins privés une productivité[423] de 0.2 à 17.0 kg/m^2/an, avec une médiane à 2.5 kg/m^2/an. Plus exceptionnel, mais il s'agit d'une expérience cette fois, et pas de l'observation de jardins amateurs, Orsini et al. (2014) parviennent à produire 18.9 kg/m^2/an à Bologne, sur des toits avec des sols construits en compost et « sol du commerce ».

Une conclusion s'impose : *la productivité s'avère pour le moins variable* ; les causes en sont, d'un côté, les conditions pédoclimatiques,

[423] En fait, donnée par mois, l'étude porte sur différents mois de l'année selon le potager : j'ai ici simplement multiplié par 12.

la fertilisation, l'irrigation, les semences, bref les éléments évoqués dans ces notes de lecture, et de l'autre, le temps de travail et l'expertise du jardinier[424]. Un autre élément est la surface cultivée : les bons résultats de productivité parfois obtenus par les jardiniers amateurs le sont sur des petites surfaces. Les professionnels en gèrent de bien plus grandes, souvent, en partie, de façon mécanisée, afin d'économiser du temps de travail ; la productivité horaire étant un autre aspect de la performance, que nous allons développer par la suite.

Plusieurs articles notent qu'il y a, à certaines périodes, production de surplus ; et que les jardiniers partagent volontiers (et souvent avec fierté) leur production avec la famille, les amis, les voisins. Il est également possible de développer la conservation de sa production.

11.2 Coût d'un potag€r

Quels ont été les inputs nécessaires pour produire ces quantités qui sont parfois impressionnantes, puisqu'elles peuvent dépasser les productivités des professionnels ? Il est bon, non seulement de produire, mais aussi de le faire efficacement.

11.2.1 En capital ?

Dans l'étude, déjà citée, de CoDyre et al. (2015), on arrive à un coût de 10.8 $ ($2012) par mètre carré, sans inclure les dépenses d'irrigation. Étant donné la surface médiane des jardins (12.5 m^2), le coût total est de l'ordre de 135 $ par jardin.

En y ajoutant cette fois l'irrigation, les études compilées par Langelotte (2014) présentent des coûts[425] de matériel et fournitures relativement fixes, malgré des surfaces assez différentes : 237 $ ± 85 ($2013, avec une médiane à 209 $).

---

[424] Bien sûr, l'irrigation, la fertilisation, le choix des semences ne sont pas indépendants de l'expertise du jardinier.

[425] Sans doute sur une saison, mais je n'en ai pas la certitude, il faudrait relire les études auxquelles elle fait référence.

Csortan et al (2020) différencient les coûts[426] d'installation qui sont estimés à 17 €/m^2 et les coûts courants de 5.5 €/m^2/an y compris l'irrigation.

11.2.2 En eau ?

Toujours Csortan et al. (2020), à Adelaïde qui possède un climat méditerranéen, indiquent que les jardiniers irriguent à hauteur[427] de 12 L/m^2 par semaine, soit environ un arrosoir. Cette eau d'irrigation représente 46 % de l'eau totale[428]. Le coût de l'eau d'irrigation s'élève à 23 % des coûts courants du jardin (30 % dans une autre étude, c'est une médiane qui cache des situations très différentes selon l'accès à l'eau).

Dans Ward et Symons (2017), le premier auteur cite un autre de ses travaux dans lequel il montre même, dans des situations de climat chaud où seule l'eau du robinet est employée, que le coût de l'irrigation, à lui seul, peut outrepasser les recettes du jardin.

L'irrigation constitue également 20 % du temps de travail qui, s'il était valorisé, conduirait selon leurs calculs à quadrupler le prix de l'eau d'irrigation : ils suggèrent donc de réfléchir à la pose de dispositifs automatiques d'irrigation[429]. Ils conseillent aussi de mettre en place des appareils de mesure, afin de connaître la quantité d'eau réellement employée dans son potager.

11.2.3 En temps ?

C'est à nouveau Csortan *et al.* (2020) qui donnent un temps de travail réellement observé de 1.3 h par semaine et par jardin, alors que

---

[426] Dans la catégorie appelée *Bed-Mixed*, c'est-à-dire potager classique ; les coûts sont donnés en dollars que j'ai convertis en euros par un facteur de 0.9 ; et ils sont donnés mensuellement pour les coûts courants que je choisis de simplement multiplier par 12. Je procéderai de même plus loin avec les recettes.

[427] Toutes les estimations de cette section sont les médianes observés sur les 34 potagers.

[428] Eau totale = eau d'irrigation + eau de pluie.

[429] La réflexion vaut aussi lorsque l'eau, gratuite, provient d'une source, le temps de travail reste identique.

l'étude des temps estimés (par sondage) est de 3.6 h par semaine ; cette surestimation est recoupée par une autre étude. La morale est qu'il faut peut-être se méfier de nos propres estimations concernant la durée de nos activités au potager.

Ce temps de travail est d'abord consacré à récolter (31 %) et à irriguer (20 %), sachant que plusieurs personnes ont des systèmes automatisés. Il est rassurant de voir que le temps de travail s'avère très bien corrélé à la production.

Pour choisir une autre unité de mesure, le temps de travail est estimé à 2.8 h/m^2 sur une année, à comparer à CoDyre et al (2015) qui sont à 3.0 h/m^2 ($\pm$ 3.7, donc de grosses variations !), mais sur une bien plus courte saison de 4-5 mois. La différence vient, en partie, du fait que la seconde étude ne porte que sur des mois de printemps et d'été ; la saisonnalité du travail et de la production est forte dans le potager. McDougall et al. (2020) font, eux, une estimation de 6 h/m^2/an, ce qui est une valeur plutôt élevée[430]. Les auteurs disent que d'autres études ont montré que les jardiniers amateurs peuvent prendre 1.7 à 2.8 plus de temps que cela est nécessaire (pour un professionnel), car ce n'est pas leur objectif majeur : ils prennent leur temps, profitent des activités, font des pauses. Leur productivité horaire moyenne est de 1.29 kg/h avec une étendue de 0.21–2.28 kg/h.

11.3 Économies réalisées au potager

Quand on a ajouté tous les légumes pour obtenir la production, on a perdu de vue que... les tomates n'ont pas le même « poids » que le basilic. Le Tableau 20 décrit, pour quelques légumes-phares, la productivité en kg/m^2, qui illustre la remarque précédente. Cependant, les prix de vente de ces légumes sont bien différents également : la pomme de terre primeur s'avère nettement plus onéreuse que la pomme de terre de conservation. Il faut donc combiner ces deux critères pour en arriver à la recette que l'on peut attendre, en cultivant un mètre carré d'un légume plutôt que d'un autre. Trois cas sont à distinguer : des cultures très intéressantes comme le concombre, la tomate ou la

[430] Les surfaces sont petites, environ 10 m^2.

pomme de terre primeur ; des cultures moyennement intéressantes qui vont de la pomme de terre de conservation à la courgette ; enfin, des légumes moins intéressants, du chou-fleur à l'artichaut. Attention, les durées de culture ne sont pas indiquées ; ainsi, les diverses salades ont une durée très courte au champ par rapport à des pommes de terre de conservation ou des tomates : il est possible d'en réaliser au moins deux cultures, voire trois avec des repiquages de plants, dans le même temps.

Tableau 20 : Pour quelques légumes, la productivité en kg/m^2 (FranceAgriMer, 2019), le prix du vrac (Réseau des nouvelles des marchés, 2024 ; CRENO Réseau français de distribution de produits frais, ????) et la recette de la production.

LEGUMES	PRODUCTION (kg/m^2)	PRIX DU VRAC (€/kg)	RECETTES (€/m^2)
Concombre	20,3	3,0	60,1
Tomate	14,1	3,0	42,0
P.D.T. primeur	3,0	6,5	19,1
P.D.T. conservation	4,3	2,5	10,5
Oignon	3,9	2,5	9,8
Endive	1,7	5,1	8,7
Carotte	4,3	2,0	8,6
Ail	0,7	11,6	8,2
Poireau	2,9	2,8	8,2
Salade	1,7	4,3	7,3
Courgette	4,0	1,8	7,3
Chou fleur	1,5	3,0	4,7
Asperge	0,4	10,6	4,4
Melon	1,9	1,9	3,6
Artichaut	0,5	4,5	2,4

Ceci étant précisé, la question économique est abordée grâce à Langellotto (2014), dans le cadre des services de conseil en agriculture, qui développent des actions en direction de populations défavorisées, afin de les inciter à cultiver un jardin. Les conseillers, eux-mêmes, s'interrogent souvent sur le véritable intérêt économique de telles propositions[431] pour ces populations. En fait, il existait très peu d'études dans la littérature scientifique à cette date et l'auteur n'en réunit, au final, qu'une petite dizaine. Pour en résumer le résultat, ces potagers présentent un profit[432] de l'ordre de 8 \$/m^2 ($\pm$ 6), hors coûts

[431] Nous aborderons dans le chapitre suivant d'autres avantages potentiels : une nourriture plus saine, plus d'exercice physique, plus de bien-être...

[432] Les études peuvent être assez anciennes, les prix ont été actualisés en valeur 2013 du dollar.

du travail. La surface cultivée varie, mais reste de l'ordre de 50-150 m^2, ce qui nous amène bien en deçà du millier d'euros à l'année[433]. Les coûts de matériel et fournitures sont, comme nous l'avons dit, relativement fixes (237 $ par an ± 85), ce sont plutôt les recettes qui sont variables. La première remarque de l'auteur est que l'écart-type du résultat est très important, ce qui traduit le fait que les contextes pédoclimatiques, les légumes cultivés[434] et les expertises varient considérablement. Sur ce dernier point, la deuxième remarque de l'auteur est qu'un débutant ne peut espérer ce type de résultats. La troisième remarque est que le prix du travail n'est pas intégré dans ce calcul, mais s'il l'est, le profit *s'avère alors en moyenne négatif* (les coûts sont plus élevés que les bénéfices). Et pourtant, les quantités de travail sont peu importantes, moins d'une heure par mètre carré cultivé par an. Ce qui permet aux professionnels de s'en sortir, c'est à la fois leur expertise, le remplacement du travail humain par des outils, le choix des cultures en fonction de leur rentabilité... Voyons à présent ce qu'il en est avec des travaux plus récents, car la moitié de ceux compilés par Langelotte ont été effectués avant 1985.

Dans l'étude déjà évoquée de CoDyre et al. (2015), avec des jardins dont la taille médiane est de 12.5 m^2, les coûts médians sont, pour mémoire, de 10.8 $/$m^2$, avec une production moyenne de 1.43 kg/m^2. Or, en respectant les proportions des légumes produits et en les comparant aux prix de trois supermarchés locaux, cela coûterait dans le commerce 6.5 $, soit un rapport recettes sur coûts de 0.60 nettement inférieur à 1 ! Le jardinier est donc *en train de payer ses légumes nettement plus chers*, sans compter l'eau, ici non incluse dans les coûts, et le temps de travail qu'il y a passé !

Plus encourageant, mais sans considérer le prix du travail, Algert et al. (2014), dans un article concernant des jardins de 10 à 50 m^2, arrivent à une économie de 390 € sur une saison de quatre mois, on doit donc pouvoir doubler cette économie sur une année complète.

McDougall et al. (2019) sont sur un rapport recettes sur coûts de 0.62 si le travail est compté. Ceci dit, les jardiniers observés déclarent

---

[433] 675 $ en moyenne et 508 $ en médiane.

[434] Les légumes-feuilles et les tomates sont les plus profitables d'après l'auteur.

que ni la production, ni le fait d'économiser de l'argent ne sont leurs objectifs principaux. *S'il s'agit d'une activité récréative, il serait alors logique d'enlever le prix du travail* : le rapport est alors de 2.81, donc intéressant. Les auteurs se livrent également à des calculs assez complexes de durabilité de l'activité, et le résultat est moins bon qu'on pouvait s'y attendre[435]. Il pourrait devenir bien meilleur en recyclant plus systématiquement les déchets, et l'eau en particulier.

Toutefois, même avec un ratio recettes sur coûts inférieur à 1, il ne faut pas désespérer ! On peut raisonner en termes de *coût d'opportunité* : pendant que le jardinier fait son potager, il ne fait pas autre chose... qui pourrait lui coûter beaucoup plus cher !

Csortan et al. (2020) estiment les coûts courants de 5.5 €/m^2/an, soit pour un jardin de 50 m^2 (la taille médiane dans leur échantillon), un coût de 275 €/an. On a 24.3 €/m^2/an de recettes, soit 1215 € pour 50 m^2, d'où une économie de 940 €/an. Là aussi, les auteurs montrent que, vu les heures de travail, si elles étaient valorisées au salaire australien minimum et comptées comme coût, la plupart des jardins (80 %) seraient en déficit.

> Du côté de chez Stéphane : Manifestement, le potager n'est pas l'Eldorado : un débutant peut même y perdre de l'argent ! Un jardinier avec une expertise semble pouvoir réaliser sur l'année une économie de l'ordre de 500 à 1000 €. Si son objectif est *uniquement* financier, il vaut peut-être mieux se mettre en quête d'un autre travail ?

11.4 Est-ce suffisant ?

Plutôt que de réfléchir en termes d'économies réalisées, il est possible de se demander si la production obtenue permet de couvrir les besoins alimentaires d'une personne ou d'une famille, et ce, pendant combien de temps dans l'année ? Une autre façon de voir les choses est de déterminer la surface nécessaire pour couvrir les besoins d'une

---

[435] Je ne rentre pas dans les détails assez ardus, l'article est disponible en ligne pour le lecteur intéressé, accompagné de nombreux suppléments précisant leurs résultats.

personne. Le raisonnement qui peut se faire en kilos, en calories ou nombre de rations alimentaires repose sur la formule :

$$\text{Autosuffisance (\%)} = (\text{Surface} \times \text{Productivité}) \ / \ \text{Besoins}.$$

11.4.1 Autosuffisance individuelle

McDougall et al. (2020) indiquent qu'un adulte consomme environ 2 078 Kcal par jour, dont 14.7 % de légumes, ce qui conduit pour une année à 365 × 2078 × 0.147 soit 111 495 Kcal. Leurs observations, en zone tempérée, laissent à penser qu'une productivité de 6 kg/m^2/an forme un objectif atteignable pour un jardinier expérimenté. Sur une base de 350 Kcal par kilo de légume (ce qui semble cohérent : 340 pour le brocoli, 150 pour la laitue, 750 pour le panais), un tel potager sort donc 2 100 Kcal/m^2/an. Il faut donc de l'ordre de 53 m^2 par an pour nourrir un adulte en légumes.

Les auteurs font remarquer qu'à Sydney, il est possible de trouver un bon nombre de terrains en rognant sur les pelouses ; que l'eau de pluie, si elle était récupérée, suffirait pour cette production ; et que la ville génère assez de compost pour assurer la fertilité[436]. Le véritable facteur limitant, selon eux, est le temps de travail, car ce niveau de productivité est atteint pour 6 heures de travail par mètre carré par an dans l'échantillon observé, soit un total pour l'autosuffisance de 318 heures[437], de l'ordre de 52 minutes par jour (pour une personne !). Vous savez à quoi vous attendre si vous visez l'autosuffisance en légumes avec une famille de quatre personnes... en vous y prenant bien. Surtout dans certaines saisons comme celle dite de la soudure (mars-mai), où la transition des légumes d'hiver à ceux de printemps demande un bon savoir-faire, probablement des équipements spécifiques et un stockage des surplus de la saison précédente.

L'étude de Conk et Porter (2016) présente plusieurs intérêts : elle porte sur une localisation (Laramie, Wyoming) avec un climat difficile, semi-aride et très exposé aux vents à 2 200 m d'altitude ; elle se déroule

---

[436] Ils proposent une valeur d'irrigation pour Sydney de 670 L/m^2/an et un apport de compost pour redémarrer un terrain de 15 kg/m^2.

[437] 53 m^2 nécessaires multipliés par 6 heures de travail.

sur trois ans ; et elle calcule l'autosuffisance d'une façon différente. Ce travail concerne, sur les trois années, respectivement 9, 33 et 12 potagers, soit au total 54. Leurs surfaces sont assez petites : 23.5 m^2 (± 26.2). La productivité est de 2.5 kg/m^2 (± 2.4), ce qui signifie, malgré le climat hostile, que les jardiniers qui sont expérimentés s'en sortent[438]. Mais nous sommes quand même à un niveau moindre que l'hypothèse de l'étude précédente. L'écart-type montre, à nouveau, de nettes différences entre les jardins, mais un des intérêts de cette étude, c'est que certains potagers sont observés sur deux voire trois ans : on relève que la production peut alors varier pour un même jardin de 39 % ! *Même un jardinier expérimenté peut avoir des « accidents » certaines années, donc*. Il est donné comme référence une productivité des fermes commerciales, souvent dans des climats plus favorables, de 3.3 kg/m^2. Il n'y a malheureusement pas de calcul de coûts dans cette étude, mais la recette moyenne[439] s'élève à 380 € (± 514, prix calqués sur ceux d'un marché fermier). Les jardiniers produisent en moyenne 17 légumes différents, mais cela peut monter à 41, ce qui représente non seulement une certaine biodiversité, mais aussi une variété nutritionnelle intéressante.

Leur raisonnement sur l'autosuffisance est intéressant : il est basé sur l'idée qu'il faut 2.5 *cups* de légumes par jour pour un adulte, mais 5 *cups* s'il s'agit de légumes-feuilles[440]. Les auteurs pèsent le poids moyen d'une *cup*[441] pour un légume donné et peuvent ensuite convertir une récolte en *cups*, puis surtout en jours d'autosuffisance en légumes pour un adulte. En moyenne, un jardin produit neuf mois d'autosuffisance pour un adulte ; il doit donc pouvoir couvrir l'année avec un peu plus de 30 m^2. Nous n'avons pas, en l'espèce, de données sur les temps de travail et c'est bien dommage. Soulignons qu'avec une productivité deux fois moins élevée que dans l'étude précédente, il faut paradoxalement presque deux fois moins de terrain pour, ici, atteindre

---

[438] On ne sait pas à quel prix, il n'y a pas d'informations sur la fertilisation, l'irrigation... et pas d'étude de coûts.

[439] 422 $ en 2016.

[440] Une tasse américaine (*cup*) est une unité de volume qui vaut 0.236 litre.

[441] Si le résultat vous intéresse, j'ai mis en annexe leur fichier de conversion.

l'autosuffisance. C'est dire que le procédé de calcul a une *certaine* importance (voir plus loin en notes de bas de page).

Il est à remarquer que ces jardiniers mangent immédiatement 39 % de leur production, en stockent 31 % et en distribuent 30 %. La récolte bénéficie donc à d'autres personnes et permet au jardinier, comme le dirait un sociologue, de construire du capital social.

11.4.2 Autosuffisance urbaine

Lorsque l'on pense que la croissance de nos sociétés ne peut être infinie et que des chocs économiques, sociaux et environnementaux nous attendent, la résilience des villes face à des pénuries alimentaires est un sujet important. Hume et al. (2021) propose un cas d'étude avec la ville d'Adélaïde en Australie, une ville d'1.5 million d'habitants, avec un habitat assez étendu. Il s'agit, comme cela a été le cas avec les jardins de la victoire pendant la Seconde Guerre mondiale ou comme à Cuba, de transformer une partie de l'espace urbain en espace de culture.

Le premier problème est de calculer la surface qui peut être transformée. En l'espèce, les auteurs se limitent à des propriétés privées, et plus précisément, à leurs pelouses. Ils ne prennent pas en considération d'autres possibilités comme la transformation des toits ou des espaces verts publics, voire même d'une partie des rues[442].

Le deuxième problème est de définir les besoins. Leur raisonnement repose sur le fait qu'il y a, à Adelaïde, en moyenne 2.5 personnes par habitation et que chaque personne doit disposer de cinq rations de légumes par jour pour atteindre une *autonomie en légumes uniquement*[443]. Il semble, en effet, que l'agriculture urbaine doive se concentrer sur des productions horticoles (légumes et fruits) pour en tirer le bénéfice maximum et donc se contenter d'une autosuffisance

---

[442] On négligera aussi les fermes urbaines verticales, l'hydroponie, l'aquaponie ; on reste *les pieds sur terre* avec du low-tech.

[443] Des calculs similaires, d'une part, pour la ville beaucoup plus dense de Seattle, et d'autre part, visant un régime végétarien complet (avec céréales et légumineuses donc), ont montré qu'à peine 1 % de la population pouvait ainsi être nourrie (Richardson & Moskal, 2016).

partielle (Weidner et al., 2019). Martellozzo et al. (2014) démontrent en effet qu'on ne peut, en aucun cas, envisager de produire en ville suffisamment de céréales et de légumineuses[444], et dès lors, que légumes et fruits, qui sont moins mécanisables, hautement périssables, à plus grande valeur ajoutée, et qui permettent d'accroître la diversité alimentaire, doivent constituer l'essentiel de l'agriculture urbaine.

Le troisième problème concerne la productivité. Les auteurs, qui soulignent les grandes différences observées dans des potagers australiens, se basent sur trois scénarios[445] pour des pelouses transformées en potagers : 0.25, 5 ou 16 kg/m^2/an.

Il en résulte, pour nourrir en légumes 2.5 personnes, qu'il faut transformer respectivement 1 407, 67 et 21 m^2 de pelouse dans chaque habitation. On voit que le scénario moyen réclame environ 25 m^2 par personne pour une autonomie, un résultat légèrement inférieur à nos calculs précédents. La proportion de propriétés possédant assez d'espace pour une telle transformation est respectivement de $<$1 %, 69 % et 93 %.

Les auteurs remarquent que les productivités servant habituellement de base aux calculs proviennent de potagers dont l'objectif, de l'avis même de leurs propriétaires, n'est généralement pas d'atteindre l'autosuffisance. Ceux qui ont de telles motivations emploient des techniques bio-intensives et ont de meilleurs résultats (CoDyre et al., 2015). On peut penser que les jardiniers, en temps difficiles, se recentreraient sur la production.

Combien de temps de travail pour obtenir une autosuffisance avec une productivité moyenne ? Ils estiment que 20 minutes de travail par personne et par jour suffisent, soit un peu moins d'une heure par potager. En situation de pénurie alimentaire, cela semble, en effet, très supportable, mais les auteurs ont l'honnêteté de reconnaître que d'autres études présentent des estimations bien différentes et qu'elles ne concluent pas en ce sens.

---

[444] Tout simplement parce que la surface utilisée, dans le monde entier, pour cultiver des céréales est dix fois plus grande que la surface totale que représentent les villes.

[445] Adélaïde possède un climat plutôt favorable à l'agriculture.

11.5 Et en Europe ?

Les travaux précédents sont américains, australiens, canadiens, et il est bon de terminer par une étude européenne d'envergure (Glavan et al., 2018) qui compare les résultats obtenus dans trois villes : Ljubljana, Milan et Londres, villes aux climats assez différents (continental, méditerranéen et atlantique), mais probablement plus proches des contextes français. L'étude porte sur la saison poussante d'avril à octobre (28 semaines).

Le Tableau 21 montre que les tailles des jardins, qui sont à la fois des jardins partagés et des jardins privés, mais en tout cas des jardins urbains, sont assez variables, et sauf pour Milan, bien plus grandes que dans les études précédentes. Les espèces cultivées sont relativement différentes d'une ville à l'autre, pour des raisons de climat, d'espace disponible et probablement culturelles.

En ce qui concerne les calculs économiques, les prix du détail, qui datent de 2014, me paraissent assez bas, comparés à ceux du Tableau 20, même si nous les corrigions d'une sévère inflation ; et les coûts également. Des économies sont bien réalisées, mais s'avèrent modestes. On retrouve, si le coût du travail est inclus, que le résultat devient négatif, mais à ce sujet, les auteurs formulent une remarque que je trouve intéressante : il faut exclure ces coûts de travail du calcul et plutôt voir ces heures que les jardiniers passent dans leur jardin comme un investissement. Un investissement pour leur santé, physique et mentale, une croissance de leurs compétences et de leur réseau social, et, plus généralement, dans de la cohésion sociale et dans des services écosystémiques. Je traduirais cette idée en termes plus économiques : ce sont des *externalités* qu'il conviendrait de réintroduire dans le calcul économique.

En ce qui concerne l'autosuffisance, il est considéré qu'il faut, pour un adulte, cinq rations de 80 g soit 400 g de légumes par jour[446]. Avec

[446] Rappelons que, dans l'étude de McDougall et al. (2020), il fallait 2 078 Kcal à un adulte par jour, dont 14.7 % devait être constitué de légumes, soit environ 305 Kcal. En comptant, comme eux, 350 Kcal par kilo de légumes, ces calories journalières se convertissent en 870 g, soit deux fois plus que dans la présente étude.

les niveaux de productivité considérés, une personne peut être autosuffisante avec 101, 56 et 154 m^2 à Ljubljana, Milan et Londres. On voit que, si la productivité s'améliore (et dans les trois villes, on approche des 6 kg/m^2 pour les 10 % les plus productifs), un jardin de 25-30 m^2 semble convenir.

Tableau 21 : Comparaison des performances de potagers situés dans trois villes européennes (Glavan et al., 2018).

	Ljubljana	**Milan**	**Londres**
Nombre de potagers	105	33	42
Surface du potager (m^2)	104 ± 150	29 ± 17	133 ± 281
Productivité (kg/m^2)	1.44 ± 1.50	2.59 ± 1.44	0.95 ± 1.94
Top (10% meilleurs, en kg/m^2)	5.46	5.56	5.99
Heure de travail (h/année)	175	221	209
Intensité de travail (h/m^2)	1.69	7.53	1.57
Efficacité du travail (h/kg)	1.17	2.90	1.62
Prix du kilo (€)	1.35	1.60	2.67
Recettes (€ ; €/m^2)	201 / 1.94	121 / 4.24	325 / 2.44
Coûts (€ ; €/m^2)	102 / 0.99	106 / 3.70	104 / 0.78
Profit (€ ; €/m^2)	99 / 0.95	16 / 0.54	221 / 1.66
Autosuffisance (jours)	373 ± 340	190 ± 50	316 ± 718

Là encore, les auteurs soulignent que cette limite à la productivité paraît provenir de deux facteurs : les connaissances et compétences des jardiniers et leurs motivations qui sont, en premier lieu, la production d'une nourriture saine et la relaxation. Ils avancent que la situation européenne, avec une stabilité et une sécurité économique, doublée de subventions à l'agriculture, permet des prix bas de la nourriture, qui rendent secondaires les préoccupations comme la production et les économies. Pour l'instant, du moins.

> Du côté de chez Stéphane : Avec une petite expertise, il semble donc possible de produire les légumes suffisants à un adulte sur 25-50 m^2, en y consacrant de vingt minutes à une heure par jour ; mon expérience corroborant plutôt les valeurs hautes de ces fourchettes. La régularité a aussi une grande importance pour certaines activités : on arrose

Rappelons également notre remarque sur la différence avec l'étude de Conk et Porter (2016) où nous nous étonnions des résultats obtenus.

quotidiennement ses semis directs les premiers jours ; on procède de même durant la production de plants ; utiliser un châssis demande un soin identique[447] ; lutter efficacement contre les limaces de même...

Le gain financier annuel, hors prix du travail, est généralement inférieur à 1 000 euros. Les meilleurs gains semblent atteints avec des cultures verticales comme les tomates, les concombres, les poivrons (si on a le climat pour cela...), mais des successions rapides de diverses salades se révèlent aussi intéressantes économiquement.

11.6 De l'intérêt de la programmation linéaire

Ward et Symons (2017) proposent une modélisation intéressante afin de déterminer quelle surface allouer à quel légume (voire fruit) pour optimiser les profits. Deux aspects sont originaux. D'une part, la prise en compte primordiale des coûts d'irrigation, car étant localisés dans des régions au climat méditerranéen (sud de l'Australie), le déficit hydrique est important en été, et le coût de l'eau particulièrement élevé avec des tarifications par paliers[448] ; d'autre part, des contraintes judicieuses sur les quantités de légumes à produire, qui font qu'on ne peut pas produire, par exemple, que de la coriandre, qui est pourtant extrêmement intéressante en termes de recettes : il faut produire une diète équilibrée, donc au-delà du seuil de coriandre que l'on peut raisonnablement consommer, il convient de « passer à autre chose » et d'apporter des nutriments diversifiés et des calories. C'est bien évidemment ce qui se passe dans un potager nourricier, mais aussi chez les maraîchers professionnels qui présentent un banc ou des paniers « équilibrés » de légumes.

Le résultat de cette programmation linéaire, premièrement, c'est que dans tous les cas, il est possible de réaliser des économies en choisissant bien ses cultures, malgré des coûts d'irrigation importants.

---

[447] À moins d'ouvertures et d'irrigation automatisées.

[448] C'est-à-dire, au-delà d'une certaine quantité, qu'on change de prix, un système qui va probablement se développer en France aussi...

Deuxièmement, que les petits jardins (10-20 m^2) sont les plus rentables au mètre carré[449], car ils se concentrent sur des cultures à haute valeur ajoutée ; lorsque le jardin devient plus grand, il est inévitable de faire entrer d'autres cultures, pour équilibrer l'alimentation, mais qui sont moins intéressantes financièrement. Troisièmement, pour ce qui est du choix des cultures[450], les vedettes sont d'abord... les fraises, puis du basilic, des tomates, des courgettes, et même un peu d'élevage avec des œufs de poule ; pour les petits jardins, il vaut mieux éviter les courges, les haricots verts et les brocolis ; de façon intéressante, pour les grands jardins, en climat chaud nécessitant une large irrigation, il est même *suggéré de laisser une partie non cultivée* qui, sinon, coûterait plus qu'elle ne rapporte ! Toutefois, il faut prendre garde à ce que ces résultats ne sont pas directement transposables à un climat continental ou océanique français, ainsi qu'à des tarifications bien différentes de l'eau.

Il est à remarquer, dans les coûts, que sont intégrés les coûts de l'eau et de la fertilisation. En revanche, les auteurs considèrent, eux aussi, que l'activité de jardinage est une activité de loisir, à faibles coûts d'opportunité, et générant des externalités : par conséquent, le coût du travail n'est pas inclus. Ils vont plus loin et écartent les coûts en capital, puisque de toute façon, il faudrait bien acheter du matériel et des fournitures pour entretenir, ne serait-ce qu'une pelouse ou un jardin d'ornement, à la place du potager. Mais, à ce compte-là, il me semble qu'une pelouse demande également de l'irrigation ?

11.7 Protag€r

Cette section est particulière dans le sens où, pour une fois, nous nous reposerons moins sur la littérature académique que sur des ouvrages pour le grand public : ouvrages écrits par des maraîchers professionnels, spécialisés dans la culture sur petites surfaces. Ils sont en effet particulièrement bien placés pour faire avancer notre réflexion

---

[449] Mais aussi en termes d'efficience de l'eau.

[450] L'article est disponible en ligne, vous pouvez consulter les graphiques de la figure 5, très interprétables, décrivant les choix optimaux selon la taille du jardin.

sur les techniques et astuces permettant de réaliser des économies au potager : puisqu'ils en vivent !

Afin d'organiser un exposé de ces considérations pratiques assez disparates, nous allons raffiner l'équation 11.1, pour poser la formule suivante, et en examiner, tour à tour, les constituants :

$$\text{Profit} = \text{Prix} \times \text{Productivité} \times \text{Surface} - \text{Coûts} \qquad \text{(Eq. 11.2)}$$

11.7.1 Prix

La plupart de ces ouvrages insistent sur la nécessité d'inclure d'abord des cultures à haute valeur ajoutée, mais également de pouvoir présenter des « paniers » assez complets, ce qui rejoint la recherche théorique précédente de Ward et Symons (2017). Le prix *premium* que sont prêts à payer leurs consommateurs pour des produits biologiques fait que, plutôt que de fixer les prix des légumes sur la base des prix pratiqués par les supermarchés, comme c'est le cas dans beaucoup d'études que nous avons citées, il vaudrait mieux avoir pour référence les prix des légumes biologiques, qui sont grosso modo 30 % au-dessus. De surcroît, ceux issus du jardin sont, eux, toujours d'une fraîcheur irréprochable. Certains sont aussi prêts à faire un geste pour une nourriture locale. Mieux encore, Head et al. (2004) disent que ce qui sort du potager n'est pas, pour les jardiniers, de la (simple) nourriture, mais bien une catégorie particulière : de la nourriture « faite maison[451] », catégorie qui implique une plus-value symbolique.

Une autre correction à effectuer est qu'il est difficile d'en définir le prix pour certaines productions du potager. Ainsi, les immigrés (Head et al., *op. cit.*) cherchent à cultiver des espèces qui ne sont parfois pas présentes commercialement. De la même façon, de nombreux jardiniers ramènent de leurs voyages des idées de nouvelles cultures, voire même directement des graines. Personnellement, j'aime ainsi dénicher des plants à Troyes. Il s'agit donc d'une *valeur culturelle*, voire de nostalgie, qui vient ici s'ajouter. C'est le cas des légumes asiatiques que je présente dans la partie « Cabinet de curiosités » ; on y trouve aussi des légumes oubliés, rarement proposés à la vente. De nombreuses

[451] *Home-grown food.*

variétés (par exemple de tomates) ne sont jamais commercialisées et il existe même des cultivars locaux qui ont une *valeur d'héritage*.

Nul doute qu'un économiste parviendrait à accorder un prix à ces légumes d'un autre type, par une technique comme le consentement à payer ou alors par imitation du prix qu'acceptent les restaurants étoilés pour se réserver des légumes d'exception. Nous sentons bien que le prix de la chicorée italienne, dont les graines ont été amenées par le grand-père lors de sa venue en France, puis reproduites au cours des générations, va largement excéder celui d'une scarole de supermarché.

11.7.2 Productivité

Les ouvrages cités qualifient souvent leurs pratiques de culture bio-intensive. Une première caractéristique de cette approche est la densité élevée des plantations, ce qui ne nous surprendra guère, eu égard à la relation entre densité et récolte[452] évoquée au chapitre sur les interactions végétales. Jeavons (2017) donne, en particulier, des espacements très faibles, en comparaison d'un ouvrage plus classique (Maynard & Hochmuth, 2007).

Une deuxième caractéristique est l'accélération des successions, et Fortier (2012) est alors à consulter en priorité. Il s'agit d'établir une planification rigoureuse qui permette, dès qu'un espace a été récolté, d'aussitôt pouvoir y débuter une nouvelle culture. De plus, en installant des plants plutôt qu'en semant, il est encore possible de gagner du temps et Fortier, là encore, donne de nombreux autres avantages des semis indirects. Il existe également des techniques de chevauchement de cultures qui permettent, par exemple, d'en installer une nouvelle alors que l'autre n'est pas encore récoltée ; ou bien d'en installer deux à la fois, l'une étant rapidement récoltée et l'autre ayant ensuite de la place pour continuer sa croissance : ces procédés ne sont pas nouveaux et l'on en découvrira des variantes à la lecture de Moreau et Daverne (1846).

Une troisième caractéristique est l'extension de la saison. Si Coleman (2020) a été l'un des pionniers de la culture de légumes en hiver, il me

[452] Plus la densité est importante, et plus la production l'est ; ce qui n'est pas le cas pour la production moyenne par plant, en revanche.

semble que l'ouvrage de Palme (2021) est particulièrement abouti et je le recommande vivement. On sera surpris de constater, même sans couverture de culture, que de nombreuses espèces parviennent à passer l'hiver, si rigoureux soit-il. ; évidemment, c'est encore plus efficace, et à coûts minimaux, avec un simple mini-tunnel ou un voile de croissance. Inversement, il devient de plus en plus difficile de cultiver en été, et là aussi, il existe des espèces potagères mieux adaptées au changement climatique, dont on peut trouver une description dans la partie « Cabinet de curiosités ».

Une quatrième caractéristique est l'organisation du travail. Les professionnels ont une véritable réflexion concernant la réalisation des tâches nécessitant la plus grande charge de travail (récolte, irrigation, gestion des mauvaises herbes), les gestes optimaux[453], le bon niveau d'outillage, les déplacements et la standardisation des planches. Sur ce dernier point, la méthode du *SPIN farming* (Christensen, 2015), peu connue en France[454], propose ainsi des planches de 0.60×8 mètres : une largeur facile à enjamber et convenant bien à de petits engins motorisés, une longueur en rapport avec celle des tuyaux d'arrosage, et une surface totale qui permet une recette de 100 $ par récolte, d'après les inventeurs de la méthode. Fortier (2012) insiste sur l'intérêt de cette standardisation des planches : on sait alors quelle quantité de fertilisants, d'irrigation, de plants pour chaque espèce, de longueur de couverture de sol ou de culture sont nécessaires.

La planification des cultures se rattache bien sûr à l'organisation du travail. Les professionnels savent en quelles quantités, et à quel rythme, il convient d'installer les cultures, afin de pouvoir disposer de raisonnables volumes de vente. C'est la même chose pour le jardinier amateur : installer, en même temps, 50 plants de laitue va nous amener, un mois et demi plus tard, à une quantité trop élevée pour la consommation d'une famille, sachant que la laitue ne peut guère être prolongée au champ, ni conservée au froid très longtemps. Il est

---

[453] Rapides, bien sûr, mais aussi ergonomiques, afin de pouvoir durer dans le métier.

[454] Mais il est vrai, non traduite, et avec un prix de l'ouvrage de référence absolument prohibitif !

probablement préférable d'opter pour cinq installations de 10 plants, à chaque fois à 15 jours d'intervalle...

11.7.3 Surface (small is beautiful but small)

CoDyre et al. (2015) recueillent, comme les autres auteurs académiques d'ailleurs, des résultats de production très diversifiés, certains n'arrivant tout bonnement pas à couvrir leurs coûts ; et il s'agit, selon eux, plutôt de la norme que de l'exception. En termes de ration alimentaire, le jardin médian (12.5 m^2) ne produit de la nourriture que pour une seule personne sur une durée d'un mois. On est donc aussi très loin de l'autosuffisance.

Ils pensent cependant que cette diversité est porteuse d'espoir, car ils relèvent, en premier lieu, que ce sont bien les jardiniers les plus expérimentés qui obtiennent les meilleurs résultats. En second lieu, une des meilleures performances est pourtant réalisée par un jardinier qui n'a qu'une année d'expérience, mais qui applique des méthodes bio-intensives de production. On peut donc apprendre vite !

Une fois les compétences acquises, les auteurs préconisent aussi d'augmenter la surface des potagers. Or, Csortan et al. (*op. cit.*) indiquent que les potagers[455] plus petits présentent plus d'inputs et plus de production (au mètre carré, bien sûr) : ils sont cultivés plus intensivement donc. Cela rejoint l'étude théorique de Ward et Symons (*op. cit.*), concluant que la taille de potager optimale, pour la productivité (en kilos et en dollars par m^2) et l'efficience en eau, est de 10-20 m^2 pour une personne. Toutefois, agrandir la surface peut en effet augmenter la production totale et le profit final. Mais ce sont alors les pratiques mêmes qui doivent changer : soit en passant moins de temps par mètre carré, tout en conservant une productivité correcte ; soit en remplaçant le travail humain par de la mécanisation. Les professionnels du bio-intensif ont ainsi innové avec une mécanisation minimale, mais très adaptée à leur contexte, qu'ils ont d'ailleurs largement contribué à créer (Coleman, 2020 ; en particulier). Lorsque les surfaces grandissent encore, les pratiques (nombre de cultures, espacements, système d'irrigation, lutte contre les ravageurs

[455] Leurs tailles s'étendent de 4 m^2 à 731 m^2.

par exemple) se modifient encore, avec des engins plus puissants, mais nous sommes alors à une échelle qui dépasse le jardinier amateur. Il n'en reste pas moins que ce dernier, selon sa forme physique, le temps qu'il peut consacrer à son potager, la place dont il dispose et les investissements qu'il peut s'autoriser, peut combiner de multiples façons productivité et surface.

Csortan et al. (*op. cit.*) soulignent, en outre, que multiplier les approches : culture classique de légumes, culture sur buttes, culture en contenants, petit élevage, verger, aquaculture... C'est certes lisser au cours de l'année les périodes de production et les accidents, mais c'est aussi se disperser ; et les résultats, par unité de surface, en termes de temps de travail, de production et de bénéfices s'en ressentent. Un certain degré de spécialisation leur semble nécessaire.

11.7.4 Coûts

Le premier problème est celui de l'accès à la terre. Il est particulièrement aigu en ville, où les solutions peuvent aller de la culture en contenants sur balcon à l'adhésion à un jardin partagé ; en passant par la création de jardins sur les toits, de cultures éphémères dans des friches industrielles, et plus originale, l'utilisation d'espaces inoccupés chez d'autres personnes, en échange, par exemple, de légumes gratuits ou de l'entretien du terrain, une innovation du *SPIN farming* (Christensen, *op. cit.*).

En ce qui concerne le matériel, il n'est pas rare que des professionnels, à leurs débuts, s'en sortent avec de l'occasion ou de l'auto-fabrication ; le jardinier amateur pourra aussi trouver des serres, des motoculteurs et des outils de seconde main. La plupart des professionnels ne produisent pas leurs graines[456], mais en revanche, très souvent une partie de leurs plants. Les maraîchers trouvent aussi des sources d'approvisionnement à bas prix pour leurs engrais et leurs amendements. Mais il est rare qu'ils produisent eux-mêmes le compost, pour des raisons de temps, d'espace, mais aussi de compétences ; avec

[456] C'est, d'après Fortier (2012), un autre métier, avec ses compétences spécifiques ; cela prend aussi du temps et de l'espace...

un compost commercial, on est alors (presque) certain de disposer d'un produit de qualité (Fortier, 2012).

L'eau est souvent la ressource la plus rare au potager, sauf pour les heureux ayant un puits ou une rivière sur leur terrain. Nous avons vu l'impact que pouvait représenter une irrigation intégrale à l'eau municipale (qui est généralement la règle en ville), particulièrement en climat chaud. La récupération d'eau est donc un bon sujet de conclusion pour ce chapitre.

11.7.5 Récupération de l'eau

Outre le problème du coût que représente l'eau du robinet pour le jardinier, il s'avère qu'il y a des demandes concurrentes à son sujet, avec, de plus en plus, de mesures de rationnement en certaines saisons, et probablement à moyen terme, des systèmes de tarification plus pénalisants[457]. Il existe deux grandes voies d'économie : la collecte des eaux pluviales et la réutilisation des eaux usées.

Collecte des eaux pluviales

Parlons d'abord de la collecte des eaux recueillies sur des surfaces imperméables. Lorsqu'elles tombent sur des routes, des trottoirs, des parkings, il existe des risques de contamination qui font que c'est plutôt l'eau des toits qui est intéressante.

Un premier avantage est que le ruissellement est évité, avec une eau qui serait « perdue pour le sol », et incidemment, pour la nappe phréatique. Un deuxième avantage est que l'économie d'eau potable est gagnée, certes pour les finances du jardinier, mais aussi pour des utilisations concurrentes, et plus indirectement, pour les gaz à effet de serre : produire de l'eau potable nécessite en effet de l'énergie et implique donc une empreinte carbone que l'on peut évaluer (Parece et al., 2016). Le dernier avantage est que l'eau, si elle est stockée dans une mare ou un bassin, peut alors contribuer à la biodiversité.

---

[457] Je ne parle même pas des considérations morales sur le gâchis de l'eau. Un petit coup d'œil au film « Marcher sur l'eau » d'Aïssa Maïga peut faire douloureusement prendre conscience de sa valeur.

Pour évaluer le potentiel d'eau récupérable (URV, *usable rainwater volume*, en m^3), il suffit de connaître la surface au sol du toit (S, en m^2), la quantité totale de précipitations pendant une période donnée (P, en m... pas en mm), et on utilise une approximation :

$$URV = S \times P \times C$$

avec C qui est un coefficient d'efficacité de la récupération, souvent fixé à 0.8, tenant compte des pertes dues aux éclaboussures et à l'évaporation.

Afin de donner un exemple, je récupère de l'eau concernant la moitié de mon toit d'environ 70 m^2 de surface au sol ; il est tombé en moyenne, sur la période 1991-2020, 720 mm par an, soit $P = 0.72$; ce qui donne : $URV = (70/2) \times 0.72 \times 0.8 \sim 20\ m^3$. Une autre façon de voir les choses est que cela correspond à ce qui est tombé sur $(70/2) \times 0.8 = 28\ m^2$, je peux donc doubler l'eau totale sur un potager d'une surface « équivalente ».

Bien entendu, cela ne répond pas aux questions de la couverture des besoins et du dimensionnement des équipements de stockage nécessaires (et de leur coût), questions autrement plus difficiles. Pour mieux saisir pourquoi j'esquive ces difficiles questions, je laisse le lecteur curieux prendre connaissance de l'article, disponible en ligne, de Smith et al. (2009), qui tente d'y répondre.

Potager de pluie

Les jardins de pluie (*rain garden*) sont un dispositif, usuellement urbain, visant à collecter les eaux de pluie, à nouveau principalement sur les toits ; et à les diriger, un peu à l'écart des fondations de la maison, vers une zone contenant des couches de terre, de sable et de graviers. Des plantes, capables de résister, à la fois, à la sécheresse et à l'engorgement, voire de filtrer les polluants, y sont installées. Il s'agit essentiellement de limiter le ruissellement vers les eaux de surface, entraînant de l'érosion et une diminution de leur qualité.

Richards et al. (2015) en proposent une variation : le potager de pluie. Il consiste à remplacer les plantes usuelles des jardins de pluie, souvent des espèces indigènes et pérennes, par des légumes, dont on sait qu'ils sont bien plus sensibles aux conditions hydriques extrêmes. Les auteurs ont mis au point deux dispositifs assez lourds, avec ou sans

un liner sous les graviers (pour mieux retenir l'eau) ; ils ont en outre utilisé de la subirrigation. Leurs résultats s'avèrent intéressants : production assez correcte, limitation de l'irrigation supplémentaire (surtout avec le liner) et bonne infiltration au lieu de ruissellement (surtout sans le liner). Il faut noter qu'ils ne prétendent pas ainsi proposer une version exclusive et définitive : ils limitent aussi l'eau par une irrigation déficitaire ; ils ont un réservoir pour un petit stockage, permettant de disposer, aux périodes difficiles, d'une eau supplémentaire ; ils envisagent également de conduire l'eau plus en surface, comme c'est le cas dans le jardin de pluie classique, plutôt qu'avec une subirrigation, où la remontée par capillarité s'est avérée décevante.

Cela rejoint aussi des pratiques de construction de fossés, de retenues, de terrasses, de bassins, en utilisant les courbes de niveau du paysage, pratiques qui étaient au cœur des débuts de la permaculture[458].

Réutilisation des eaux grises

Que sont les eaux grises ? Contrairement aux eaux noires qui contiennent de l'urine et des fèces, les eaux grises, provenant du travail domestique[459], *semblent* plus simples à recycler.

Que fait-on avec ces eaux grises[460] ? Premièrement, il est possible de les employer dans les toilettes, au lieu de l'usuelle eau potable ; la consommation correspondante, importante dans les foyers, est en quelque sorte « épargnée » et peut, par conséquent, servir à une redistribution au potager. Deuxièmement, il est envisageable d'irriguer pelouses et plantes ornementales, ce qui, à nouveau, permet de redistribuer au potager l'eau potable épargnée. Troisièmement, mais c'est là plus délicat et mérite des précautions, comme nous le verrons

---

[458] Mollison, B. (2018). *Introduction à la permaculture*. Passerelle éco.

[459] Lavage du linge et de la maison, cuisine, douche... Cela représente 50-75 % de la consommation domestique.

[460] On peut aussi en produire moins : en baissant la consommation d'eau sur d'autres postes (hygiène, cuisine, lavages), cela en laisse d'autant plus pour le potager.

plus avant : on peut imaginer utiliser les eaux grises, de temps à autre, et plutôt diluées, directement au potager.

C'est d'ailleurs le cas, dans de nombreux pays en voie de développement, particulièrement en ville, où les problèmes de sécurité alimentaire font passer au second plan des risques potentiels de contamination humaine, de pollution des sols ou de dégradation des eaux souterraines. Une telle réutilisation permet parfois de réduire jusqu'à 50 %, l'eau potable employée pour l'irrigation[461] ! Notons que ces eaux grises, outre des éléments problématiques comme des métaux lourds ou des pathogènes, peuvent aussi contenir des éléments nutritifs pour les plantes. Plusieurs pays développés, dans leurs régions les plus arides, ont sérieusement commencé à encourager et à encadrer leur réutilisation, et à promouvoir des dispositifs de traitements individuels (Radingoan et al., 2020).

Mais que risque-t-on alors ? Le problème de ces eaux grises est qu'elles sont très diverses et contiennent des composants fort différents ; il s'avère, en fait, impossible de mener une analyse générale des risques encourus, et les études focalisent sur les éléments potentiellement les plus nocifs pour l'être humain, en particulier les pathogènes. Ces derniers proviennent de trois sources : les matières fécales[462], la manipulation de la nourriture (*e.g.* Salmonelle), et plus rarement, sont des opportunistes qui prospèrent sur la peau ou le nez des individus. Les maladies se contractent alors soit par contact direct avec l'eau, soit par consommation de plantes contaminées. Maimon et al. (2010) font une évaluation des risques sur la base des rotavirus, et par équivalence, sur la fameuse bactérie *Escherichia coli*. Leur conclusion est que de très petites concentrations sont suffisantes pour dépasser un risque acceptable (fixé à un an de vie en bonne santé perdu parmi un million de personnes par an[463]) : *l'utilisation des eaux grises*

---

[461] 20 millions de fermiers dans le monde emploient des eaux grises non-traitées ou partiellement traitées, pour l'irrigation de leurs cultures.

[462] Le taux est forcément bien plus bas que dans les eaux noires, mais la plupart des études indiquent néanmoins leur présence.

[463] Bien évidemment, ces méthodes statistiques sont des analyses de risques et bénéfices : dans des régions pauvres et arides, où le stress sur l'eau et sur la nourriture est important, les risques acceptables sont fixés à un plus haut niveau.

non-traitées n'est donc pas sans danger. Leur premier conseil est de mettre en place un traitement de ces eaux à l'aide de dispositifs agréés ou de désinfectants. Si ce n'est pas possible, il vaut mieux écarter les eaux de cuisine[464], ce que suggèrent d'ailleurs de nombreuses réglementations dans divers pays. Pour les autres eaux grises, il existe des précautions d'emploi, dites barrières à l'exposition, comme de ne pas stocker cette eau (car les pathogènes ont alors le temps de se développer), d'utiliser des contenants ou tuyaux spécifiques, de ne pas arroser par aspersion[465]. Je conclurai ce chapitre par une phrase des auteurs : « à présent, des millions de personnes emploient des eaux grises, avec peu ou pas de traitements, sans savoir le mal potentiel que leurs activités *bien intentionnées* peuvent causer. »

11.8 Références académiques

Algert, S. J., Baameur, A., & Renvall, M. J. (2014). Vegetable output and cost savings of community gardens in San Jose, California. *Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics, 114*(7), 1072-1076.

Boulianne, M., & Proteau, J. (2020). *Formes et significations du jardinage d'autoproduction : une ethnographie des potagers domestiques québécois*: rapport de recherche.

Christensen, R. (2007). SPIN-Farming: advancing urban agriculture from pipe dream to populist movement. *Sustainability: Science, Practice and Policy, 3*(2), 57-60.

Christensen, R. (2015). SPIN-Farming for skeptics : how it works. *Landscapes/Paysages*, *17*(2), 32-33.

CoDyre, M., Fraser, E. D., & Landman, K. (2015). How does your garden grow? An empirical evaluation of the costs and potential of urban gardening. *Urban Forestry & Urban Greening, 14*(1), 72-79.

---

[464] Alors qu'on aurait pu les penser assez inoffensives...

[465] Je renvoie pour d'autres stratégies au tableau 3 de leur article, disponible en ligne : https://www.academia.edu

Conk, S. J., & Porter, C. M. (2016). Food gardeners' productivity in Laramie, Wyoming: More than a hobby. *American Journal of Public Health, 106*(5), 854-856.

Csortan, G., Ward, J., & Roetman, P. (2020). Productivity, resource efficiency and financial savings: An investigation of the current capabilities and potential of South Australian home food gardens. *PloS one, 15*(4), e0230232.

Duchemin, E., Wegmuller, F., & Legault, A. M. (2008). Urban agriculture: multi-dimensional tools for social development in poor neighbourhoods. Field Actions Science Reports. *The Journal of Field Actions, 1*.

Glavan, M., Schmutz, U., Williams, S., Corsi, S., Monaco, F., Kneafsey, M., ... & Pintar, M. (2018). The economic performance of urban gardening in three European cities–examples from Ljubljana, Milan and London. *Urban Forestry & Urban Greening, 36*, 100-122.

Hanon, I. (2015). Agriculture urbaine et autogestion à Cuba. *Revue Internationale de l'Économie Sociale*, *337*, 84-99.

Head, L., Muir, P., & Hampel, E. (2004). Australian backyard gardens and the journey of migration. *Geographical Review, 94*(3), 326-347.

Hume, I. V., Summers, D. M., & Cavagnaro, T. R. (2021). Self-sufficiency through urban agriculture: Nice idea or plausible reality?. *Sustainable Cities and Society*, *68*, 102770.

Langellotto, G. A. (2014). What Are the Economic Costs and Benefits of Home Vegetable Gardens?. *The Journal of Extension, 52*(2), Article 14. https://doi.org/10.34068/joe.52.02.14

Maimon, A., Tal, A., Friedler, E., & Gross, A. (2010). Safe on-site reuse of greywater for irrigation-a critical review of current guidelines. *Environmental Science & Technology, 44*(9), 3213-3220

Martellozzo, F., Landry, J. S., Plouffe, D., Seufert, V., Rowhani, P., & Ramankutty, N. (2014). Urban agriculture: a global analysis of the space constraint to meet urban vegetable demand. *Environmental Research Letters, 9*(6), 064025.

Maughan, N., Pipart, N., Van Dyck, B., & Visser, M. (2021). The potential of bio-intensive market gardening models for a

transformative urban agriculture: Adapting SPIN farming to Brussels. In C. Tornaghi and M. Dehaene (Eds.), *Resourcing an agroecological urbanism* (p. 144-165). Routledge.

McDougall, R., Kristiansen, P., & Rader, R. (2019). Small-scale urban agriculture results in high yields but requires judicious management of inputs to achieve sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *116*(1), 129-134.

Mok, H. F., Williamson, V. G., Grove, J. R., Burry, K., Barker, S. F., & Hamilton, A. J. (2014). Strawberry fields forever? Urban agriculture in developed countries: a review. *Agronomy for Sustainable Development, 34*, 21-43.

Orsini, F., Gasperi, D., Marchetti, L., Piovene, C., Draghetti, S., Ramazzotti, S., ... & Gianquinto, G. (2014). Exploring the production capacity of rooftop gardens (RTGs) in urban agriculture: the potential impact on food and nutrition security, biodiversity and other ecosystem services in the city of Bologna. *Food Security, 6*, 781-792.

Parece, T. E., Lumpkin, M., & Campbell, J. B. (2016). Irrigating urban agriculture with harvested rainwater: case study in Roanoke, Virginia, USA. In T. Younos and T.E. Parece (Eds.), *Sustainable Water Management in Urban Environments* (p. 235-263). Springer.

Radingoana, M. P., Dube, T., & Mazvimavi, D. (2020). Progress in greywater reuse for home gardening: Opportunities, perceptions and challenges. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 116*, 102853.

Richards, P. J., Farrell, C., Tom, M., Williams, N. S., & Fletcher, T. D. (2015). Vegetable raingardens can produce food and reduce stormwater runoff. *Urban Forestry & Urban Greening, 14*(3), 646-654

Richardson, J. J., & Moskal, L. M. (2016). Urban food crop production capacity and competition with the urban forest. *Urban Forestry & Urban Greening, 15*, 58–64.

Smith, A., & Esterer-Vogel, E. (2009). The Water-Wise Vegetable Garden: An Analysis of the Potential for Irrigation through Rainwater Harvesting in Sunny Northern California.

Tahara, S., Shioyama, S., Kurita, H., & Terada, T. (2011). A quantitative assessment of agricultural production from allotment gardens. *Journal of The Japanese Institute of Landscape Architecture 74*(5), 685-688.

Ward, J., & Symons, J. (2017). Optimising crop selection for small urban food gardens in dry climates. *Horticulturae, 3*(2), 33.

Weidner, T., Yang, A., & Hamm, M. W. (2019). Consolidating the current knowledge on urban agriculture in productive urban food systems: Learnings, gaps and outlook. *Journal of Cleaner Production, 209*, 1637–1655

Zainuddin, Z., & Mercer, D. (2014). Domestic Residential Garden Food Production in Melbourne, Australia: a fine-grained analysis and pilot study. *Australian Geographer, 45*(4), 465-484.

11.9 Autres références

Coleman, E. (2020). *Maraîchage biologique - la méthode d'Eliot Coleman, techniques et outils de culture*. Actes Sud éditions.

Fortier J.M. (2012). *Le jardinier maraîcher. Manuel d'agriculture biologique sur petite surface*. Ecosociété éditions.

Maynard, D.N., & Hochmuth, G.J., (2007). *Knott's Handbook for Vegetable Growers*. John Wiley & Sons.

Jeavons, J. (2017). *How to Grow More Vegetables:(and Fruits, Nuts, Berries, Grains, and Other Crops) Than You Ever Thought Possible on Less Land with Less Water Than You Can Imagine*. Ten Speed Press.

Moreau, J. G., & Daverne, J. J. (1846). *Manuel pratique de la culture maraîchère de Paris*. Vve Bouchard-Huzard.

Palme W. (2021) *Le potager au cœur de l'hiver*. Tana éditions, Paris.

12 « Un potager produit plus que des légumes[466] »

Historiquement, le potager a d'abord eu une fonction utilitaire : se nourrir. Au dix-neuvième siècle, les propagateurs des jardins ouvriers, comme en France la *Ligue du coin de terre et du foyer*, y ont ajouté des préoccupations morales. Lors des guerres mondiales, le potager a aussi été un lieu d'expression du patriotisme. Mais la fonction économique n'a jamais été absente et est revenue au premier plan lors de différentes crises économiques, ainsi aux États-Unis : panique de 1893, grande dépression de 1929 ou *jardins de récession*, suite à la crise de 2009.

C'est à la fin des années 1960 que la contre-culture s'est emparée du potager, dans un contexte de considérations environnementales naissantes et d'opposition à la société consumériste.

Plus récemment, des choix pour une nourriture plus saine, plus locale et plus durable (en ce qui concerne sa production), qui sont porteurs d'un espoir de changement social et d'un souhait de reconnexion à la nature, se sont exprimés à travers cette activité potagère (Mok et al., 2014).

En tout cas, le potager est à présent un espace où les jardiniers et les jardinières s'investissent financièrement, physiquement, créativement et émotionnellement.

Pourquoi ? Ce sont leurs motivations dans cette entreprise que nous allons, en premier lieu, découvrir.

Et pour quoi ? Nous énumérerons, en second lieu, les quelques bénéfices (non-monétaires) qui peuvent en découler, que ce soit au niveau individuel ou collectif. Mais il faudra aussi parler de quelques coûts !

---

[466] Une *accroche* tirée de Draper et Freedman (2010).

12.1 Motivations des jardiniers amateurs

Chalmin-Pui et al. (2021) ont interrogé plus de 6 000 jardiniers anglais[467] sur leurs motivations. Très clairement, ce sont des affects positifs, comme la joie, le plaisir (de voir les plantes pousser, par exemple) et l'amour de l'activité qui dominent. Le jardinage s'affiche ici pleinement en tant qu'activité de loisir.

On trouve aussi comme motivations importantes : l'expérience sensorielle ; le fait d'être au plein air ; la possibilité de s'exprimer et d'être créatif, à travers le jardin ; le calme et la relaxation pouvant en être retirés ; voire l'occasion de se livrer à une certaine forme d'introspection.

Les motivations en termes de santé sont présentes, mais ne sont pas premières. Nous verrons, plus avant, que de tels bénéfices, et particulièrement des bénéfices psychologiques, existent. Ils sont d'ailleurs souvent reconnus par les jardiniers eux-mêmes, il en va ainsi, comme nous l'avons dit, de la relaxation qu'entraîne l'activité ; mais il s'agit rarement, là, de la véritable raison de leur engagement.

Des motivations comme la production de légumes sains ou les économies pouvant être réalisées sur la nourriture apparaissent également comme secondaires ; cependant, dans cette étude, nous ne sommes pas seulement en présence de jardiniers de potagers, mais plus souvent de fleurs et de plantes ornementales (bien que les deux activités ne soient, bien sûr, pas exclusives).

Il est, en revanche, rare que la fourniture de services écosystémiques soit déclarée, à l'exception de la promotion de la biodiversité. Il semble en effet que ces avantages du jardinage, que nous soulignerons dans le chapitre suivant, ne soient pas bien identifiés par les jardiniers (se révélant, peut-être, trop indirects).

Il faut, pour finir, noter que toutes les motivations ne sont pas « positives ». Certaines personnes ressentent une pression sociale à devoir garder leur jardin « propre ».

---

[467] Cet échantillon n'est pas forcément représentatif : il s'agit de participants volontaires ; on parle ici du jardin, en général, et plus du seul potager.

Nous avons, dans cette étude, affaire à des jardiniers dans leurs jardins privés. Dans des jardins collectifs[468], il est nécessaire, d'une part, de distinguer les motivations des institutions qui peuvent régir le jardin et celles des jardiniers ; et d'autre part, on peut, dans un tel contexte, voir apparaître plus explicitement des motivations de sociabilité ou d'appartenance à une communauté (Draper & Freedman, 2010).

Nous allons maintenant détailler les bénéfices, attendus ou pas, que peut apporter l'activité potagère.

12.2 Bénéfices du jardinage en termes d'expression de soi[469]

Le jardin fournit d'abord des plaisirs sensoriels, particulièrement des plaisirs visuels. Lorsque l'on propose de choisir des photos de paysages, il s'avère que les personnes testées sélectionnent massivement des images de type savane : de grandes étendues naturelles herbacées, avec quelques arbres et des points d'eau ; comme si cela était une réminiscence de notre passé de chasseurs-cueilleurs (Frumkin, 2001). Ces images sont décrites comme étant paisibles, tranquilles et relaxantes. Les jardiniers parlent volontiers de la joie de regarder la nature, de sa beauté, d'être aux premières loges pour observer le cycle de la vie. Il est aussi important que cette nature puisse être aperçue depuis l'intérieur de leur maison.

Le regard peut se faire plus contemplatif, le jardin est alors un lieu de méditation ; mais pour certains, le regard se retourne vers soi, dans une introspection ; d'autres y voient l'occasion de « philosopher », sur la vie et la mort, des limaces en particulier ; d'autres encore ont une vue plus large, qui situe le potager comme espace politique de résistance local au système alimentaire ; parfois, le regard file vers de vastes horizons spirituels, en relation avec « Mère Nature » ; le jardin

---

[468] Qui comprennent, à la fois, des jardins familiaux (à parcelles individuelles) et des jardins partagés (toute la surface est cultivée en groupe).

[469] Les éléments de cette section sont tirés, sauf mention contraire, des articles de Freeman et al. (2012) et McFarland et al. (2018).

est enfin occasion d'une nostalgie, de revoir le passé, la tradition, les pratiques des ancêtres, de reprendre à son compte les variétés de légumes qu'ils affectionnaient. Le jardin peut faire lien avec les disparus : un arbre, né d'une bouture offerte, les rappelle à notre mémoire... Pour le jardinier amateur, tout le temps passé au potager ne lui est donc pas consacré, ce qui explique des temps de travail souvent plus importants par rapport aux professionnels ; et la présence de chaises, longues ou plus courtes, et de tables. Le jardin est littéralement un *passe-temps*. Mais, de façon plus ambiguë, le jardin est aussi vu comme un espace de productivité, et donc un lieu qui n'est pas oisif : on considère qu'on ne perd pas son temps en le faisant. En ce qui concerne les femmes, il a été suggéré que cette activité est un loisir qu'elles s'autorisent facilement, malgré leur grande charge de travail, car elle peut être considérée comme un prolongement de leur prise en charge du travail domestique : s'occuper de la cuisine (et donc des légumes) et de la maison : décoration et propreté du jardin qui est ainsi une sorte de pièce extérieure (McFarnad et al., 2018). Plusieurs études centrées sur le genre et la « maison » ont estimé que cette dernière était, pour l'homme, le lieu de la récupération et du loisir, alors qu'elle était, pour la femme, celui du travail payé et non-payé, et en général, que leur loisir restait souvent imprégné et entrecoupé par ce double-travail. Les relations de genre peuvent se voir réaffirmées dans le jardin, où les hommes cherchent souvent à imposer un contrôle sur son ordonnancement, mais aussi y être renégociées, afin que les femmes puissent pleinement y exprimer leur créativité (Bhatti & Church, 2000).

Le regard posé sur le jardin peut aussi être celui du curieux, de l'observation scrupuleuse consignée dans des carnets, voire de l'expérimentation : le potager devient alors un challenge intellectuel, une occasion d'apprendre. C'est pourquoi de nombreux programmes éducatifs incluent des jardins ou des potagers afin de permettre aux enfants de se mieux nourrir (connaissances en nutrition, plus grande consommation de fruits et de légumes et modification des préférences alimentaires) ; de bouger plus ; de développer des compétences relationnelles (relations et respect des autres) et leur sens des responsabilités ; de faire preuve de meilleures attitudes environnementales ; et d'améliorer leurs résultats académiques (Draper

& Freeman, 2010). Certains jardiniers amateurs aiment accueillir des écoles dans leur potager pour une visite pédagogique.

La beauté peut aussi être créée par le jardinier, il y a une volonté d'embellissement de sa propriété, et au-delà, de son voisinage. C'est évidemment le cas avec les fleurs et les plantes ornementales, mais, même au potager, on retrouve des « effets esthétiques » dans sa conception, dans le mélange avec des fleurs, dans des effets de couleur et dans des constructions originales, ce que n'ont pas manqué de remarquer les ethnologues : gloriette décorée, clôtures diverses, brouette bac à fleurs, anciens outils agricoles mis en scène, nain de jardin, mais aussi les plus modernes jardin-mandala et spirale d'aromatiques[470]. On trouvera, dans la thèse de Vincent Larbey[471], une série de photographies de diverses composantes du décor de potagers, ainsi que des éléments d'analyse.

Le potager offre également l'occasion de développer des compétences pratiques et d'enregistrer des réussites dont le jardinier tire une certaine fierté, surtout en partageant sa production ; mais aussi d'acquérir un certain pragmatisme, face aux inévitables échecs. L'estime de soi et la réalisation de soi, les deux plus hauts niveaux de la pyramide des besoins humains de Maslow, en sortent renforcées, ce qui a été montré dans des jardins communautaires, particulièrement chez des populations marginalisées (Waliczek et al., 1996).

En somme, les jardiniers éprouvent souvent le sentiment que le jardin devient, au fil du temps, plus important pour eux (« it's my life »), qu'il leur ressemble de plus en plus et qu'il forme une composante de leur identité ; et pour reprendre le titre de l'article de Freeman et al. (2012) : « My garden is an expression of me ». C'est pourquoi, pour les personnes âgées qui ne peuvent plus assurer correctement l'entretien de leur lieu favori, la situation prend un tour doublement dramatique.

---

[470] La créativité n'est pas qu'esthétique au potager, le jardinier peut auto-fabriquer ou améliorer des outils ou équipements, il peut innover en ce qui concerne les itinéraires techniques, etc.

[471] Larbey, V. (2013). *Jardins et jardiniers : les pieds dans la terre, la tête dans les nuages. Une anthropologie du potager* (Doctoral dissertation, Université Paul Valéry-Montpellier III). Disponible en ligne : https://hal.science

12.3 Bénéfices du jardinage en termes de santé

Dans un contexte où les maladies « de civilisation » (maladies cardio-vasculaires, diabète, obésité, dépression) se répandent, il apparaît de plus en plus clairement, pour le monde scientifique, que le contact avec la nature a des capacités thérapeutiques (voir plus loin). Or, les jardins sont le lieu le plus quotidien du contact avec la nature qu'ont les personnes, particulièrement en ville. Ce petit bout de nature, suffit-il vraiment à améliorer leur santé ? Soga et al. (2017) ont réalisé une méta-analyse[472] à ce sujet. Ils décrivent comme robuste, la preuve que le jardinage procure des bénéfices pour la santé. Tout d'abord, et ce sont là les effets les plus importants, pour la santé psychique : le jardinage accroît le bien-être subjectif et les émotions positives, et réduit la dépression, l'anxiété et les émotions négatives ; et ceci, même lors d'une exposition assez brève à cette activité. Dans le cas d'une exposition plus longue, certains effets sont observés au-delà de trois mois. À plus long terme encore, particulièrement avec une pratique journalière, le jardinage améliore aussi la santé physique, évaluée par des variables physiologiques telles que l'indice de masse corporelle, la vigueur, le rythme cardiaque. On note également des modifications de comportement en ce qui concerne la nutrition. Des résultats sont, en outre, relevés en termes de santé sociale : plus de sens de la communauté, plus de sociabilité. Les effets les plus spectaculaires sont relevés dans le cadre de thérapies horticulturales. Enfin, les auteurs insistent sur le fait qu'il n'est point besoin d'une grande surface pour cette pratique et qu'elle reste peu onéreuse, en tout cas comme intervention thérapeutique ! Nous allons successivement développer tous ces avantages, du jardinage sur la santé ; mais nous noterons quand même au passage quelques inconvénients. Les éléments concernant la sociabilité seront traités dans la section suivante.

---

[472] À mon sens, bien menée, l'un des reproches souvent adressés aux méta-analyses est le biais de publication, c'est-à-dire que les résultats qui sont publiés sont surtout ceux qui sont statistiquement significatifs (un résultat non-significatif intéresse moins les éditeurs !), ce qui augmente artificiellement la taille de l'effet observé ; ici, des corrections statistiques ont été apportées pour en minimiser l'ampleur.

12.3.1 Nutrition

L'intérêt de la consommation des fruits et légumes pour la santé n'est plus à démontrer, elle permet, entre autres, de limiter les risques de maladies cardiovasculaires et de cancer (Dias, 2012). Bien que les recommandations changent d'un pays à l'autre, il est considéré, en France, qu'il vaut mieux consommer au moins cinq fruits et légumes par jour.

Les légumes contiennent en effet des éléments (protéines, vitamine C, vitamine A, fibres, calcium, fer et diverses substances phytochimiques) qui sont particulièrement importants ; les légumes sont aussi peu pourvus en éléments problématiques[473] (gras saturé, sucre ajouté, sel). On peut résumer cette qualité nutritive par différents indices, dont le NRF (*nutrient-rich food*) qui donne, *pour une ration classique de cette nourriture,* une mesure de la présence de ces bons éléments, contrebalancée par celles des mauvais. Sur cette échelle, les légumes sont alors, avec les fruits et les légumineuses, bien plus hauts que les viandes, les poissons, les produits laitiers, les céréales, et cela va de soi, les sucreries, les gâteaux ou les sodas (Drewnowski, 2013). Tous les légumes ne se valent pourtant pas ! On trouve en tête, étonnamment, la patate douce, puis par ordre décroissant : tomate, légumes-feuilles « foncés » (bette, choux), courge, courgette, salades, pomme de terre.

Le problème est que les légumes sont souvent présentés comme étant assez chers. En effet, lorsque l'on calcule, pour un euro, soit les calories, soit le poids correspondant à chaque type de nourriture, ils se retrouvent à la traîne, ce qui est dû à leur teneur très élevée en eau. De là vient que mes étudiants, et les autres personnes à faibles revenus, privilégient les pommes de terre (ou les pâtes). Mais, lorsque l'on détermine le nombre de nutriments obtenus pour un euro, c'est-à-dire le NRF de la ration divisée par le prix de la ration, le résultat est tout autre (Drewnowski, 2013). On en a alors pour son argent avec les légumes ! Ainsi, nos calculs du chapitre précédent, que ce soit en poids

[473] Des « plats » cuisinés peuvent être inclus dans la comparaison.

ou en calories, sont à revoir dans cette perspective. *Un potager, plus que des légumes, produit des nutriments*.

Deux choses, enfin, sont essentielles à prendre en considération. Ces nutriments se dégradent rapidement, que ce soit sous l'effet du temps, même avec une bonne technique de conservation, ou sous l'effet du mode de préparation (Balan et al., 2016). La Figure 121 nous présente, pour quatre légumes différents, l'évolution de leur contenu en vitamine C, d'une part, lorsqu'ils sont conservés à 4-6 °C, et d'autre part, lorsqu'ils sont bouillis plus ou moins longtemps. On constate clairement qu'aller chercher directement une laitue dans le potager pour la consommer de suite la rend plus nutritive qu'une laitue achetée dans un magasin, bio ou pas. Et on constate aussi que le travail du potager peut être gâché par un mauvais mode de préparation (longue cuisson, ajouts de gras, de sucre, de sel, accompagnement systématique par des viandes).

D'ailleurs, dans le chapitre précédent, lorsque nous avions estimé la productivité horaire, il n'avait pas été évoqué un des coûts du potager : le « surtravail domestique » (Delay et al., 2014). Une fois la récolte faite[474], il faut soit la conserver, soit la consommer. Les deux options impliquent du temps et des savoir-faire spécifiques, pour lesquels on assiste souvent à une division du travail genrée dans le couple (hétérosexuel). Il faut éplucher, blanchir, cuisiner. Il faut même, lorsque le légume n'est pas très classique, trouver des recettes. Il faut souvent improviser, car le potager n'est pas exactement un supermarché où l'on trouve, à tout moment, tout ce que l'on veut... Ceci explique pourquoi certains jardiniers se contentent de produire des légumes plus « prêts à l'emploi », comme des tomates ou des laitues...

Les sociologues à l'écoute des jardiniers entendent souvent l'expression « on sait ce qu'on mange », qui peut avoir plusieurs acceptions (non-exclusives). La première, plutôt issue des classes populaires, fait allusion au fait que, lorsqu'on produit et consomme ses

[474] Et, bien entendu, toute la production de ces légumes avant, qui est aussi un surtravail domestique (que l'on peut s'éviter en allant tout simplement acheter ses légumes).

légumes, c'est au prix d'une grande quantité de travail, et un travail maîtrisé, dont les conditions de production nous sont connues : ce sont alors « nos propres légumes », loin de ceux, « anonymes », du supermarché ; ils sont parés symboliquement de tous ces efforts et d'autres qualités (fraîcheur, goût). La seconde acception, plutôt issue des classes moyennes et supérieures, souligne que ces légumes sont produits dans des conditions connues, sans pesticides, sans fertilisants chimiques ; et entrent alors dans une stratégie de santé qui inclut l'exercice pratiqué au potager, au plein air, et la saine cuisine qui sera concoctée... Il se peut aussi, pour les professions intellectuelles, que se mêle la satisfaction de produire manuellement un résultat plus matériel que leurs productions habituelles. Dans les deux cas, on voit que ces légumes ont un petit quelque chose en plus qui fait la fierté de leur jardinier.

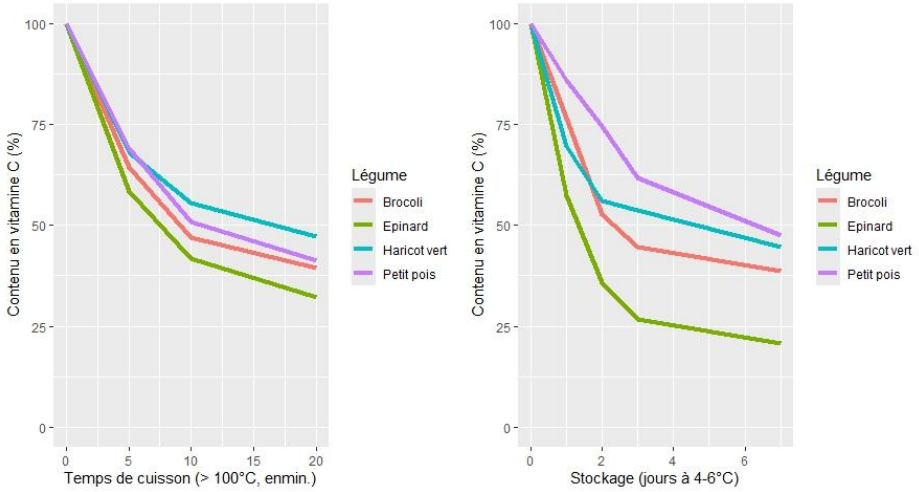


Figure 121: Perte de qualité (vitamine C en % du contenu initial) en fonction de la durée de cuisson à l'eau bouillante (en minutes) et de la durée de stockage à 4-6 °C (en jours) pour quatre légumes : brocoli (contenu initial : 34.5 mg/100g), épinard (35.4 mg/100g), haricot vert (15.2 mg/100g) et petit pois (21.2 mg/100g). Données tirées de Balan et al. (2016).

Reste encore la différence entre la production biologique et conventionnelle. La revue systématique sur 55 articles de Dangour et al. (2009) montre que, sur 13 nutriments, il y a très peu de différences

statistiquement significatives[475]. On relève plus d'azote dans les produits conventionnels et plus de phosphore dans les produits biologiques, ce qui est conforme à leur mode de fertilisation ; mais la taille de ces différences n'est pas en mesure de produire de véritables effets sur la santé.

Alaimo et al. (2008) s'intéressent à la relation entre la participation à un jardin collectif et la consommation de fruits et légumes. Grâce à un sondage bien construit[476] de la population de Flint (USA, 120 000 hab.), ils déterminent, et cela est statistiquement significatif, que les « jardiniers[477] » consomment 1.4 fruits et légumes de plus par jour et qu'ils ont 3.5 fois plus de chances de dépasser la quantité conseillée de cinq rations quotidiennes ; ceci après contrôle de diverses variables socio-démographiques et de santé (indice de masse corporelle, exercice physique, consommation de tabac ou d'alcool). Il est important de souligner que ces jardins ont été, à l'origine, créés afin de prévenir la violence ; or, on s'aperçoit d'un bénéfice supplémentaire en termes nutritionnels, et donc en termes de santé, qui peut servir d'argument additionnel de justice alimentaire (les participants sont majoritairement des Afro-Américains) pour encourager leur développement. Le potager peut être un gagne-pain pour certains, mais c'est aussi un *gagne-légumes*.

12.3.2 Santé physique

Frumkin (2001) recense plusieurs études étonnantes sur l'effet, non pas d'une vue sur la mer, mais d'une vue sur la nature : l'effet que peut avoir la simple vision d'un paysage sur la santé physique. Ainsi, dans une prison, les détenus ayant une « vue » sur la cour intérieure, plutôt que sur la campagne environnante, demandent plus fréquemment à

---

[475] Ce qui rejoint mes premières notes de lecture concernant ce sujet dans le chapitre sur la santé biologique du sol.

[476] Ce qui n'est pas toujours le cas dans les études sur le sujet, où les méthodologies sont parfois bancales, mais ici, il s'agit d'un sondage par quotas des plus de 18 ans, n=766, avec redressement pour les non-réponses, avec des mesures de consommation bien validées et des analyses statistiques contrôlant de nombreuses variables de confusion.

[477] En fait, les personnes dont un membre du foyer participe à un jardin collectif.

voir un docteur (+24 %). De même, des patients ayant une chambre avec vue sur des arbres ont une hospitalisation plus courte (un jour de moins) et nécessitent moins de médication. Dans une situation que je trouve particulièrement angoissante, la salle d'attente d'un dentiste, une grande *image murale* de la nature fait baisser la pression artérielle des clients (et l'anxiété qu'ils déclarent).

Des bénéfices spectaculaires ont été aussi obtenus avec la thérapie horticulturale : il s'agit tout bonnement de s'engager à cultiver des plantes en pots. Ces bénéfices ont été observés avec des personnes souffrant du cancer du sein (Unruh, Smith, & Scammel, 2000), avec des personnes âgées (Yee Tse, 2010) et avec des enfants (Blair, 2009).

En ce qui concerne plus précisément le jardinage, Van den Berg et al (2010) relèvent que des personnes participant à des jardins partagés, par rapport à celles de leur voisinage, font montre d'une activité physique plus importante en été - un jour de plus par semaine - et que les plus âgés (>62 ans) déclarent moins subir de contraintes physiques, se plaignent moins de leur santé, et vont plus rarement chez le médecin.

Park et al. (2014) ont réalisé une étude afin de mesurer l'intensité physique[478] en jeu dans diverses tâches de jardinage. Chez des adultes âgés de 20 à 30 ans, la plupart des tâches (ratisser, biner, griffer pour désherber, mulcher, semer, récolter, arroser ; dans l'ordre décroissant d'effort) sont considérées comme d'intensité moyenne ; seul le bêchage est classé en intensité forte. Leur étude précédente, sur les personnes de plus de 65 ans, avait montré que les activités équivalentes correspondaient à des dépenses d'intensité moyenne, mais aussi d'intensité faible. Sachant que les recommandations sont de 30 minutes d'exercice d'intensité physique moyenne par jour, le jardinage régulier peut donc être considéré comme une véritable activité physique. Les auteurs soulignent même, par rapport à d'autres activités, que celle-ci a le mérite de se dérouler en plein air, de n'être pas monotone et de rester peu coûteuse. Ils citent, enfin, d'autres études où la pratique du jardinage a engendré une baisse de la pression artérielle, du taux de

[478] Ce sont, en gros, des mesures de consommation d'oxygène pendant l'effort de type VO_2max, mais aussi de rythme cardiaque.

cholestérol et des problèmes de fonctionnalité des mains chez les personnes âgées.

Concernant cette population spécifique, Nicklett et al. (2016) ont réalisé une revue de littérature sur les bénéfices physiques du jardinage et ils nous apprennent essentiellement... qu'on ne sait pas grand-chose ! Les rares études qu'ils ont identifiées (8) sont souvent mal organisées, portent sur de très petits échantillons et s'avèrent d'une durée trop courte. Elles ont donc bien du mal à conclure sur d'éventuels bénéfices fonctionnels de l'activité. C'est fort dommage, car le jardinage et la marche constituent les deux activités les plus courantes chez les personnes âgées et nous avons vu, au-dessus, que le jardinage était une activité d'intensité faible à modérée.

Un enseignement à retirer de leur revue est aussi que, si le jardinage ne semble pas produire de blessures, de nombreuses personnes éprouvent un mal de dos lors de son exercice. Ce qui nous amène à soulever le point suivant : la santé physique peut, inversement, avoir un effet sur le jardinage ; d'autant que les pratiquants sont souvent âgés. Les barrières les plus courantes à l'activité sont le mal de dos, l'arthrite et les problèmes articulaires (Chalmin-Pui et al., 2021).

Ceci dit, le jardinage peut quand même occasionner de vrais maux, comme le montre une étude menée en Suisse sur les accidents de jardinage (Schaudt et al., 2019). La Suisse compte un peu plus de 8 millions d'habitants ; et chaque année, 16 000 personnes ont un accident lors de la pratique du jardinage de loisir (soit 0.2 %). Sur les patients de plus de 16 ans, admis dans un service d'urgence hospitalier à Berne[479], on observe d'abord des blessures au visage (>50 %), particulièrement aux yeux, et secondairement aux mains (>15 %). De simples mesures de prévention, comme le port de lunettes et de gants lors de certaines activités, auraient pu les éviter. Les manches longues sont également conseillées et une attention plus importante doit être accordée aux piqûres de tiques. Enfin, comme les chutes sont souvent l'occasion de blessures, un aménagement du jardin est nécessaire (*e.g.* pour éviter les glissades).

---

[479] On ne parle donc pas de *petits bobos*...

12.3.3 Santé psychique

Les jardiniers déclarent dans plusieurs études que le jardin est un refuge, qui leur permet d'échapper au stress du travail, au stress de la vie en ville, et même... à leur famille. Il leur permet aussi de se distancier du monde commercial, en produisant eux-mêmes leurs légumes, en les offrant, en bouturant.

L'action restauratrice de la nature et ses bénéfices en termes de santé sont bien établis ; c'est le champ d'action de l'écopsychologie. Mais il s'agit, là, de travaux sur une nature « sauvage », d'aller dans cette nature ; ce qui nous intéresse, c'est une nature plus banale, celle des jardins. Freeman et al. (2012) soulignent que les scientifiques se sont finalement assez peu penchés sur ces espaces et sur l'activité de loisir qu'est le jardinage. Seuls les jardins collectifs ont été largement étudiés par les sciences sociales, alors que les jardins privés sont presque *terra incognita*. Étrange, car ces jardins couvrent une surface importante (8 % en Flandre, par exemple, selon Dewaelheyns et al., 2014) et l'on estime, en France, que ce sont sept personnes sur dix qui ont accès à un jardin[480] ! Ils sont un lieu paradoxal, dans lequel la nature rencontre la culture. Pour nombre d'entre nous, particulièrement en ville, « le jardin permet à la nature d'entrer dans la vie quotidienne ». Que sait-on alors des effets que peuvent avoir ces jardins sur la santé psychologique ?

Premièrement, dans toutes les études recueillant qualitativement leurs impressions, les jardiniers n'ont de cesse de témoigner de nombreuses émotions positives (joie, plaisir...).

Deuxièmement, les jardins permettent une restauration de l'attention (Young et al., 2014 ; voir explication plus loin), mais de façon différenciée selon le type de jardin considéré : les jardins collectifs s'avérant plus efficaces sur ce plan, même une fois diverses variables socio-démographiques contrôlées. Les auteurs soulignent l'intérêt de cette différence : les individus bénéficiant de jardins collectifs sont, en effet, dans leur majorité, d'un niveau socio-économique plus faible, mais, du fait de ce jardin (collectif), l'étude montre qu'ils se restaurent

---

[480] *Les Français et leur jardin : une relation en transition*. Enquête Unep-Ifop 2022.

plus, ce qui permet un effet, sans doute limité, de rattrapage des inégalités sociales, inégalités bien connues en termes de santé. La biodiversité a également un effet (indirect et faible) sur la restauration : des plantes plus nombreuses, de tailles et de couleurs différentes, forment un paysage plus complexe, dont on a, par ailleurs, montré l'effet positif sur la restauration. Les auteurs, là encore, soulignent l'intérêt de ce lien : promouvoir la biodiversité dans le jardin, c'est, d'une part, augmenter les services écosystémiques qu'il procure, et d'autre part, prendre soin de sa santé !

Troisièmement, l'étude déjà citée de Chalmin-Pui et al. (2021) démontre que des bénéfices en termes de bien-être subjectif sont clairement reliés à la fréquence du jardinage (dans un jardin privé, n=6 015) ; la même conclusion s'est imposée pour les jardins collectifs (Van den Berg et al., 2010). D'autres études ont, par différents moyens, confirmé ces résultats, ainsi que l'effet positif du jardinage sur la qualité de vie en général.

Quatrièmement, le jardin permet une réduction du stress perçu, comme l'observent Chalmin-Pui et al. (*op. cit.*) ou Stigsdotter et Grahn (2004) sur 953 individus sélectionnés aléatoirement et représentatifs de la population suédoise. Plus fort, le jardin permet de réduire le niveau de cortisol, la fameuse « hormone du stress », plus qu'une autre activité comme la lecture (Van Den Berg & Custers, 2011). Toutefois, Young et al. (2020) remarquent que le jardin, en lui-même, peut également être générateur de stress fréquent chez certains (16 % de leur échantillon, n=301), pour lesquels il doit rester bien tenu ou productif malgré les aléas climatiques et autres ; ce stress réduit alors d'autant l'effet de restauration du jardin.

Cinquièmement, le jardinage est même employé comme traitement dans le cadre de maladies mentales avec la thérapie horticulturale ; l'idée n'est pas nouvelle, car employée depuis le dix-neuvième siècle. Au-delà du simple contact avec la nature, ces psychothérapies permettent aussi des contacts sociaux et le développement de compétences professionnelles. Certains auteurs suggèrent l'adéquation particulière du jardin pour aborder des sujets potentiellement menaçants, comme le sexe et la mort, qui sont des événements quotidiens au potager. Une première revue de littérature de 2003 concluait que, si les résultats semblaient globalement positifs, les

méthodologies employées étaient défaillantes ; au point qu'on pouvait considérer les preuves de l''efficacité thérapeutique comme insuffisantes. Clatworthy et al. (2013) couvrent les dix années suivantes et se limitent aux interventions sur des adultes. Ils ne trouvent que dix articles exploitables, dans lesquels des statistiques plus convaincantes de l'effet positif de ces interventions sont présentées, sur la réduction de la dépression et de l'anxiété, et sur l'amélioration de l'estime de soi et de l'attention. D'autres observations, plus qualitatives, suggèrent des bénéfices d'expression de soi, de sociabilité, de santé physique... Rien de bien nouveau : en définitive, les malades mentaux sont... comme les autres... Toutefois, ces nouvelles expériences souffrent encore de plusieurs défauts : manque d'un véritable groupe de contrôle, échantillon auto-sélectionné, échantillon de petite taille, défaut de randomisation ; il est difficile de savoir sur quelle période les effets de l'intervention se prolongent ; et surtout, ces interventions sont de nature très variable, comment savoir ce qui est véritablement efficace ? La conclusion prudente des auteurs est que « ces interventions *peuvent* avoir des bénéfices pour des *personnes ayant un intérêt pour les activités de jardinage*, en *addition à d'autres traitements*. »

12.4 Bénéfices du jardinage en termes de sociabilité

L'Organisation Mondiale de la Santé définit la santé comme un état de bien-être complet : mental, physique et *social*, et pas seulement une absence de maladie ou d'infirmité.

12.4.1 Capital social

Dans une sorte de lettre d'opinion, Eng et al. (2019) citent de nombreuses études décrivant les partages récurrents de légumes effectués par les jardiniers amateurs et leurs conséquences. La nourriture, en effet, ne vise pas qu'à nourrir les êtres humains, elle a aussi un rôle social : « Dans toutes les sociétés, la commensalité, qui est le processus de manger ensemble, de donner ou de recevoir de la nourriture, renforce les relations et l'appartenance au groupe » d'après

Quant et al. (2001). Dans leur étude consacrée à des personnes âgées américaines vivant à la campagne, ils observent que 54 % donnent des produits de leur jardin et 81 % en reçoivent. Cela augmente les relations, la réciprocité, la confiance et génère des normes sociales quant au partage. Les sociologues parlent de capital social pour décrire la ressource que constitue un réseau de bonnes relations, permettant d'atteindre certains buts hors de portée individuelle (chez des populations marginalisées, en particulier).

Eng et al. (*op. cit.*) ajoutent assez finement que ce partage est également l'opportunité d'exprimer de la gentillesse et une joie de leur vie, qui sont pratiquement impossibles à exprimer verbalement dans certaines cultures, sans éprouver de culpabilité envers des gens plus en difficulté. Or, il a été suffisamment démontré que les comportements prosociaux, tels que le partage, tout comme l'expression de bonnes nouvelles, conduisent à plus de bonheur et de satisfaction de vie.

Les jardiniers n'échangent pas que des légumes, mais aussi des fleurs, des outils, des conseils, des repas, des recettes, de la culture (celle de leur communauté) ou des histoires (celles de leur famille[481]). Ces échanges se font avec la famille, avec les amis, avec les voisins, avec les collègues de travail ou avec les autres participants dans un jardin collectif. Certaines personnes vont d'ailleurs explicitement dans ce type de jardin pour aussi y cultiver des relations humaines (Draper & Freedman, 2010).

L'aspect intergénérationnel est fréquemment mis en relief dans toutes ces relations, que ce soit au sein de la famille entre grands-parents et petits-enfants, avec un vieux voisin « qui s'y connaît » ou qui a besoin d'un petit coup de main pour bêcher, ou avec les participants d'âge avancé qui, grâce à un jardin collectif, sortent de leur isolement. Oui, le jardinage est l'occasion de se faire un pote âgé !

> Du côté de chez Stéphane : La pratique du potager conduit aussi à participer à des groupes informels, permaculturels par exemple, ou à des associations, qui organisent des rencontres, des visites chez leurs membres ou chez des

[481] Bisous, Maman !

maraîchers professionnels. C'est la possibilité d'échanges de conseils, de graines, de boutures ou de matériels, voire d'achats en commun.

De plus, un intérêt se développe généralement pour les jardins remarquables, qui deviennent l'objet d'un tourisme vert, souvent régional, qui peut d'ailleurs avoir lieu en groupe. On peut y piocher de nouvelles idées (Symes et al., 2023).

12.4.2 Cohésion sociale

C'est dans les jardins collectifs que ce bénéfice a été étudié, et surtout aux États-Unis. En effet, ces lieux visent, le plus souvent, des objectifs explicitement sociaux : potager d'école, de prison, de centre médical, de centre social. La revue de littérature sur les jardins collectifs urbains de Guitard et al. (2012) montre que, sur 87 articles académiques, le thème des bénéfices sociaux, comme l'accroissement des interactions sociales, et au-delà, de la cohésion sociale de la communauté ou de sa résilience, a été le plus discuté par les auteurs (52 fois), et que la plupart (36) ont trouvé, dans leurs données, des éléments de preuve en ce sens. Amstrong (2000), à New York, observe que ces jardins font parfois place à des activités de musique et de théâtre ; que les participants y apprennent l'existence d'autres organisations locales et peuvent s'y engager ; que des activités d'embellissement et de plantation d'arbres ont, à la suite, eu lieu dans le quartier ; et que les gens surveillent plus les actes de délinquance pour protéger le voisinage.

À ce sujet, dans Guitard et al. (*op. cit.*), un autre bénéfice largement évoqué (23 fois) est un effet sur la réduction de la criminalité ; cependant, les démonstrations en sont moins nombreuses (6). La prévention de la criminalité peut être à l'origine de la création d'un jardin collectif ou est parfois citée, sur le mode anecdotique, comme un de ses bénéfices collatéraux. Si les variations de taux de criminalité n'ont pas été véritablement mesurées, les déclarations de certains participants semblent aller dans ce sens (Draper & Freedman, 2010). Toutefois, les coordinateurs des 63 jardins étudiés par Amstrong (*op. cit.*) témoignent, quand même, d'actes de vandalisme sur la moitié

d'entre eux. On restera, par conséquent, circonspect tant que les preuves n'auront pas été mieux établies. De façon générale, les bénéfices réels des jardins collectifs sont parfois difficiles à attester, car les méthodologies des études scientifiques à leur sujet souffrent très souvent de défaillances (Draper & Freedman, *op. cit.*).

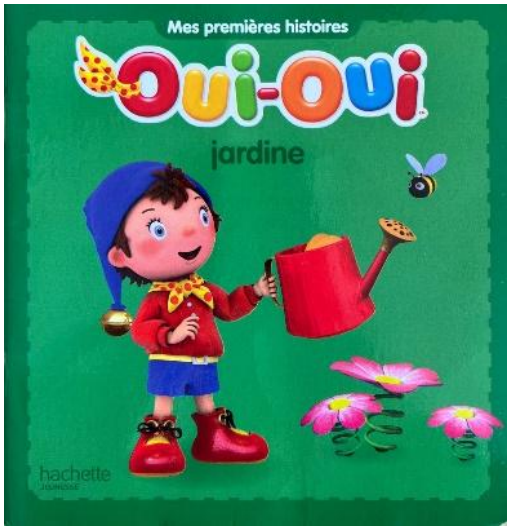


Figure 122 : Les jardins collectifs, un monde merveilleux ?
(Référence : Oui Oui jardine, Hachette).

Récemment, une littérature plus critique concernant les jardins collectifs[482] a fleuri. La fonction d'inclusion, de personnes en difficulté (pauvres, immigrées) et du voisinage, qui reste au cœur des discours des institutions qui les organisent, comme les municipalités, mais aussi des jardiniers qui y participent, a été remise en cause. Il est d'abord apparu qu'une sorte de gentrification se produisait dans ces jardins, où l'on finissait par se retrouver dans un certain entre-soi, qui plus est, parfois, en fort décalage avec le quartier environnant. Plusieurs travaux, cités dans Jettner et Secret (2020), démontrent des processus d'exclusion socio-économique ou raciale. Les deux auteurs remarquent que, si les jardins collectifs occasionnent des bénéfices, ils ne le font pas automatiquement pour tous, et pas de façon égale. Ces jardins, certes, permettent de constituer du capital social, mais il convient de distinguer, en son sein, d'une part, le support social, qui a un effet sur

[482] Mais aussi les mouvements alimentaires alternatifs.

le bien-être, et d'autre part, les ressources instrumentales : informations, contacts, coups de main qui permettent l'accès à d'autres capitaux. Leur étude montre que les jardins collectifs parviennent à augmenter les relations interraciales, donc le support social, ce qui n'est déjà pas si mal, mais pas forcément l'accès des plus pauvres à d'utiles ressources.

L'étude de Bally (2024), qui se déroule à Lyon, indique des limites similaires : tous les participants aux jardins collectifs possèdent le bac, voire pour les deux tiers une licence ; en outre, leurs prénoms sonnent étrangement français[483], dans des quartiers que les guides de voyage qualifient de multiculturels. Mais l'auteur indique, aussi, deux autres dispositifs d'exclusion. D'une part, tout bonnement les clôtures, installées pour protéger la production et la tranquillité des alentours la nuit, font que les jardins sont, de fait, fermés au voisinage, sauf quand un jardinier s'y trouve. D'autre part, entre les jardiniers eux-mêmes, les compétences et le style particulier de jardinage mis en avant (permaculture) ne sont pas accessibles à tous : la fonction de production remplace, ici, celle d'inclusion. Le jardin collectif peut donc exclure de multiples façons. La dernière phrase de l'article élargit ses réflexions concernant les jardins collectifs à l'échelle de la cité : « Est-ce que la *ville verte*, que souhaitent aujourd'hui bon nombre d'habitants et d'acteurs de l'aménagement, peut être à la fois écologique et inclusive ? ».

12.5 Bénéfices de la biophilie

12.5.1 Biophilie, autres théories et jardinage

L'être humain a été, pour la majeure partie de son histoire, intégré à la nature. Edward Wilson, dans un premier temps, a proposé un concept qu'il a appelée biophilie : « il existe un lien inné émotionnel d'affiliation des êtres humains aux autres organismes vivants », ce lien a été étendu, par la suite, aux paysages, aux océans, au vent... La

[483] Ceci dit, à part Pierre Rahbi, on ne peut pas dire que ceux qui écrivent sur les jardins et le potager soient d'origine très exotique, en France.

biophilie suggère que le bien-être des êtres humains est connecté au bien-être de la nature. Dès lors, perdre ce lien, c'est aller mal ; et vivre dans une nature dégradée, c'est aller mal. Le problème vient du fait que les êtres humains ont, récemment, largement perdu le contact avec la nature : on estime que, dans les pays développés, les individus passent 95-99 % de leur vie à l'intérieur (Chalquist, 2009) !

Dans un deuxième temps, avec l'aide de Stephen Kellert, Edward Wilson a réuni des considérations anecdotiques, mais heureusement aussi des études plus étayées de diverses disciplines, mettant en évidence les bienfaits de la connexion avec la nature ; l'intuition initiale s'est transformée en ce qu'on appelle une théorie ancrée : l'hypothèse biophilie, qui a alors stimulé une vague de travaux scientifiques, tant théoriques qu'empiriques.

En ce qui concerne le jardinage, les deux théories, inspirées de la biophilie, qui se proposent d'expliquer son effet positif sont la restauration de l'attention (Kaplan, 1995) et la réduction du stress (Ulrich, 1983). La théorie de la restauration de l'attention ne traite que du fonctionnement cognitif. Elle prétend qu'il y a deux types d'attention : l'attention dirigée, qui réclame des efforts et permet de résoudre des problèmes, et la fascination, qui n'en réclame pas et n'a pas de buts spécifiques. La quantité d'attention dirigée est limitée, et lorsqu'elle est dépensée, il y a besoin de la restaurer : et c'est là qu'entre en jeu la fascination. Or, cette dernière semble constituer le type d'attention prépondérante lorsque nous sommes dans la nature ou bien lorsque que nous sommes à l'œuvre au jardin. Il a été suggéré que le jardin permet de sortir du quotidien (*being away*) et d'avoir sous les yeux un espace plus étendu (fascination) ; il est, de plus, *compatible*[484] (c'est-à-dire que cet environnement peut se prêter à l'activité de nature projetée, en l'espèce, le jardinage). Plusieurs études démontrent, de façon convaincante, que les environnements naturels restaurent effectivement l'attention. Les personnes les plus désignées pour ce type de bénéfices sont celles qui souffrent de troubles de l'attention ou de problèmes de mémoire.

---

[484] Ces trois composantes constituent la *Perceived Restorativeness Scale*, l'échelle de mesure la plus courante de la restauration attentionnelle.

La réduction du stress traite en revanche du fonctionnement émotionnel et physiologique. Elle postule que l'être humain est prédisposé à trouver relaxants les stimuli naturels[485]. L'exposition à de tels stimuli génère des émotions positives et déclenche des réactions du système nerveux parasympathique qui conduisent à des impressions de bien-être et de relaxation. Là aussi, des expérimentations avalisent cette théorie, avec diverses progressions significatives de mesures émotionnelles ou physiologiques (rythme cardiaque).

Le jardin et le potager sont, certes, des lieux pour renouer le contact avec la nature, mais au-delà, ce sont des lieux d'interaction avec elle. Or, ces interactions ne sont pas toujours faciles, ce sont de véritables relations avec la nature, pas des discours à son sujet. Le jardinier doit se confronter aux mauvaises herbes, aux bioagresseurs, au climat... et finalement accepter échecs et succès. Le désir de contrôle de la nature se tempère de compromis, avec souvent des relations émotionnellement fortes avec les plantes (Freeman et al., 2012).

12.5.2 Design biophilique et urbanisme biophilique

Quinze ans plus tard, Stephen Kellert tire les conséquences de l'hypothèse biophilie dans le domaine de l'architecture, en proposant le design biophilique. L'objectif est de « créer de bons habitats, pour les êtres humains, pour la nature et les autres êtres vivants, dans des villes modernes [...] en fournissant des cadres et des activités qui encouragent les interactions entre les espèces, afin d'améliorer mutuellement leurs conditions de vie » (Lefosse et al., 2023).

Il y a eu de nombreuses applications ou expériences, dont on a pu apprécier les effets, par exemple ceux causés par un éclairage à la lumière naturelle par rapport à une lumière artificielle (Shishegar & Boubekri, 2016). Il est intéressant de noter que ces effets sont déclenchés soit par un contact direct avec la nature, soit par un contact indirect, comme une simple image ou forme. Lefosse et al. (*op. cit.*) passent en revue soixante années de littérature sur les bénéfices de la biophilie[486], avec un focus sur l'architecture. Ils qualifient ces bénéfices

[485] Pas ceux de type attaque de tigre, bien entendu.
[486] Même avant qu'elle ne s'appelle ainsi...

de bien documentés, car il s'agit de situations à petite échelle avec des effets qui peuvent être constatés très rapidement. Ils décrivent des avantages déjà relevés précédemment, comme le bien-être physique (régulation physique, régulation du système immunitaire) ; les bénéfices cognitifs (augmentation de l'attention, de la mémoire, de la créativité, des capacités d'apprentissage et d'adaptation) ; les bénéfices émotionnels (plaisirs esthétiques, émotions positives) ; les bénéfices mentaux (relaxation, bien-être subjectif, réduction du stress, sentiment de sécurité) ; et les bénéfices sociaux.

Ce qui est plus nouveau, ce sont les bénéfices en termes environnementaux (que nous retrouverons, avec le potager, dans la section suivante) : réduction de l'effet d'îlot de chaleur urbain ; amélioration de la qualité de l'eau, du sol et de l'air ; limitation du bruit ; diminution des courants d'air ; séquestration de carbone ; et différents progrès sur l'utilisation des ressources. D'autres bénéfices sont de nature économique : des espaces de travail, aménagés à l'aide du design biophilique, ont augmenté la productivité, ont diminué l'absentéisme et ont attiré des jeunes diplômés à gros potentiel. Les maisons construites sur ce principe, ou bien situées près de parcs, ou avec de belles vues, ont une valeur immobilière bien supérieure. Vous sentez, dans les deux phrases précédentes, que nous venons de quitter, pour ma part à regret, le monde de Oui-Oui[487] ?

> Du côté de chez Stéphane (le potager biophilique) : On s'est un peu éloigné de notre potager, non ? On y revient : en ce qui concerne le jardin, Clayton (2007) parle de domestication de la nature, et oppose deux conceptions. Dans la première, le jardin est une sorte de *pièce extérieure de la maison*, où l'on se détend, on fait des barbecues et on reçoit : il convient d'y contrôler (difficilement) la nature ; le parangon étant la pelouse parfaitement verte, uniforme et tondue, autrement dit, « comme une carpette ». Dans la seconde conception, la nature spontanée a une place, *à*

[487] Quelques-uns de mes meilleurs amis travaillent dans le bâtiment. Ils me disent qu'il vaut mieux, dans le secteur, s'attendre au pire. Et que le pire soit livré avec deux mois de retard.

l'extérieur de la maison : des fleurettes sont tolérées dans la pelouse, dont des parties sont moins régulièrement tondues ; enfin, la présence d'êtres vivants, autres que des humains, y est plus acceptée.

Le design biophilique ouvre une troisième voie : celle de l'*entrée de la nature (et du potager) dans la maison*, ou de la recherche de leur plus grande intégration. Le design intérieur biophilique (McGee et al., 2019) introduit de nombreuses plantes vertes (pourquoi pas des légumes en contenants ?) ; des murs ou façades végétalisés (pourquoi pas comestibles ?) ; des atriums avec des arbres (pourquoi pas des fruitiers ?) ; des toits végétalisés (pourquoi pas un potager suspendu genre Babylone ? Tu déconnes ?) ; des ouvertures lumineuses (pourquoi pas des serres attenantes ?) ; des terrasses (pourquoi pas avec des jardinières d'aromatiques ?). La lecture[488] de leur figure 2, qui donne les éléments clés de ce type de design, peut faire émerger des idées chez tout jardinier / décorateur en herbe, particulièrement dans un cadre urbain, afin de mieux intégrer potager, jardin et maison en un cadre de vie biophilique.

Le plus récent développement est l'urbanisme biophilique qui prétend appliquer les principes biophiliques à l'échelle des rues, des quartiers, des villes, voire des régions. Il ne s'agit pas seulement de rajouter un peu de vert par-ci, par-là, et de simplement étendre les idées du design biophilique au-delà de la maison : mais d'une remise en cause complète de ce qu'est une ville, qui a toujours été opposée à la nature, ou du moins à la campagne. Les résultats obtenus concernant la biophilie sont, pour l'heure, tous au niveau d'habitations individuelles ; on ne sait pas ce qu'il en est au niveau collectif. De plus, il s'agira d'estimer des effets plus complexes sur des durées probablement plus longues. Nous n'en sommes qu'au début, les débats sont, actuellement, essentiellement théoriques.

---

[488] L'article est disponible en ligne : https://www.academia.edu

12.5.3 Urbanisme comestible

Les villes doivent aussi se nourrir et peuvent, en partie, le faire par elles-mêmes, ce que promeut l'urbanisme comestible. Russo et Cirella (2019) revisitent les mouvements d'architecture et d'urbanisme qui tentent d'intégrer, au sein des villes, de façon durable et « culturellement appropriée », la production de nourriture, mais aussi sa distribution, sa consommation et son recyclage. Des mouvements populaires (Incroyables Comestibles, Slow Food) et des administrations urbaines militent aussi en ce sens.

Les propositions théoriques n'ont pas manqué du côté des architectes : urbanisme écologique, urbanisme durable, urbanisme du paysage, urbanisme de l'alimentation, urbanisme agricultural, urbanisme agraire, CPUL (*continuous productive urban landscape*), urbanisme nourricier...

Mais, en pratique, les villes comestibles restent rares et les auteurs ne citent qu'Andernach (Allemagne), Todmorden (Royaume-Uni) et Taipei (Taïwan).

Russo et al. (2017) proposent un nouveau concept, appelé infrastructures vertes comestibles (EGI, *edible green infrastructure*). Ils les définissent comme un réseau dans la ville de composantes et de structures qui servent à produire de la nourriture, plutôt que d'en rester aux bénéfices non-matériels ou environnementaux. Ces EGI cumulent donc divers bénéfices et relocalisent la nourriture dans les villes.

Les auteurs en établissent une typologie : (1) forêts urbaines comestibles[489], (2) jardins-forêts comestibles[490], (3) jardins historiques, parcs et jardins botaniques, (4) jardins d'école, (5) jardins collectifs, (6) jardins privés domestiques, (7) toits et jardins de pluie potagers et

---

[489] Des plantations d'arbres, même dans une rue, pour produire des fruits ou des noix, ceci dit, la maintenance est beaucoup plus élevée que pour les arbres classiquement employés.

[490] Jardins possédant au moins trois strates de végétation : arbres, arbustes et plantes herbacées (légumes en particulier), pour l'instant peu répandus en Europe et en climats tempérés, et encore moins en ville.

(8) façades et murs végétalisés comestibles[491]. Les espaces dédiés à l'agriculture urbaine commerciale intensive ne sont pas inclus.

L'article décrit l'ensemble des bons et des mauvais services[492] que peuvent rendre ces différents types d'espaces verts. Ce qui fait leur intérêt est qu'ils parviennent, à la fois, à rendre une multiplicité de services (en fournissant de l'emploi, en créant du lien social, en améliorant la santé...) dont les services nourriciers très importants pour la sécurité alimentaire et pour limiter les transports de cette nourriture[493]. Les auteurs font cette description à l'aide d'un cadre général que nous découvrirons au chapitre suivant : les contributions

---

[491] En ce qui concerne notre problématique potagère, je pense que le sujet ne mérite qu'une longue note de bas de page. Avant tout, il faut savoir que ce type d'installation est réservé à des immeubles de standing, pour une raison assez simple : les coûts d'installation et de maintenance sont élevés. Ensuite, les technologies ne sont pas encore au point. Mårtensson et al. (2018) décident de tester, dans un climat scandinave, un tel mur, avec diverses espèces pérennes comestibles (petits fruits et aromatiques) et d'autres plantes à feuilles persistantes. De façon assez révélatrice, ils ne mesurent même pas la production, car « à cette échelle, ce sont les valeurs visuelles et pédagogiques qui comptent ». Ils comparent donc la qualité visuelle des plantes installées dans le mur vivant aux mêmes plantes installées dans des jardinières au sol. Ils concluent, à la vue de différences non statistiquement significatives, que le pari est jouable. C'est le moment de la fessée statistique : les mesures choisies, les tailles d'échantillons et les tests statistiques qu'ils emploient sont, à mon sens, catastrophiques ; aussi n'est-il pas surprenant qu'ils détectent si peu de différences, alors qu'elles sautent pourtant aux yeux dans leur tableau 1. En particulier, les plantes comestibles du mur vivant ont du mal à survivre, ont aussi une qualité visuelle qui se détériore au fil du temps, et plus encore, dans des conditions de sécheresse. Ma propre conclusion est que, dans ces conditions, le pari est perdu. Et ce n'est pas l'article de Li et al. (2022) qui me fera changer d'idée ; il ne se questionne que sur l'influence visuelle de la surface couverte sur le bien-être immédiat des spectateurs ; les plantes comestibles, qui sont des laitues romaines, ne sont là que pour l'aspect visuel et leur facilité de culture. Il s'agit de tests menés sur des images 3D de synthèse ; et je n'ose imaginer, en situation réelle, l'aspect du mur au bout de deux mois, et les manipulations requises.

[492] Comme, par exemple, les jardins botaniques qui ont parfois répandu des espèces exotiques invasives ; mais du côté de la production alimentaire, les sols contaminés sont, en ville, le plus gros problème : cela peut compromettre la qualité des légumes.

[493] Et donc les gaz à effet de serre.

de la nature aux populations, accompagnées de mesures pour les évaluer.

Cette typologie des EGI (et ce que chacune peut fournir comme contributions) est conçue pour servir de guide à des planificateurs urbains, afin qu'ils puissent mener des réflexions sur le type d'espaces verts à développer, selon le contexte. Cette approche, basée sur la multifonctionnalité, peut aussi nous servir en tant que jardiniers de potager : *quels services voulons-nous développer au potager ? Des services économiques, socio-culturels et de santé, ou environnementaux ? Et comment éviter les mauvais services ?* Ce seront les problèmes abordés dans le chapitre qui suit.

12.6 Références

Alaimo, K., Packnett, E., Miles, R. A., & Kruger, D. J. (2008). Fruit and vegetable intake among urban community gardeners. *Journal of Nutrition Education and Behavior, 40*(2), 94-101.

Armstrong, D. (2000). A survey of community gardens in upstate New York: Implications for health promotion and community development. *Health & Place, 6*(4), 319-327.

Balan, D., Israel-Roming, F., Luta, G., & Gherghina, E. (2016). Changes in the nutrients content of some green vegetables during storage and thermal processing. *Romanian Biotechnological Letters, 21*(5), 11857-11865.

Bally, F. (2024). Une évolution des jardins collectifs vers des fonctions de production et d'expérimentation: exemple des jardins partagés lyonnais. *Développement Durable et Territoires. Économie, géographie, politique, droit, sociologie, 15*(1).

Bhatti, M., & Church, A. (2000). 'I never promised you a rose garden': gender, leisure and home-making. *Leisure Studies, 19*(3), 183-197.

Blair, D. (2009). The child in the garden: An evaluative review of the benefits of school gardening. *Journal of Environmental Education, 40*(2), 15e38.

Chalmin-Pui, L. S., Griffiths, A., Roe, J., Heaton, T., & Cameron, R. (2021). Why garden?–Attitudes and the perceived health benefits of home gardening. *Cities, 112*, 103118.

Chalquist, C. (2009). A look at the ecotherapy research evidence. *Ecopsychology, 1*(2), 64-74.

Clatworthy, J., Hinds, J., & M. Camic, P. (2013). Gardening as a mental health intervention: A review. *Mental Health Review Journal, 18*(4), 214-225.

Clayton, S. (2007). Domesticated nature: Motivations for gardening and perceptions of environmental impact. *Journal of Environmental Psychology, 27*(3), 215-224.

Dangour, A. D., Dodhia, S. K., Hayter, A., Allen, E., Lock, K., & Uauy, R. (2009). Nutritional quality of organic foods: a systematic review. *The American Journal of Clinical Nutrition, 90*(3), 680-685.

Delay, C., Frauenfelder, A., & Scalambrin, L. (2014). «On sait ce qu'on mange»: jardin familial et mode d'alimentation populaire. *Sociologie et Sociétés, 46*(2), 37-57.

Dewaelheyns, V., Rogge, E., & Gulinck, H. (2014). Putting domestic gardens on the agenda using empirical spatial data: The case of Flanders. *Applied Geography, 50*, 132-143.

Dias, J. S. (2012). Nutritional quality and health benefits of vegetables: A review. *Food and Nutrition Sciences, 3*(10), 1354-1374.

Draper, C., & Freedman, D. (2010). Review and analysis of the benefits, purposes, and motivations associated with community gardening in the United States. *Journal of Community Practice, 18*(4), 458-492

Eng, S., Khun, T., Jower, S., & Murro, M. J. (2019). Healthy lifestyle through home gardening: The art of sharing. *American Journal of Lifestyle Medicine, 13*(4), 347-350.

Freeman, C., Dickinson, K. J., Porter, S., & Van Heezik, Y. (2012). "My garden is an expression of me": Exploring householders' relationships with their gardens. *Journal of Environmental Psychology, 32*(2), 135-143.

Frumkin, H. (2001). Beyond toxicity: human health and the natural environment. *American Journal of Preventive Medicine, 20*(3), 234-240.

Guitart, D., Pickering, C., & Byrne, J. (2012). Past results and future directions in urban community gardens research. *Urban Forestry & Urban Greening, 11*(4), 364-373

Jettner, J. F., & Secret, M. C. (2020). Building racial bridges? Social capital among community gardeners in US food deserts. *International Journal of Social Welfare, 29*(4), 367-377.

Kaplan, S. (1995). The restorative benefits of nature: Toward an integrative framework. *Journal of Environmental Psychology, 15*(3), 169-182.

Lefosse, D., van Timmeren, A., & Ratti, C. (2023). Biophilia upscaling: A systematic literature review based on a three-metric approach. *Sustainability, 15*(22), 15702

Li, Z., Wang, Y., Liu, H., & Liu, H. (2022). Physiological and psychological effects of exposure to different types and numbers of biophilic vegetable walls in small spaces. *Building and Environment, 225*, 109645.

Mårtensson, L.-M., Fransson, A.-M., Emilsson, T. (2016). Exploring the use of edible and perennials in living wall systems in the Scandinavian climate. *Urban Forestry & Urban Greening, 15*, 84–88.

McFarland, A., Waliczek, T. M., Etheredge, C., & Lillard, A. J. S. (2018). Understanding motivations for gardening using a qualitative general inductive approach. *HortTechnology, 28*(3), 289-295.

McGee, B., Park, N. K., Portillo, M., Bosch, S., & Swisher, M. (2019). DIY Biophilia: development of the Biophilic Interior Design Matrix as a design tool. *Journal of Interior Design, 44*(4), 201-221.

Mok, H. F., Williamson, V. G., Grove, J. R., Burry, K., Barker, S. F., & Hamilton, A. J. (2014). Strawberry fields forever? Urban agriculture in developed countries: a review. *Agronomy for Sustainable Development, 34*, 21-43.

Nicklett, E. J., Anderson, L. A., & Yen, I. H. (2016). Gardening activities and physical health among older adults: a review of the evidence. *Journal of Applied Gerontology, 35*(6), 678-690.

Park, S. A., Lee, A. Y., Lee, K. S., & Son, K. C. (2014). Gardening tasks performed by adults are moderate-to high-intensity physical activities. *HortTechnology, 24*(1), 58-63.

Quandt, S. A., Arcury, T. A., Bell, R. A., McDonald, J., & Vitolins, M. Z. (2001). The social and nutritional meaning of food sharing

among older rural adults. *Journal of Aging Studies, 15*(2), 145-162.

Richardson, M. (2019). Beyond restoration: Considering emotion regulation in natural well-being. *Ecopsychology, 11*(2), 123–129.

Russo, A., & Cirella, G. T. (2019). Edible urbanism 5.0. *Palgrave Communications, 5*(1), 1-9.

Russo, A., Escobedo, F. J., Cirella, G. T., & Zerbe, S. (2017). Edible green infrastructure: An approach and review of provisioning ecosystem services and disservices in urban environments. *Agriculture, Ecosystems & Environment, 242*, 53-66.

Schaudt, J., Ziegenhorn, S., Lienert, J. S., Exadaktylos, A., & Klukowska-Rötzler, J. (2019). Accidents caused by gardening-trivial or serious? 5-year retrospective analysis at the university emergency department Berne. *Praxis, 108*(10), 665-672.

Shishegar, N., & Boubekri, M. (2016, April). Natural light and productivity: Analyzing the impacts of daylighting on students' and workers' health and alertness. In *Proceedings of the International Conference on "health, Biological and life science"*(HBLS-16), Istanbul, Turkey (pp. 18-19).

Soga, M., Gaston, K. J., & Yamaura, Y. (2017). Gardening is beneficial for health: A meta-analysis. *Preventive Medicine Reports, 5*, 92-99.

Stigsdotter, U. A., & Grahn, P. (2004). A garden at your doorstep may reduce stress–Private gardens as restorative environments in the city. Proceedings Open Space-People Space, Scotland.

Symes, L., Hadgraft, N., Marsh, P., Nuttman, S., & Kingsley, J. (2023). 'Surrounding yourself with beauty': exploring the health promotion potential of a rural garden appreciation group. *Health Promotion International, 38*(2), daad010.

Ulrich, R.S. (1983). Aesthetic and affective response to natural environment. In I. Altman and J.F. Wohlwill (Eds.), *Human Behaviour and Environment: Behaviour and the Natural Environment* (p. 85-125). Plenum Press, New York, NY.

Unruh, A. M., Smith, N., & Scammel, C. (2000). The occupation of gardening in lifethreatening illness: A qualitative pilot project. *The Canadian Journal of Occupational Therapy, 67*(1), 70e77.

Van den Berg, A. E., van Winsum-Westra, M., De Vries, S., & Van Dillen, S. M. (2010). Allotment gardening and health: a comparative survey among allotment gardeners and their neighbors without an allotment. *Environmental Health, 9*, 1-12.

Van Den Berg, A. E., & Custers, M. H. (2011). Gardening promotes neuroendocrine and affective restoration from stress. *Journal of Health Psychology, 16*(1), 3-11.

Waliczek, T. M., Mattson, R. H., & Zajicek, J. M. (1996). Benefits of community gardening on quality-of-life issues. *Journal of Environmental Horticulture, 14*(4), 204-209.

Yee Tse, M. M. (2010). Therapeutic effects of an indoor gardening programme for older people living in nursing homes. *Journal of Clinical Nursing, 19*, 949e958.

Young, C., Hofmann, M., Frey, D., Moretti, M., & Bauer, N. (2020). Psychological restoration in urban gardens related to garden type, biodiversity and garden-related stress. *Landscape and Urban Planning, 198*, 103777.

13 Services écosystémiques au potager

13.1 Au-delà de la rationalité économique

Lorsque l'on gère une exploitation agricole, ou plus modestement, un potager, il est possible de raisonner de façon purement économique, comme dans le chapitre intitulé « Potag€r » : on compare alors les recettes que fournit la production aux coûts qu'elle engage. Ce raisonnement souffre toutefois de plusieurs limites.

La première limite a été abordée dans le chapitre[494] décrivant les bénéfices non-monétaires qu'apporte un potager : s'épanouir, manger sainement, être en bonne santé physique, psychique et sociale, se connecter à la nature ; en économie, on parle d'externalités positives, car elles sont situées à l'extérieur du système économique (il n'y a pas de *marchés* pour les acheter ou les vendre), mais elles sont intéressantes pour la société. L'idée est de pouvoir les prendre en considération, en les internalisant, d'une façon ou d'une autre, car un jardinier peut trouver *très rationnel* de privilégier des bénéfices non-matériels plutôt que des bénéfices matériels.

La deuxième limite est que certaines pratiques, comme par exemple, le fait de planter une haie pour abriter ses cultures du vent, ont aussi des effets sur l'environnement : une faune peut venir s'y nourrir, s'y abriter, s'y reproduire, y habiter. On peut considérer qu'il s'agit là d'un service, non-valorisé, que rend le potager à l'environnement, et donc, indirectement, aux populations humaines.

La troisième limite consiste en d'autres pratiques qui ont, elles, un impact négatif sur l'environnement ou même sur la santé humaine : une fertilisation excessive en azote peut être lessivée et aller rejoindre des eaux de surface, avec des dommages de type eutrophisation, ou aller retrouver des eaux souterraines, avec une pollution qui rend l'eau impropre à la consommation humaine. C'est ici, par conséquent, un

[494] « Un potager produit plus que des légumes ».

mauvais service ou disservice que le potager rend à l'environnement, et il convient de le prendre en compte afin de le circonscrire.

La quatrième limite est que l'écosystème, dans lequel est inséré le potager, a aussi un impact. Il est souvent comptabilisé lorsqu'il est négatif : les mauvaises herbes et les bioagresseurs sont intégrés dans le calcul économique, soit en temps de travail, soit en termes d'intrants (pesticides). En revanche, il est moins clair que les écosystèmes ont une contribution positive, comme la pollinisation : elle semble aller de soi, être inépuisable et gratuite, jusqu'au jour... où l'on se retrouve à devoir polliniser à la main ses courgettes, car il n'y a plus d'insectes pour le faire.

Ce qui nous amène à la cinquième limite, le potager a des effets en retour[495] sur lui-même : en gérant le problème de bioagresseurs avec des pesticides, on court le risque de se débarrasser aussi des pollinisateurs ; en labourant trop intensivement afin de diminuer la compacité du sol, on court le risque de perdre de la matière organique, ce qui, sur le long terme, aura des conséquences multiples sur la qualité des sols, et *in fine*, la production. Bref, la façon de régler les problèmes peut devenir le nouveau problème.

Nous avons donc besoin d'un cadre plus général pour saisir ce qui se trame au potager et comprendre les relations qu'il entretient avec l'environnement et avec la société. Ce cadre est celui des contributions de la nature aux populations ; il s'est peu à peu dégagé dans le contexte des recherches concernant la conservation de la biodiversité. Ce cadre va permettre d'intégrer, à la fois : (1) les bénéfices et coûts économiques[496], (2) les bénéfices et coûts non-économiques de santé physique, psychique et sociale, ainsi que culturels[497] ; et (3) de surcroît, les bénéfices et coûts environnementaux, objets de ce chapitre. On peut alors recueillir, de façon organisée, l'ensemble de ces informations, ce qui permet de comparer différentes gestions du potager ou de suivre, au fil du temps, les impacts de nos pratiques. Cela risque de révéler que nous avions une vision bien partielle de ce que peut offrir un

---

[495] On parle aussi de boucles rétroactives, mais j'ai alors trop l'impression d'être dans un roman d'Isaac Asimov.

[496] Développés dans le chapitre « Potag€r ».

[497] Développés dans le chapitre « Un potager produit plus que des légumes ».

potager et que nous pourrions, conséquemment, développer de nouveaux objectifs et élaborer des solutions plus écologiques pour y parvenir.

13.2 Contribution des écosystèmes aux populations

Le cadre d'analyse que nous allons employer a été initialement formulé afin de *mieux défendre la biodiversité*, en mettant en avant son utilité pour l'espèce humaine. Cette forme de valorisation, que l'on peut qualifier d'anthropocentrée, doit être expliquée en premier lieu, car elle repose sur des notions, parfois confondues, comme celles de fonction écologique, de service écosystémique et de contribution à la nature.

13.2.1 La longue construction d'un cadre d'analyse des écosystèmes

Valeurs de la biodiversité

La biodiversité est la variété de la vie, à tous ses niveaux d'organisation, du gène à l'écosystème, en passant par le niveau le plus usuel de sa description : l'espèce. La biodiversité possède une valeur en soi qui est parfois difficilement perçue : si certaines espèces emblématiques comme le panda attirent beaucoup l'attention, d'autres, tels qu'un type de crapaud, charment nettement moins, et par là-même, recrutent moins de défenseurs.

Une autre façon de valoriser la biodiversité est d'insister sur le travail qu'elle accomplit, ce qu'on appelle les fonctions écologiques. Ainsi, une partie de la biodiversité forme le groupe des décomposeurs : ils éliminent la matière organique morte et ils la recyclent en nutriments. Les décomposeurs travaillent, bien entendu, pour leur propre compte cependant, les nutriments qu'ils produisent peuvent également profiter aux végétaux.

C'est, sans surprise, lorsque le produit de ce travail est utile à l'homme que celui-ci saisit le mieux la valeur de la biodiversité et l'intérêt de la conserver. On parle de biens et de services écosystémiques pour désigner le produit de ce travail utile aux êtres humains.

Fonction écologique

J'avoue avoir mis longtemps à me faire une idée précise de la notion de fonction écologique, pour une raison bien exposée dans Jax (2005) : en écologie, on peut lui prêter quatre sens différents... Celui de processus biologique, plutôt individuel ou d'interaction entre deux organismes ; celui de fonctionnement de l'écosystème ; celui de rôle (consommateur, producteur) ; et celui de... service écosystémique comme défini au-dessus.

Il me semble que le sens convenant le mieux à notre propos sur la valeur de la biodiversité est le deuxième : celui qui permet de décrire le fonctionnement de l'écosystème, à travers les différents processus qui s'y déroulent. D'une certaine façon, nous sommes proches de l'idée de fonction mathématique (f) comme opération de création, transformation, destruction, de matériau ou d'énergie, par des facteurs biotiques ou abiotiques (x_1, x_2,...) donnant un service écosystémique (y), *qui doit bénéficier à l'humanité*. Quelque chose comme :

Service écosystémique = fonction écologique (matériau, énergie, facteurs biotiques et abiotiques).

Relation entre biodiversité et fonctions écologiques

Une part des services écosystémiques est certes fournie par les composantes abiotiques des écosystèmes, mais ce sont les composantes biotiques qui sont ici au centre du débat. En particulier, la biodiversité, c'est-à-dire la variabilité de cette composante biotique, est supposée être un déterminant significatif des fonctions écologiques, et par conséquent, des services écosystémiques dérivés. On parle de la biodiversité comme d'une assurance biologique où, pour le dire simplement, une espèce peut en remplacer une autre, afin que son rôle écologique soit toujours joué. Bien que la relation entre la biodiversité et les services écosystémiques soit certainement complexe et variable selon les écosystèmes, les pionniers de l'écologie l'ont toujours globalement considérée comme positive.

C'est justement ce type d'hypothèse que testent Balvanera et al. (2006) dans une méta-analyse : est-ce que la perte de biodiversité menace l'accomplissement des fonctions écologiques, et conséquemment, les services écosystémiques qu'elles fournissent (et au

bout du compte, le niveau de bien-être humain) ? La biodiversité joue un rôle direct dans la production de biens (*e.g.* une alimentation diversifiée) et de services (*e.g.* le plaisir de la contempler), mais aussi, plus indirect, dans la régulation de l'environnement.

De nombreuses expériences pour tester cette relation entre biodiversité et services écosystémiques ont été mises en place, mais avec des méthodologies très différentes et des résultats parfois contradictoires. Il s'agit donc ici de faire le point, à la fois, sur les méthodes à conseiller pour de futurs tests et sur les résultats consensuels obtenus (ou pas). Ces résultats proviennent de 103 publications (446 tests de services écosystémiques). Il s'agit de voir, dans les corrélations entre biodiversité et services écosystémiques, ce qui dépend du déroulement de l'expérience (site d'étude, corrélations possibles au sein d'une même étude, nombre d'espèces en jeu...) ou pas.

Le résultat global rejoint l'opinion des fondateurs de l'écologie : *la moyenne des corrélations entre biodiversité et services écosystémiques est positive*, et cela est statistiquement significatif ; même si certaines corrélations peuvent s'avérer négatives. La façon dont l'expérience a été menée joue un rôle, les corrélations positives sont plus nettes lorsqu'il s'agit d'une expérience bien contrôlée (par exemple en serre) que d'une observation au champ, en effet divers facteurs (climatiques, biotiques) viennent alors diminuer ces corrélations. De plus, le site expérimental entraîne de larges variations dans la relation biodiversité vs. services écosystémiques, les facteurs locaux ne sont donc pas à négliger : on n'extrapolera les résultats à d'autres milieux ouverts qu'avec une grande prudence. Les effets sont également plus nets dès que l'on dépasse 20 espèces dans les expériences[498]. La biodiversité ne joue pas de façon identique à tous les niveaux, elle a un effet négatif sur les populations, très positif sur les communautés et moindre sur les écosystèmes. C'est là un point important qui entérine une hypothèse souvent avancée : les populations fluctuent de façon plus importante avec la biodiversité, alors que les communautés restent plus « stables » (au sens où les fonctions de régulation sont mieux assurées). En

[498] Comme s'il y avait un niveau minimal à ne pas dépasser, où la biodiversité ne fonctionnerait plus ?

résumé, au plan pratique, lorsque nous allons essayer de manipuler la biodiversité à notre avantage, l'effet risque d'être, dans notre potager, limité par d'autres facteurs, et dépendant de notre contexte spécifique.

Au-delà de ces « circonstances expérimentales », les effets de la biodiversité ne sont pas les mêmes pour tous les groupes de fonctions écologiques. En ce qui concerne la productivité de l'écosystème, elle est corrélée à la biodiversité ; celle des plantes en particulier, car elle entraîne l'augmentation de la biomasse aérienne et souterraine des plantes, mais aussi celle des organismes du sol. Les cycles de nutriments sont aussi affectés positivement par la biodiversité, et à nouveau, plus particulièrement par celle des plantes qui augmente l'activité des décomposeurs. La biodiversité des plantes entraîne aussi, en cascade, celle des consommateurs, tout en limitant les dommages aux plantes. L'étude de Danese et al. (2019) permet de préciser que la biodiversité de pollinisateurs génère un meilleur niveau de pollinisation, et la biodiversité » des ennemis naturels permet de mieux contrôler les bioagresseurs. Concernant un problème important, celui de l'impact des espèces exotiques, il est réduit par la biodiversité.

Lorsque l'on peut facilement relier les fonctions écologiques aux services écosystémiques, les effets de la biodiversité sont clairement positifs sur les services de régulation et de support, mais ces liens sont difficiles à faire sur la base d'expériences menées à une échelle limitée, alors que la bonne dimension est souvent celle du paysage. Pour revenir, encore une fois, sur le lien entre biodiversité et stabilité, ici des services écosystémiques, il n'est pas globalement validé. Si cela est plutôt vérifié en ce qui concerne les perturbations des cycles de nutriments ou celles générées par des invasions d'espèces exotiques, ce n'est pas le cas des perturbations occasionnées par un réchauffement ou une sécheresse.

En conclusion, « l'analyse suggère que des généralisations faciles entre les types d'écosystèmes, les fonctions écologiques et les niveaux trophiques de biodiversité en jeu vont être difficiles à soutenir ». Il n'empêche que la majorité des relations s'avèrent positives et qu'il semble, par précaution, raisonnable de défendre la biodiversité.

Cadre initial d'analyse des services écosystémiques

La définition des services écosystémiques que nous avons exposée est celle du *Millenium Ecosystem Assessment* (MEA, 2005) : « les bénéfices que les populations reçoivent de fonctions écologiques ». D'autres évaluations en ont proposé des perspectives un peu différentes, comme étant, par exemple, les fonctions écologiques elles-mêmes (Potschin & Haines-Young, 2016) ; mais elles ont été moins employées dans les travaux scientifiques, c'est pourquoi nous allons la privilégier dans la présentation qui suit.

L'approche du MEA est marquée par la discipline économique : les écosystèmes sont vus comme un stock de capital naturel. Ils fournissent des flux de biens et de services bénéfiques au bien-être humain, dits services écosystémiques. Ils ont également une valeur, dans le sens où ils permettent de conserver des options intéressantes pour l'avenir (de nouveaux médicaments, par exemple). Il est aussi possible que certains flux soient négatifs pour le bien-être humain, on parle alors de disservices (ou de mauvais services). Les services et disservices ont été initialement classés en quatre catégories : approvisionnement, culturel, régulation et support (ou habitat).

> Du côté de chez Stéphane : Un exemple vaut mieux que pas d'exemple du tout, aussi vais-je prendre comme écosystème de référence une forêt française. Ses contributions matérielles (approvisionnement) sont la possibilité de cueillir des champignons, de chasser la maman de Bambi et de ramasser du bois pour construire la maison du deuxième des petits cochons. Ses contributions non-matérielles (culturel) sont l'occasion d'apprendre à ses enfants qu'il ne faut cependant pas cueillir n'importe quel champignon, l'occasion de jouer avec eux à Robin des Bois (celui qui vole les riches qui volent les pauvres), l'occasion de pratiquer une cérémonie religieuse sous le gui avec Panoramix ou l'occasion de faire un bain de forêt dit *Shinrin Yoku* afin de diminuer son stress face à la perte de la biodiversité (Hansen et al., 2017). Enfin, la forêt fournit des contributions de régulation (régulation et support), il commence à se savoir qu'elle stocke du carbone, ceci se fait grâce à la

> photosynthèse qui équilibre le dioxyde de carbone et l'oxygène (Jim & Chen, 2009). Il fait aussi plus frais dans la forêt, ce qui protège les coureurs à pied de la surchauffe en été[499] (de Frenne et al., 2019). Les forêts transpirent d'ailleurs plus que les coureurs ; elles ont un rôle fondamental de transport de l'eau à l'intérieur des continents, au point qu'on parle même de *fleuves volants* en Amazonie (Pearce, 2019).

En fait, ces services se manifestent de façon particulièrement évidente... quand ils disparaissent. Pour les mieux mettre en lumière, l'une des approches consiste à poser un prix sur ces services, ce qui est discuté par beaucoup ; mais est-ce que la société, par ses choix, ne l'a pas implicitement fait, en les considérant comme « gratuits » (Daily et al., 2000) ? Jusqu'à une date assez récente, comme les services étaient abondants et que les disservices étaient raisonnables, c'était une estimation plutôt juste. Mais ce n'est plus le cas, et il va bien falloir les évaluer, en monnaie ou pas (en ayant conscience des limites de cette évaluation), car cela peut aider à prendre des décisions plus avisées. Et voici comment.

Il est d'abord nécessaire de déterminer les fonctions écologiques qui génèrent ces services et souvent d'estimer la quantité biophysique produite[500], ce qui est plutôt le rôle des sciences naturelles ; puis de leur attribuer une valeur sociale, ce qui est plutôt le rôle des sciences économiques et sociales. En pratique, il y a certaines évaluations basées sur des prix de marché, d'autres sur le prix de dispositifs pour les remplacer (traiter l'eau, par exemple, ou polliniser manuellement) et encore d'autres sur la technique du consentement à payer. Ensuite, une autre étape délicate a parfois lieu : il s'agit de savoir comment agréger les évaluations individuelles... Sans parler du fait que certains de ces individus ne sont pas encore nés ! Ce sont de très belles controverses économiques en perspective. Et nous parlons d'un univers parallèle où

---

[499] En fait, elles sont aussi plus chaudes en hiver, elles ont un effet tampon.
[500] Ou l'abondance et la biodiversité de ceux qui les produisent.

des gens raisonnables et désintéressés s'assoiraient à la table de discussion, pour fonder leurs décisions sur ces éléments incertains...

Utilisation des marchés pour réguler les services écosystémiques

Peterson et al. (2010) soulignent que la construction de la théorie des services écosystémiques a parfois pu dériver, sous l'influence d'une perspective bien particulière : celle de l'économie libérale.

Initialement, le terme, proposé dans[501] Ehrlich et Ehrlich (1981), est plutôt à *vocation pédagogique*. Il vise à faire prendre conscience d'une autre bonne raison de protéger la biodiversité : elle participe à des fonctions écologiques qui ont une valeur pour l'homme. Afin de mieux encore *illustrer les choses*, il est possible de donner un *équivalent* en valeur monétaire à ces services écosystémiques ; et c'est ce qu'ont remarquablement fait Costanza et al. (1997) pour plusieurs d'entre eux. Autre avantage, cela donne un *poids* à ces différents services, *pouvant aider dans la prise de décisions*.

Mais il sera fait un pas supplémentaire : avec ces évaluations monétaires, on peut envisager ces services comme des marchandises, et dès lors, considérer des mises sur un marché ; ce qui a été fait, comme, par exemple, avec les taxes carbone. Le but est d'internaliser dans le système économique des conséquences qui leur étaient jusqu'alors externes. Il y aurait ensuite, eh bien, une sorte de « main invisible », comme chez Adam Smith, qui éviterait la destruction des écosystèmes.

Il s'avère cependant que plusieurs de ces services ne se prêtent guère à la marchandisation et qu'il y a des exemples où la marchandisation n'a pas eu les effets escomptés. Peterson et al. (*op. cit.*) font appel à un autre fondateur de l'économie, Karl Marx, pour offrir un parallèle audacieux et stimulant, expliquant ces échecs. Les êtres vivants sont, en quelque sorte, les travailleurs qui, par les fonctions écologiques qu'ils assurent, produisent les services écosystémiques, par la suite marchandisés. Or, l'expérience montre que « les forces du marché ont rarement protégé la sécurité, la santé et la richesse des travailleurs ! » En fait, au travers des marchandises, il est très difficile de détecter les

---

[501] Ehrlich, P. R., & Ehrlich, A. (1981). *Extinction: the causes and consequences of the disappearance of species*. Random House, NewYork. (Que je n'ai pas lu, je n'en dirais donc pas plus...)

travailleurs (biodiversité) et le matériel employé (facteurs abiotiques). C'est précisément l'*inverse de l'intention originale* qui était d'utiliser les services écosystémiques pour mettre en relief le travail de la biodiversité ! Les auteurs disent que cette approche *obscurcit* en définitive les travailleurs de l'écosystème, les facteurs abiotiques employés et les différentes fonctions écologiques en jeu, c'est-à-dire les mécanismes de production : or, c'est ce qu'il s'agit précisément de comprendre afin de les défendre. En fait, la conclusion est, peut-être, que la biodiversité mérite d'abord d'être protégée pour elle-même, et pas *uniquement* pour les services qu'elle rend aux êtres humains, mais aussi à l'ensemble de la planète.

Contributions de la nature aux populations (humaines)

L'IPBES[502], créé en 2012, est une plate-forme évaluant et promouvant la connaissance au sujet des services que peuvent rendre la biodiversité et les écosystèmes aux êtres humains. Le *MEA* (2005) fut un effort sans précédent pour déterminer l'état de la biodiversité dans le monde et pour proposer un premier cadre de réflexion basé sur la notion de services écosystémiques. De nombreux travaux de recherche ont alors utilisé ce cadre afin d'évaluer l'impact des activités humaines, en particulier de l'agriculture, et leur durabilité.

Il a été évoqué que cette formulation initiale reposait essentiellement sur les sciences naturelles, afin de définir le fonctionnement des écosystèmes, et sur les sciences économiques, afin de proposer des évaluations monétaires, ce qui *in fine* permettait de réaliser des arbitrages. Il en résulte des concepts, un vocabulaire et une vision du monde apparemment très universaliste et objective, mais non sans soubassement politique (corrections des déséquilibres principalement envisagées par des mécanismes de marché), qui a été fortement critiquée, tant du côté des sciences sociales et humaines, par l'oubli des aspects culturels, pourtant omniprésents dans les relations entre les sociétés et la nature, que du côté des acteurs locaux qui ne s'y retrouvaient pas, car possédant des points de vue fort différents.

---

[502] Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques.

Le nouveau cadre d'évaluation, avancé par l'IPBES, repose sur la notion de contribution de la nature aux êtres humains (NCP, *nature contribution to people*). « Les NCP sont toutes les contributions, positives ou négatives, de la nature vivante (diversité des organismes, des écosystèmes et des processus écologiques et évolutionnistes qui leur sont associés) à la qualité de vie des êtres humains » (Diaz et al., 2018). Les NCP sont aussi, dorénavant, plus considérées comme une coproduction de la nature et des êtres humains, car l'impact de ces derniers sur la majorité des terres et des mers ne peut plus être ignoré.

Il existe encore une perspective universaliste, avec 18 catégories de flux de services de la nature vers les sociétés humaines, catégories maintenant organisées en trois types de contributions. Les contributions matérielles[503] participent directement à l'existence physique des êtres humains ou à leur richesse (*e.g.* nourriture, énergie) ; les contributions non-matérielles ont des effets directs sur le bien-être physique et psychique des individus ou des collectivités, ou sur leur identité ; les contributions de régulation ont des effets indirects de modification de l'environnement, qui contrôle les contributions matérielles et non-matérielles. Ces derniers services, du fait qu'ils soient indirects, sont les moins évidents à appréhender, y compris pour les jardiniers.

La nouveauté de l'approche NCP est aussi la possibilité de perspectives spécifiques au contexte, qui peuvent être celles des populations indigènes[504]. Il ne s'agit plus, en l'espèce, ni d'une vision scientifique ni d'une vision universelle. Dans ces systèmes de pensée autochtone, on peut également établir des catégories de services, mais ils ne sont guère transposables à une autre culture. C'est la reconnaissance du fait qu'il y a plusieurs façons de comprendre et de catégoriser les relations entre la nature et les êtres humains.

La biodiversité, les fonctions écologiques, et surtout, les trois types de contributions forment les composantes du modèle conceptuel,

---

[503] Qui sont donc plutôt des biens écosystémiques que des services...

[504] On est d'accord sur le fait que les Français, par exemple, sont des indigènes comme les autres... Mais on fait ici plutôt référence aux peuples autochtones, qui vivent sur des territoires particulièrement sensibles, comme la forêt amazonienne, car ils ont un impact sur l'ensemble de la planète.

synthétisé dans la Figure 123, qui sera désormais employé pour analyser successivement les écosystèmes, les systèmes agricoles et les potagers.

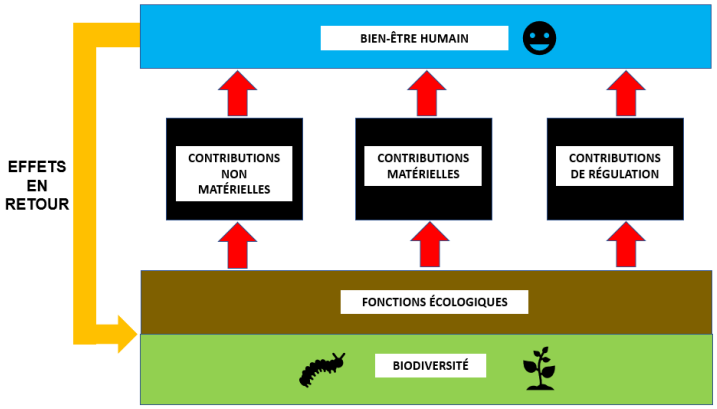


Figure 123 : Modèle conceptuel des contributions de la nature aux populations : les fonctions écologiques d'un écosystème sont assurées par des organismes vivants (et des facteurs abiotiques, comme le vent), la biodiversité constituant une « assurance biologique » pour leur bonne marche. Ces fonctions écologiques produisent trois types de contributions qui vont participer au bien-être humain. L'activité humaine a toutefois un effet de retour, trop souvent négatif, sur l'écosystème et sa pérennité.

13.2.2 Évaluation des écosystèmes par l'IPBES (2019)

Sur la base du cadre précédent, l'IPBES a déjà mené plusieurs évaluations de la biodiversité et des contributions de la nature aux populations ; la dernière en date est celle de 2019.

Pour les groupes d'animaux et végétaux surveillés, 25 % des espèces en moyenne sont menacées d'extinction ; cela dépasse même 40 % chez les amphibiens ; et les dicotylédones suivent de près[505] ; pour les insectes, si importants au potager, nous serions vers 10 % : tout bien considéré, cela nous amène vers un million d'espèces menacées ! Et le

[505] Voir Figure 3 p. 19 de IPBES (2019) : ces végétaux forment le gros de nos légumes au potager (à part les alliacées et le maïs doux), mais on parle ici de leurs proches parents sauvages qui servent à les améliorer...

taux d'extinction s'accélère... alors qu'il est déjà des dizaines, voire des centaines, de fois plus élevé que durant les dix millions d'années précédentes : c'est pour cela qu'on parle de sixième extinction de masse. Pour le voir sous un autre angle, on estime que 30 % des habitats terrestres ont disparu.

Mais la biodiversité cultivée est, elle aussi, menacée : il y a une perte de diversité génétique qui est inquiétante pour la capacité d'adaptation par sélection naturelle dans l'avenir. Les parents sauvages qui permettent d'améliorer la sélection artificielle par l'homme sont également peu protégés. Tout cela questionne le maintien des options. Au final, les communautés biologiques se ressemblent de plus en plus dans le monde entier, du fait du resserrement des espèces cultivées, de l'extinction de la biodiversité locale et de l'envahissement généralisé d'espèces exotiques.

Tableau 22 : Contributions de la nature aux populations (IPBES, 2019). Les flèches indiquent la croissance, la stabilité ou la décroissance de ces contributions sur les 50 dernières années. Une dernière contribution, plutôt transversale, de « Maintien des options » n'est pas présentée, mais a également baissé.

Contributions matérielles	
Alimentations humaine et animale	↗
Énergie	↗
Matériaux et assistance	↗
Ressources médicinales biochimiques et génétiques	↘
Contributions non matérielles	
Apprentissage et inspiration	↘
Expériences physiques et psychologiques	↘
Soutien identitaire	↘
Contributions à la régulation	
Régulation du climat	↘
Régulation des événements extrêmes	↘
Régulation de la qualité de l'air	↘
Régulation quantitative des eaux douces	↘
Régulation qualitative des eaux douces	↘
Formation et protection des sols	↘
Création et entretien d'habitats	↘
Pollinisation et dispersion des graines	↘
Régulation des nuisibles	↘
Régulation de l'acidification des océans	→

La production a effectivement augmenté dans l'agriculture, la pêche, les bioénergies et les industries extractives ; en revanche, 14 des 18 autres contributions ont baissé (voir Tableau 22). Sans compter que, même si la production alimentaire est suffisante, les inégalités font que

11 % de la population mondiale est en état de malnutrition. De façon plus générale, l'accès aux contributions de la nature (positives ou négatives) est bien différent selon les groupes sociaux ; et les populations autochtones sont celles qui ont subi le plus de pressions. La plupart des contributions à la régulation ont décliné, ce qui interroge la viabilité à long terme de la hausse observée des contributions matérielles.

13.2.3 Écosystèmes durables

Les facteurs directs responsables de ces changements se sont intensifiés dans les cinquante dernières années. Il s'agit en premier lieu de la modification de l'utilisation des terres (et des mers) qui vient de l'expansion agricole (1/3 des terres émergées), du doublement des surfaces urbanisées depuis 1990 et du développement des infrastructures (routes, barrages, oléoducs). Puis par ordre décroissant : la surexploitation directe des organismes vivants (qui touche énormément les mers, mais aussi les terres avec la collecte, la surexploitation forestière et la chasse) ; le changement climatique ; la pollution de l'air, des sols et de l'eau (en particulier, les plastiques dans les mers) ; et les espèces exotiques envahissantes (+40 % depuis 1980), elles sont particulièrement dommageables dans les zones telles que les îles, avec un fort degré d'endémisme.

Maintenant, il reste à asséner que ces cinq facteurs directs ne sont que la conséquence de facteurs indirects. La population humaine a doublé sur les cinquante dernières années et la consommation de matières premières par habitant a augmenté de 15 % depuis quarante ans. Dans le même temps, le nombre de voyageurs a été multiplié par trois, la croissance mondiale a quadruplé et le commerce mondial a décuplé ! Il est une expression que j'affectionne dans la version IPBES concernant l'Europe et l'Asie : « La croissance économique n'est généralement pas dissociée de la dégradation de l'environnement ». Je propose d'enlever la double négation pour mieux saisir l'idée : *la croissance économique est généralement associée à la dégradation de l'environnement* !

Les institutions et les gouvernements jouent un rôle, en choisissant, le plus souvent, des mesures d'expansion économique plutôt que des

mesures combinant des incitations économiques, sociales et environnementales. Enfin, les guerres et les épidémies...

Pour compléter cet accablant constat, je vais souligner un aspect important du rapport : les solutions humaines de remplacement ne parviennent généralement pas à apporter l'ensemble des avantages assurés par la nature. J'en conclus que ce sont bien nos modes d'extraction, de production, de distribution et de consommation qu'il faut changer, bref nos modes de vie (dans le Nord).

13.3 Contributions de l'agriculture aux populations

Le cadre des NCP va être, à présent, utilisé pour analyser une exploitation agricole, qu'il faut alors considérer comme un agrosystème ; puis de façon agrégée, pour analyser le secteur agricole.

13.3.1 L'agrosystème : un écosystème particulier

Un agrosystème est un petit écosystème, mais pas un écosystème comme les autres. La première différence est sa gestion active par l'agriculteur, ce qui fait qu'il s'agit plutôt d'une co-production, par la nature et par la société. L'être humain agit, de façon délibérée, pour avantager certaines espèces (les cultures) par ces interventions (désherbage, fertilisation et irrigation, semis et plantation, couverture de cultures, contrôle de leurs bioagresseurs...).

Conformément au modèle conceptuel de la Figure 123, l'agrosystème *fournit* des biens et des services écosystémiques aux populations, mais aussi des disservices. La deuxième différence est que les contributions matérielles sont ici au cœur du système ; et la production, d'autant plus importante que l'agrosystème fonctionne bien, va être en grande partie exportée. En effet de retour, le service de régulation du cycle des nutriments ne peut pratiquement pas être assuré de façon interne, par des boucles fermées, et il existe donc des importations (les intrants). De façon générale, les cycles sont moins fermés dans les agrosystèmes, et souvent accélérés. Selon le mode de gestion agricole, les effets de retour peuvent s'avérer dommageables sur le long terme, à la biodiversité, en particulier.

La troisième différence est que l'agrosystème est lui-même compris dans un écosystème plus grand, comme un bassin-versant, ou qu'il subit l'influence d'écosystèmes proches : il en *reçoit* des services et des disservices.

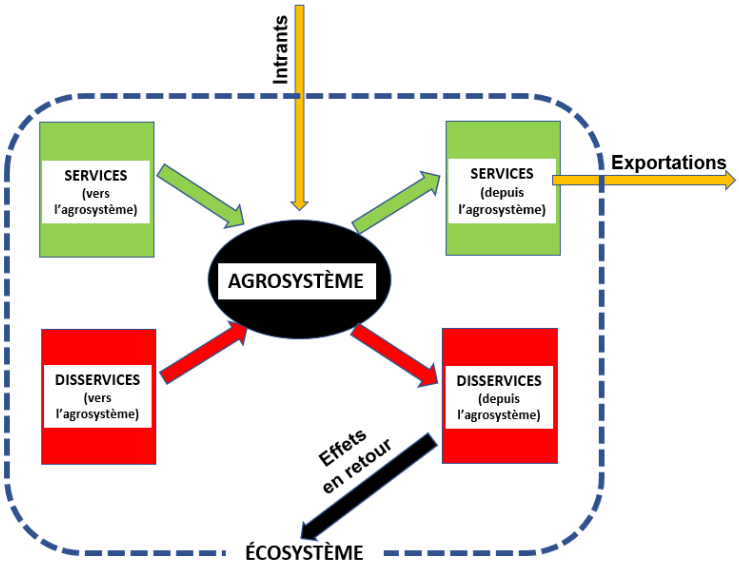


Figure 124 : Modèle conceptuel de l'agrosystème. L'agrosystème fournit des services et disservices aux populations, mais il reçoit aussi des services et disservices de l'écosystème dans lequel il est inséré. Les biens produits sont majoritairement exportés et nécessitent l'importation d'intrants. Les effets de retour sont plus ou moins positifs selon le mode de gestion de l'exploitation. Adapté de Zhang et al. (2007).

13.3.2 Évaluation des services et disservices écosystémiques de régulation en agriculture

Il y a eu, au tournant des années 2000, un changement de paradigme scientifique sur la façon dont les humains conçoivent les écosystèmes et leurs relations avec eux. Les agrosystèmes sont au centre de ce changement, car ils sont les plus gros bénéficiaires et fournisseurs de services et de disservices écosystémiques (Garbach et al., 2014). Désormais, il s'agit de les considérer comme des systèmes multifonctionnels et plus seulement des systèmes productifs ; systèmes que l'on peut décortiquer à travers le prisme des contributions de la nature aux populations.

Selon Garbach et al. (*op. cit.*), cette nouvelle approche est indispensable pour trois raisons : à présent, les agrosystèmes couvrent environ 40 % de la surface terrestre ; l'évaluation des contributions des agrosystèmes aux populations montre que la plupart d'entre elles se dégradent, particulièrement parmi les contributions de régulation ; cette dégradation est telle que certaines limites de la planète semblent être atteintes, ou en passe d'être atteintes (Rockström et al., 2009). Voyons donc, tour à tour, dans l'ordre du Tableau 22, ce qu'il en est de ces contributions de régulation.

En ce qui concerne la contribution de régulation du climat, Abdo et al. (2024) montrent, pour ce qui est de la culture conventionnelle des céréales, que les émissions de gaz à effet de serre ont nettement augmenté. De 1961 à 2020, l'indice du potentiel de réchauffement global a été multiplié par huit (et l'indice de durabilité a été divisé par trois). Cette augmentation spectaculaire est essentiellement expliquée par le labour (qui a doublé), la fertilisation synthétique (qui a décuplé) et l'irrigation (les surfaces irriguées ont doublé).

De là découlent des problèmes dans la contribution de régulation des événements extrêmes. Mais l'agriculture a aussi une responsabilité dans les inondations. La déforestation et l'agriculture ont augmenté la fréquence des crues et leur sévérité. Cela est évident au niveau local (O'connell et al., 2007), mais plus difficile à démontrer à l'échelle d'un bassin-versant. Schilling et al. (2014) en apportent pourtant des preuves assez convaincantes, lorsque le changement d'usage est de grande ampleur[506]. L'agriculture intensive a souvent conduit à la compaction des sols, à la réduction de leur capacité d'infiltration et à l'augmentation du ruissellement, qui finit par emporter les sols.

Concernant la contribution à la régulation de la qualité de l'air, les émissions importantes d'ammoniac par l'agriculture entraînent une pollution aux particules fines dangereuse pour la santé humaine. Une modélisation dans Giannadaki et al. (2018) montre qu'une réduction

[506] On reconvertit un paysage entièrement agricole, soit en 100 % de prairies, soit 50 % de prairies et 50 % d'agriculture, voire en des systèmes de rotations très longues avec beaucoup de luzerne. Le nombre de crues et le nombre de crues sévères diminuent alors.

de 50 % de ces émissions par l'agriculture pourrait éviter 200.000 morts par an dans les 59 pays étudiés !

En ce qui concerne les contributions de régulation quantitative et qualitative de l'eau douce, la production agricole en est très dépendante, que ce soit pour sa fourniture (pluie), sa qualité ou la protection contre les inondations. Les gains de production proviennent largement de l'irrigation (Figure 125, en haut à droite). Or, les agrosystèmes consomment déjà 70 % de l'eau douce mondiale et la demande ne cesse d'augmenter, du fait de la croissance démographique et d'usages concurrents. Bien entendu, les agrosystèmes ne créent pas de l'eau en tant que telle, ils modifient en revanche profondément son cycle par l'évapotranspiration, le ruissellement et l'infiltration (et la filtration pour sa qualité !). Un coup d'œil à la Figure 125 (en bas à gauche) permet de saisir que l'utilisation plus intensive de l'azote et du phosphore a certainement permis l'augmentation remarquable de la production, mais aussi d'en retrouver des quantités préjudiciables dans les eaux de surface et souterraines.

En ce qui concerne la contribution de formation et protection des sols, leur qualité (physique, chimique et biologique) et leur profondeur déterminent largement la productivité de l'agrosystème. Du fait des exportations, le cycle des nutriments ne peut être bouclé dans un agrosystème sans intrants et/ou sans gestion spécifique (inclusion de légumineuses dans les rotations, couverture systématique des sols...). Or, l'agriculture intensive comble ce déficit sur la base de labour (pour la structure) et de fertilisants chimiques (pour la fertilité). Sans même préjuger de la disponibilité à moyen terme des énergies fossiles et des minerais de phosphate, le pourcentage de matière organique des sols baisse continûment (il a été divisé par deux) et l'érosion gagne du terrain[507]. C'est moins le cas en France, mais dans d'autres pays, l'acidification et la salinisation des sols sont catastrophiques.

Pour ce qui est de la contribution de création et maintien d'habitats, l'agriculture est clairement destructrice, par la déforestation en particulier, dont elle est responsable à 70 % (des surfaces, Mullu, 2016).

---

[507] Selon le rapport complet de l'IPBES, on ne dispose pas d'estimation globale fiable de l'érosion, mais elle a été confirmée dans *tous* les pays.

Mais elle est aussi largement responsable de la fragmentation des habitats et de leur dégradation. Globalement, la perte d'habitats est la cause majeure d'extinction des espèces dans le monde (Scanes, 2018).

En ce qui concerne la contribution à la pollinisation et à la dispersion des graines, 35 % de la production est concernée (60-90 % des plantes, particulièrement les fruits et les légumes !) par la pollinisation animale. Il a été estimé que la valeur de la pollinisation aux États-Unis était de l'ordre de 20 milliards de dollars en 2003. Ce n'est pas une légende urbaine, ni rurale d'ailleurs, que dans le Sichuan, en Chine, des hommes et des femmes pollinisent vraiment les pommiers manuellement (Partap & Ya, 2012).

En ce qui concerne la contribution de régulation des nuisibles, qui sont une menace importante, car on considère qu'ils ont diminué les productions principales (céréales, pomme de terre...) de 15 % : entre 1960 et 2000, les quantités de pesticides ont largement augmenté (voir Figure 125, en bas à droite), pourtant, il s'avère que le niveau de dommages n'a, lui, pas changé... Il est même possible que cela ait entraîné des explosions de populations de nuisibles, ayant acquis, par sélection naturelle, une résistance. Sur des données françaises, plus récentes (Commissariat général au développement durable, mars, 2017), on a encore assisté à une augmentation des ventes de pesticides entre 2009 et 2015, alors que les surfaces baissaient... Tous les types de culture ne sont pas traités de la même façon : les *champions* sont les cultures fruitières, suivies de peu par l'horticulture et les légumes, puis par la vigne, et nettement plus loin par les grandes cultures (ministère de l'Agriculture, 2012, tableau 3).

Les ressources génétiques dans la nature permettent des évolutions et des adaptations, elles constituent le matériau de base de la sélection naturelle et de la sélection artificielle par l'homme. Cette richesse contribue au maintien des options pour le futur afin de permettre des adaptations à des pressions climatiques ou des pressions de ravageurs et maladies. Or, nous avons vu que la biodiversité cultivée et la biodiversité spontanée qui lui est proche,s'écroulent...

Ceci étant dit, toutes les agricultures ne se ressemblent pas en termes de fourniture de services de régulation : l'agriculture conventionnelle est, à raison, souvent opposée aux agricultures alternatives. Ces dernières, toutefois, présentent aussi entre elles des

différences à ce sujet, comme le montrent Garbach et al. (2016) avec l'agriculture de conservation des sols, l'agriculture biologique et l'agriculture de précision.

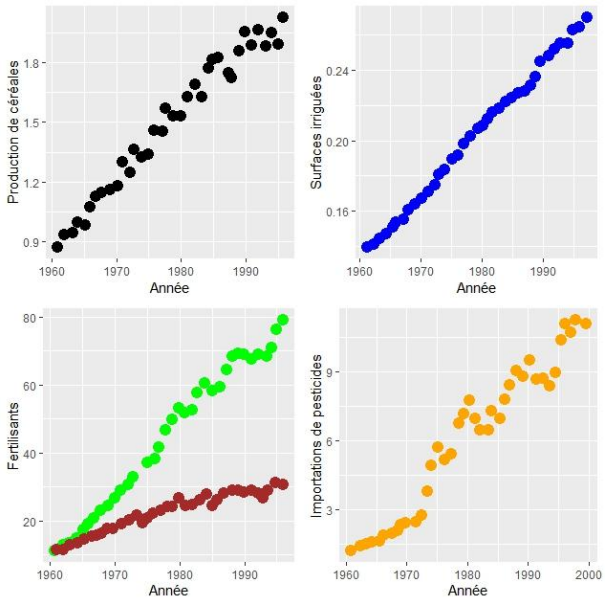


Figure 125 : Évolutions entre 1960 et 2000 (a) de la production mondiale de céréales (10^{12} tonnes) ; (b) des surfaces irriguées (10^{9} hectares) ; (c) des fertilisants : azote en vert et phosphore en marron (10^{6} tonnes) ; (d) importations générales de pesticides (milliards de $, 1996). Données tirées de Tilman et al. (2002).

13.3.3 Agriculture durable

Velten et al. (2015) montrent qu'il est bien difficile de définir précisément ce qu'est l'agriculture durable. Il en existe de très nombreuses définitions, aucune ne s'étant véritablement imposée au cours du temps. On retrouve néanmoins des éléments communs, comme par exemple, concernant les buts de ce type d'agriculture : conserver une forte capacité de production (pour nourrir la planète) ; atteindre la viabilité économique (pour que le paysan vive dignement) ; conserver les fonctions écologiques des écosystèmes et leurs ressources naturelles ; endosser une responsabilité sociale (conditions de travail, santé humaine...). Le tout étant valable pour les futures générations.

Malgré cela, il s'avère que se confrontent deux positions[508] : l'une dite techno-économiste et l'autre agroécologique-rurale. Elles présentent des différences fondamentales dans leurs traductions du concept d'agriculture durable (sciences de la vie *vs.* écologie, modernisation *vs.* retour aux traditions, centré sur les technologies *vs.* centré sur l'écologie, modèle post-productiviste *vs.* modèle de développement rural, optimisme de type *business as usual vs.* pessimisme environnemental, etc.) et bien entendu, des différences dans les solutions proposées. On peut donc, assez facilement, ne pas se comprendre quand on parle d'agriculture durable...

Tilman et al. (2002) se demandent dans quelle mesure l'agriculture intensive moderne est durable. Leur travail porte sur les céréales, en particulier le riz, le maïs et le blé qui constituent 60 % de notre alimentation. La production céréalière a doublé entre 1960 et 2000 (Figure 125, en haut à gauche). Cette révolution verte a reposé sur une croissance des quantités apportées de fertilisants, azotés ($\times 7$, entre 1960 et 1995) et phosphorés ($\times 3.5$), d'eau et de pesticides, sur de nouvelles variétés et sur l'intensification de la mécanisation. Cela a permis d'augmenter la quantité de nourriture par habitant, mais aussi d'empiéter *un peu moins* sur les écosystèmes naturels. Ceci dit, en 2002, il était projeté que la demande céréalière devait encore doubler d'ici 2050, non seulement du fait de l'augmentation démographique, mais aussi de la consommation accrue de viande, qui réclame plus encore de céréales. Si nous n'y parvenons pas, les conséquences nous en ont été enseignées par l'histoire : famines et guerres.

Passons donc en revue les quatre impacts les plus importants[509] des pratiques agricoles : la conversion des écosystèmes naturels en terres agricoles, les fertilisants employés, les pesticides et la gestion des élevages ; et voyons quelles alternatives s'offrent à nous.

Rappelons que le problème de base est de doubler la production dans les années qui viennent. Étendre encore la surface agricole paraît

---

[508] En fait, les auteurs identifient cinq positions, je vais au plus simple et renvoie le lecteur intéressé à leur papier, disponible en ligne : https://www.mdpi.com

[509] On ne reviendra pas sur le fait que l'agriculture conventionnelle a notoirement diminué la biodiversité végétale, tant cultivée que sauvage.

constituer une mauvaise solution, pour deux raisons : d'un côté, les systèmes forestiers naturels rendent des services difficilement remplaçables, en termes de biodiversité (surtout dans les zones tropicales) et de séquestration de carbone ; et de l'autre côté, les terres non-forestières qui restent sont loin d'être les plus fertiles ! Il faudrait donc raisonner à surface agricole plus ou moins identique...

La production de riz est en fait stagnante depuis 20 ans[510] dans les pays comme le Japon, la Corée et la Chine, qui sont des convertis de longue date à la Révolution Verte. On estime que la production est à environ 80 % du potentiel génétique pour cette céréale. S'il y a eu des progrès continus pour la sélection de blé, en revanche pour le maïs et le riz, les avancées ont été négligeables depuis 1965. Les techniques d'édition du génome laissent cependant quelque espoir de ce côté...

Doubler la production, avec les méthodes actuelles, demanderait de tripler l'utilisation de fertilisants, avec leurs conséquences bien documentées sur le cycle de l'eau et sur la santé humaine. C'est donc courir de très grands risques, mais ce n'est pas inimaginable, car ces coûts sont rarement évalués et généralement pas assez pris en compte. Pourtant, les eaux polluées doivent être traitées et les personnes malheureusement malades être soignées... ce que quelqu'un finit bien par payer. Puisqu'augmenter l'utilisation des fertilisants, sauf dans les régions du monde où leur emploi est insuffisant, est trop impactant ; puisque, de plus, dans les pays développés, augmenter la dose n'aura sans doute plus le même effet sur la production, le rendement étant devenu décroissant : une autre voie serait d'augmenter l'efficience de l'utilisation des fertilisants. L'espoir réside dans le fait qu'à présent, seulement 30-50 % de l'azote appliqué est consommé par les plantes (et 45 % pour le phosphore). Des progrès ont été observés, pour le maïs, par exemple, sur l'efficience de l'utilisation de l'azote, au prix d'investissements et de formation des agriculteurs : il s'agit de placer l'azote selon les demandes de la plante, c'est-à-dire au bon moment, et sans doute plus souvent, en plus petites quantités et au plus près des racines ; mais également de modifier les pratiques culturales., avec moins de labour, plus de cultures de couverture ; les rotations et les

[510] Attention, l'article date de 2002, je ne sais ce qu'il en est depuis.

intercultures améliorent aussi l'efficience en nutriments (et en eau et le contrôle des ravageurs).

L'eau est indispensable aux plantes, et sans surprise, 40 % de la production provient des 16 % de terres qui sont irriguées. L'irrigation ne pourra guère augmenter : l'eau est déjà manquante dans de nombreux pays ; et des usages concurrents se dessinent ; enfin, le changement climatique ne présage rien de bon à ce sujet. C'est d'abord l'efficience de l'irrigation qu'il faut penser à améliorer. Le mode d'irrigation est important, le goutte-à-goutte et l'irrigation par pivot permettent des progrès notables, mais à un coût qui les réserve à des cultures à haute valeur ajoutée. En tout cas, les méthodes de budget de l'eau et les stratégies d'irrigation déficitaires ne peuvent plus être négligées. Ce qui est certain, c'est que la bonne qualité du sol, en évitant le ruissellement, en augmentant l'infiltration de l'eau et en la retenant mieux, est à considérer prioritairement, d'où le suivi indispensable du contenu en matières organiques du sol. Il reste, enfin, que certaines cultures sont plus adaptées au manque d'eau, et que des espoirs reposent encore sur les progrès de la sélection.

La qualité des sols est un facteur de productivité pour de nombreuses raisons, comme celles concernant l'eau que nous venons de citer ; or, depuis 1945, 17 % des terres cultivées ont vu leur productivité diminuer. Nul étonnement en cela, puisque les niveaux de matière organique sont dorénavant à la moitié de ce qu'ils étaient à l'origine. S'il s'agit de les compenser par des labours, des fertilisations et des irrigations accrues, nous entrons alors dans un cercle vicieux... dont le coût retombe, au premier chef, sur l'agriculteur. La bonne gestion de la matière organique, comme peut l'ambitionner l'agriculture de conservation des sols, est la clé du succès.

Tilman et al. (*op. cit.*) concentrent leur discussion sur l'efficience de l'utilisation des intrants (engrais, amendements, eau, graines), mais la nature même de ces intrants est au cœur des questions posées dans les approches agroécologiques-rurales de l'agriculture durable. Est-ce que ce sont des intrants renouvelables ? Ce n'est pas le cas, par exemple, du phosphore d'extraction minière. L'empreinte carbone de production de ces intrants, est-elle minimale ? Ce n'est pas le cas, par exemple, des fertilisants azotés de synthèse. Est-ce que ce sont des intrants produits localement, donc nécessitant un faible transport ? Ce n'est pas

le cas, par exemple, des engrais organiques au guano. Peut-on parler d'utilisation équitable ? Ce n'est pas toujours le cas, par exemple, de l'eau douce. L'agriculture emploie 70 % de l'eau douce mondiale et les autres usages concurrents indispensables doivent être préservés. La réflexion porte, par conséquent, sur la possibilité de s'approcher, le plus possible, de boucles fermées des intrants au sein de l'exploitation : avec des réserves en eau de pluie, avec la réutilisation systématique des résidus de culture, avec des rotations incluant des fixateurs d'azote et avec des techniques de travail du sol encourageant les mycorhizes.

En ce qui concerne les maladies et les ravageurs, Tilman et al. (*op. cit.*) rappellent qu'un résultat fondamental de l'épidémiologie est que le nombre de maladies et leur incidence sont proportionnels à l'abondance des hôtes ; or, la production intensive est concentrée sur trois espèces de céréales... À cet égard, on peut même être surpris du fait qu'il n'y ait pas eu récemment de catastrophes comme la famine de la pomme de terre en Irlande... Cela est dû, en particulier, au renouvellement très rapide des variétés, afin de faire face aux nouveaux problèmes et aux nouvelles résistances. La durée de vie des hybrides de maïs s'est réduite de moitié et est de l'ordre de quatre ans. Les mauvaises herbes résistent aux herbicides en une à deux décennies ; et les insectes aux pesticides en une seule décennie. Il s'agit là d'une course aux armements qui s'accélère, et il est possible que la recherche génétique ne puisse pas suivre. Ce sont donc d'autres voies complexes, comme la lutte intégrée contre les ennemis des cultures, qui restent à encourager, et plus généralement, les méthodes d'agriculture basées sur la biodiversité (Therond et al., 2017), végétale en particulier. La logique est de mieux comprendre les espèces qui jouent le rôle essentiel dans l'accomplissement des fonctions écologiques et qui fournissent les contributions majeures ; il faut alors donner à ces espèces les moyens de remplir ce rôle. La conservation d'habitats semi-naturels est, par conséquent, essentielle[511], pour que les pollinisateurs et les prédateurs de ravageurs (et les ravageurs aussi, il est vrai) puissent se nourrir, se

[511] Pour la fourniture de certains approvisionnements également, pour la diversité génétique sauvage, et pour des contributions non-matérielles.

réfugier, se reproduire et passer l'hiver. Les NCP s'exercent à différentes échelles : certaines correspondent à l'exploitation, mais d'autres (pollinisation, contrôle des nuisibles) s'expriment plus à l'échelle du paysage ou de bassins-versants. Dans ce dernier cas, une gestion collective est probablement plus efficace.

Bien que cela ne soit pas notre propos, les auteurs évoquent aussi les problèmes posés par l'industrialisation de l'élevage, tant du côté d'épidémies dramatiques n'épargnant pas les humains, que du côté de la gestion de leurs déjections, participant fortement à la dérégulation du climat. Peut-être faudrait-il diminuer la taille des élevages... et la consommation personnelle de viande dans les pays développés (et en voie de développement) ?

Ces pistes de solutions restent bien sûr à adapter, à la fois au contexte climatique, pédologique, économique, social et culturel local : *il y a ainsi peu de chances que se dégage une solution universelle d'agriculture durable*. Comment ensuite mettre en place les différentes solutions ? Les agriculteurs doivent recevoir de la formation, car il s'agit de changements complexes et intensifs en connaissances. Il manque aussi des incitations à changer leurs pratiques : de nombreux services, ou plutôt disservices, ne les touchent en effet pas directement, et les subventions actuelles poussent plus à la production qu'à la durabilité. On rappellera que les agriculteurs français ne sont pas tenus de faire l'impossible : ils travaillent déjà 55 heures par semaine en moyenne ; avec un revenu de l'ordre de 1 800 € par mois (INSEE, 2021), mais très variable d'une exploitation à l'autre ; et leur moyenne d'âge est de 50 ans. Je finis sur une phrase de la conclusion de Tilman et al. (*op. cit.*) : « Sustainable agriculture will require that society appropriately rewards ranchers, farmers and other agriculturalists for the production of both food and ecosystem services ».

13.4 Contributions du potager aux populations

13.4.1 Le potager : un agrosystème particulier

Le potager est un agrosystème, mais un agrosystème de petite taille. Par rapport au cadre dans lequel il est compris, il ne peut avoir, pris isolément, qu'un effet environnemental modeste. Ce cadre, à la

campagne, peut-être semi-naturel, le potager devrait alors bénéficier de nombre d'effets positifs, en tout cas, en ce qui concerne la biodiversité ; mais le potager peut aussi être « encerclé » d'agrosystèmes, et dans ce cas, selon leur mode de gestion, leurs impacts seront bien différents ; en ville, enfin, la situation n'est plus la même, le potager va constituer une « oasis », et si on les considère dans leur ensemble, les potagers de toute une ville peuvent faire une différence.

Outre sa taille, le potager possède la spécificité d'être généralement inclus dans un jardin, lui-même inclus dans le cadre environnant ; et ce jardin est usuellement géré par les mêmes jardiniers. Il s'avère que la gestion du jardin va avoir un impact sur le potager, en comportant, par exemple, des habitats pour attirer la biodiversité.

La dernière spécificité est qu'un agrosystème a pour priorité les contributions matérielles aux populations ; et s'il est mené de façon écologique, il y ajoute des contributions de régulation. En ce qui concerne les potagers, l'*équilibre entre les différentes contributions est beaucoup plus varié*, et il dépend de quelques facteurs que l'on peut identifier.

13.4.2 Équilibre entre les types de contributions

L'extension de l'agriculture à de nouveaux espaces a plutôt été écartée quelques lignes auparavant. Cependant, dans les villes, il reste quelques espaces vacants qui peuvent se prêter à divers usages, entre autres l'agriculture urbaine. À l'intention des personnes en charge de la planification urbaine et des décideurs politiques, Wilhelm et Smith (2017) exhibent, pour quatre types d'usage des sols, quels sont potentiellement les services écosystémiques développés (Figure 126).

Les surfaces imperméables se caractérisent par une pauvreté générale, elles constituent pourtant la majorité des surfaces en ville, et parfois, dans certains jardins... Le sol nu ou recouvert d'une pelouse offre, tout au plus, de faibles contributions non-matérielles (récréatives) et de régulation (gestion de l'eau, voire de la matière organique). Avec les espaces verts, les contributions non-matérielles et de régulation sont très élevées. Ce n'est qu'avec l'agriculture urbaine qu'apparaissent les contributions matérielles, les contributions de

régulation restant assez bien assurées, sauf peut-être le maintien des habitats pour la biodiversité. Les auteurs insistent, par conséquent, sur l'intérêt de l'agriculture urbaine, et donc du potager urbain, qui est la seule forme à combiner la provision de contributions matérielles augmentant la résilience urbaine, ainsi que de contributions non-matérielles, avec des bienfaits pour l'environnement ; et au bout du compte, à maximiser le bien-être des citadins.

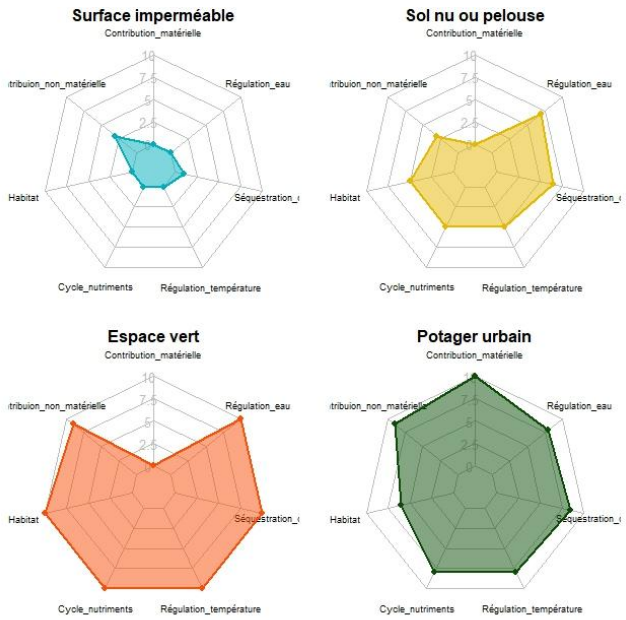


Figure 126 : Quatre types d'utilisation du sol en ville et leurs potentielles contributions aux populations. Adapté de Wilhelm et Smith (2017).

On peut remarquer, d'une part, que nos jardins sont un mélange de ces quatre types de surface : il nous revient d'en définir les proportions, et par conséquent, les contributions qui en découlent. Mais d'autre part, il s'agit de *potentielles* contributions ; en réalité, on peut gérer sa pelouse ou son potager de bien des manières, plus ou moins positives pour l'environnement : c'est ce que nous allons à présent détailler.

Effets de la hiérarchie des besoins des jardiniers

Clarke et al. (2012) explorent la biodiversité et les types de services écosystémiques que présentent des jardins domestiques dans la région

de Beijing. Huai et Hamilton (2009) avaient auparavant décrit plusieurs de leurs contributions non-matérielles, rattachées en particulier à la tradition ou à la religion. Mais, ici, il s'agit d'autres contributions non-matérielles, telles que la culture de plantes ornementales pour le plaisir esthétique (voire le statut social), et aussi de contributions matérielles comme peut en fournir un potager. Clarke et al. (*op. cit.*) font une hypothèse intéressante : celle de l'influence d'une hiérarchie des besoins (sur le type de contribution visée). Les uns, qui ont un meilleur statut économique, souhaiteraient d'abord embellir leur jardin, donc des contributions non-matérielles, alors que les autres rechercheraient des contributions plus matérielles, comme des légumes ou des plantes médicinales. Dans cette région, il se trouve que le statut social diminue avec la distance à la métropole ; en revanche, les compétences agricoles augmentent avec cette distance (beaucoup de personnes travaillent, en fait, directement dans l'agriculture à la campagne). Une seconde hypothèse formulée, assez classique, est que la relation entre la taille du jardin et la biodiversité serait positive.

Cinq villages sont comparés, et une centaine de jardins au total. On constate que les jardins proches de la métropole contiennent effectivement plus de diversité des plantes ornementales, alors qu'à l'inverse, la diversité des plantes alimentaires est plus forte dans les villages les plus reculés[512]. Par des courbes de raréfaction, les auteurs déduisent que leur échantillonnage, pourtant important, n'a pas permis de recenser toutes les espèces ornementales (188 en réalité ?), mais ils sont pratiquement parvenus à inventorier toutes les espèces alimentaires (112 en réalité ?). Cela confirme que *les jardins privés peuvent être des hotspots de la biodiversité cultivée* (Galluzzi et al., 2010). Les plantes ornementales ne sont, en définitive, limitées que par le choix disponible en magasin, qui est considérable dans cette catégorie. La relation entre la taille du jardin et la biodiversité n'est vérifiée que dans le cas des villages reculés, c'est-à-dire qu'il s'agit de biodiversité alimentaire, où l'espace supplémentaire permet d'ajouter

[512] Les villages intermédiaires ont la plus grande diversité générale, en combinant les deux aspects.

d'autres espèces pour couvrir les besoins[513], les compétences techniques étant présentes pour maintenir un jardin à la fois dense[514] et diversifié.

En résumé, tant la biodiversité que le type de services écosystémiques qu'elle rend sont à moduler selon le statut social du jardinier, la taille de son jardin et ses compétences.

Faiblesse des services de régulation des potagers des champs

Calvet-Mir et al. (2012), lors d'un travail dans les Pyrénées espagnoles, sont peut-être les premiers à considérer les potagers comme de véritables agrosystèmes. Leur démarche multidisciplinaire consiste, dans un premier temps, à établir une liste des services écosystémiques propres au potager ; la séquestration du carbone, par exemple, n'y figure pas, car les cultures sont replantées très régulièrement et le sol est travaillé, ce qui rend cet effet négligeable par rapport à, disons, de la foresterie. Dans un second temps, ils demandent à 151 parties prenantes (jardiniers, habitants de la région ou visiteurs) de noter ces services, puis ils font de même avec un panel de sept experts. Il faut donc souligner qu'il ne s'agit pas, ici, d'une évaluation monétaire, mais d'une *évaluation (assumée comme) subjective* d'êtres humains, *a priori* bien placés pour évaluer leur bien-être... Notons que ces potagers sont d'une taille moyenne de 150 m^2, que leur conduite est essentiellement biologique (fertilité gérée avec du fumier, méthodes manuelles de désherbage, traitements biologiques, rotations de culture) et que de nombreuses variétés locales (39 !) sont cultivées.

Les résultats obtenus par les parties prenantes et les experts sont très similaires. Le premier service qui ressort est celui, matériel, d'approvisionnement : produire de la nourriture comme c'est le cas dans les agrosystèmes. Toutefois, les parties prenantes insistent sur la qualité de cette nourriture et la possibilité d'une indépendance par rapport aux prix du marché. Les services culturels, non-matériels, sont très importants pour les potagers, alors qu'ils sont moins mis en avant dans l'agriculture classique. Les potagers sont le lieu du loisir, de la sociabilité, de valeurs esthétiques, mais il y a aussi un maintien de variétés locales qui sont reliées à des traditions, comme la préparation

[513] Dans ces villages, l'offre alimentaire est très pauvre, et les habitants également.
[514] Les jardins de la campagne sont plus densément plantés : rien ne se perd !

de plats typiques. Ce service de maintien des variétés locales n'est plus du tout assuré par l'agriculture, et les potagers privés sont maintenant considérés comme des lieux de conservation, *in situ*, importants pour la biodiversité cultivée.

À l'inverse, les services de régulation, au centre de l'analyse de la durabilité des agrosystèmes, sont peu valorisés, y compris par les experts. Seul le maintien d'une bonne qualité des sols est relevé, sans doute à juste titre, au vu des techniques agroécologiques employées. Les auteurs suggèrent deux explications : les jardins sont de petite taille et ils sont intégrés dans une région rurale ; avec de nombreuses forêts d'alentour, qui ont probablement plus d'impact en termes de régulation.

Potagers des champs et potagers des villes

Langemeyer et al. (2016) étudient les jardins urbains sous l'angle des services écosystémiques. Si les résultats, pour la plupart, ne sont pas nouveaux et ont été largement rapportés dans les deux chapitres précédents, le cadre employé permet néanmoins de les articuler.

Les services d'approvisionnement en ville consistent essentiellement en des légumes, des fruits, éventuellement du miel et des œufs. Dans une étude citée par les auteurs, concernant Barcelone (Camps-Calvet et al., 2016), avec une méthodologie identique à celle de Calvet-Mir et al. (2012), ces services matériels d'approvisionnement sont largement dépassés par les services non-matériels culturels en ville, alors que ce n'était pas le cas à la campagne. D'ailleurs, la production de plantes ornementales en vient parfois à remplacer la nourriture[515], comme c'était le cas à Beijing. Ces plantes ornementales peuvent servir à embellir le jardin, mais aussi à constituer des fleurs coupées pour la maison ou des cadeaux. Les herbes aromatiques sont également très présentes. Lorsque nous avons affaire à des jardiniers migrants, des légumes difficiles à trouver dans le commerce, mais qui tiennent une place importante dans leurs traditions (culinaires en particulier), s'y retrouvent. Enfin, mais c'est plus rare, il y a également une production de plantes médicinales. On peut distinguer dans l'approvisionnement

[515] Dans une étude en Pologne par Stepien (2014), thèse non consultée.

en nourriture la sécurité alimentaire, particulièrement importante en temps de crise ou dans des déserts de nourriture, et la qualité des productions, deux thèmes abordés précédemment.

Les écosystèmes qui incluent l'air, l'eau, le sol (la lithosphère) et les êtres vivants permettent de réguler l'environnement et les conditions de vie pour les êtres humains. La taille des jardins urbains est telle qu'il ne s'agit pas ici d'effets globaux, comme ceux que peut avoir l'agriculture, mais d'*effets de régulation plus locaux*. Ils sont probablement plus importants en ville qu'à la campagne, où ils sont « perdus » dans les effets du paysage, constitué en partie d'écosystèmes naturels, semi-naturels ou fortement gérés par les humains. De nombreux effets sur la qualité du sol ont cependant été observés[516] qui permettent d'augmenter la production, comme un meilleur taux de matière organique et de nutriments, une meilleure structure, une plus grande biodiversité et une meilleure rétention en eau. L'érosion de ces sols est également moindre. Le cycle de l'eau est amélioré, du fait d'une infiltration plus aisée et de l'évapotranspiration. Le risque d'inondation est diminué, même si les surfaces concernées étant petites, il n'y a pas d'effet miracle à attendre de ce côté. Il existe une influence locale sur la régulation du climat : l'air circule mieux et l'évapotranspiration limite l'effet d'îlot de chaleur urbain. Les arbres, en particulier, permettent un effet de filtration de la pollution, mais aussi de stockage du carbone, toutefois, à nouveau, de façon limitée. Les effets sur la pollinisation et la dispersion des graines sont nettement plus évidents et rejaillissent même sur les zones adjacentes.

Concernant les services de support, il y a, d'une part, un effet de refuge pour la faune et la flore, et d'autre part, un effet de maintien de la diversité génétique. En ce qui concerne les plantes, cela joue sur les espèces cultivées avec des cultivars locaux, mais aussi sur des espèces spontanées. Puisque les services de régulation dépendent, en partie, de la biodiversité, ces services de la biodiversité sont essentiels. Notons que les services de régulation et de support ne bénéficient pas qu'aux jardiniers, mais à tous les citadins.

---

[516] Par rapport à des zones vertes urbaines ou péri-urbaines.

Les services culturels ont largement été évoqués dans le chapitre précédent : loisirs ; expérience avec la nature (essentielle en ville !) ; bénéfices esthétiques, psychologiques, physiques et sociaux ; éducation à l'environnement ; et compétences spécifiques. Une particularité des potagers de ville, c'est qu'ils sont plus souvent gérés collectivement, et les effets de capital social y sont donc plus élevés.

Effets de la socialisation (genrée) des jardiniers

Calvet-Mir et al. (1016) reprennent la méthodologie de Calvet-Mir et al. (2012) sous un angle différent : les femmes et les hommes, valorisent-ils de la même façon les services écosystémiques au potager ? L'analyse révèle que les femmes donnent des notes plus élevées pour l'ensemble des services, ce qui est assez logique, car dans cette vallée des Pyrénées espagnoles, ce sont elles qui prennent, le plus souvent, en charge le potager. Le seul service noté de façon similaire par les deux sexes est celui d'approvisionnement en alimentation de qualité, qui obtient la note la plus élevée (4.9/5), et montre, une fois de plus, le rôle nourricier plus important dans les potagers des champs que dans ceux des villes. En revanche, la plus nette différence est la fourniture d'éléments, soit pour des cultes religieux[517], soit pour la décoration, que les auteurs relient au rôle culturel traditionnellement assigné aux femmes. De même, l'approvisionnement en fourrage est bien mieux valorisé par les femmes... qui sont, dans cette région, responsables de nourrir les animaux domestiques (lapins, basse-cour...). La conclusion des auteurs est que la *socialisation, ici genrée, joue un rôle important dans la formation des valeurs accordées aux différents services écosystémiques fournis par un potager* ; et plus généralement, dans l'attitude face aux questions environnementales. Le genre, nettement plus que l'âge dans cette étude, apparaît comme un facteur explicatif majeur pour saisir les attitudes des différents jardiniers envers l'environnement.

Effets des motivations environnementales des jardiniers

Au-delà de la socio-démographie, tous les jardiniers n'ont pas les mêmes motivations. Nous avions appris, dans le chapitre précédent,

[517] Comme de planter des chrysanthèmes afin de fleurir des tombes.

qu'il était assez rare qu'ils aient des préoccupations environnementales comme motivations premières, mais lorsque c'était le cas, il s'agissait le plus souvent de protéger la biodiversité.

Raymond et al. (2019) ont mené une enquête sur de tels jardiniers, afin de savoir si les bénéfices du jardinage qu'ils percevaient étaient différents de ceux appréhendés par des jardiniers avançant des motivations plus classiques.

D'un côté, on retrouve chez eux les habituels bénéfices sociaux, bénéfices en termes de santé physique et bénéfices en termes psychologiques (sans surprise, pour ces derniers, particulièrement celui du sentiment de connexion avec la nature). Ils insistent, en revanche, beaucoup moins sur la nutrition ou les aspects économiques de la production de légumes. D'un autre côté, ils témoignent aussi de bénéfices qui proviennent directement de leur motivation principale : le plaisir de voir des plantes indigènes pousser, des animaux venir dans leur jardin, les saisons changer. D'un autre côté encore, ils évoquent des sortes de bénéfices éthiques : léguer quelque chose qui vaille la peine aux générations suivantes et leur en enseigner l'importance ; des bénéfices en termes d'apprentissage, car ils connaissent de mieux en mieux la nature ; des bénéfices d'attachement au lieu, ils se sentent plus proches de cet endroit, avec sa végétation propre, sa faune propre, et ils constatent que leur famille a désormais une histoire dans cette place.

Pour finir, il y a aussi des coûts qui sont des conflits avec des voisins ou des passants, qui n'ont pas la même conception du jardin propre et du jardin sale, et qui peuvent aller jusqu'à porter plainte. Au Canada, où s'est déroulée l'étude, il y a en effet des réglementations indiquant ce que doit être la bonne tenue des jardins, ou des pelouses... mais, surtout (asseyez-vous bien[518] avant de lire les lignes suivantes) : une telle maison, avec son « sale jardin », peut faire baisser la valeur immobilière du voisinage !

La biodiversité chute, mais la dernière espèce qui restera sur Terre sera le capitaliste (*Homo cresus*).

---

[518] Comment est votre banquette ? Elle est bonne ?

13.4.3 Évaluation des services et disservices écosystémiques au potager

Un petit tour sous les tropiques

Mohri et al. (2013) comparent trois systèmes de jardins domestiques en Indonésie, au Sri Lanka et au Vietnam. La situation climatique, tropicale humide, est très différente de celle de la France métropolitaine, mais ces systèmes semblent souvent inspirer la permaculture et les techniques de jardin-forêt : leur fonctionnement peut donc nous intéresser. D'une surface de l'ordre du demi-hectare (quand même), ce sont des systèmes organisés verticalement sur plusieurs étages de végétation, mais qui ne mélangent pas tout horizontalement : les graphiques de l'article montrent que le potager, en particulier, est au plus proche de l'habitation, bien séparé et largement éclairé, alors que la quantité de lumière est incomparable à celle reçue en France (métropolitaine). Les trois systèmes observés présentent cependant de nettes différences, au moins en termes d'espèces cultivées, et montrent, eux-mêmes, une variabilité importante : il ne faut pas penser que tous ces jardins se ressemblent !

L'objectif de l'étude est de déterminer la biodiversité et les services écosystémiques que fournissent ces systèmes de jardins. Pour cette évaluation, les auteurs emploient le cadre du *Millenium Ecosystem Assessment*.

En ce qui concerne les services d'approvisionnement, la diversité des productions est grande : de nombreux fruits, des céréales, des tubercules, des légumes, de nombreux piments ; mais aussi du bois, comme carburant ou comme matériau de construction ; et des plantes médicinales ; sans compter du petit élevage et de l'aquaculture. Il s'agit de subsister, mais une partie est aussi commercialisée pour assurer un revenu. On estime que ces jardins sont d'importantes zones de conservation de ressources génétiques, cependant peu d'inventaires sont réellement disponibles.

En ce qui concerne les services de régulation, il y a un effet de ces jardins sur le climat. Tout d'abord, un effet local, avec la création de microclimats plus agréables aux humains (ombre, température douce, atténuation du vent) ; et au niveau global, il est considéré que ces jardins ont la même capacité à stocker du carbone qu'une forêt

secondaire. Ils permettent, en outre, une reforestation dans une zone habitée. De la même façon, l'érosion des sols est comparable à celle d'une forêt. Ces systèmes sont spécifiquement étudiés pour permettre le recyclage des déchets, soit des déchets verts, soit des excréments animaux. En ce qui concerne les services de pollinisation et de contrôle biologique, la biodiversité présente et les multiples habitats laissent penser à leur efficacité, mais les chercheurs reconnaissent qu'il n'y a pas eu de véritables évaluations scientifiques à ce sujet.

En ce qui concerne les services de support, et plus particulièrement, les cycles de nutriments, la chute de litière est plus importante dans ces jardins que dans une forêt, toutefois il y a des exportations. À nouveau, sans étude dédiée à ce bilan, il est difficile de savoir si les sols se forment et si leur fertilité est durable.

En ce qui concerne les services culturels, ils sont plus évidents, ces jardins servent de lieux de sociabilité, modèlent le paysage de façon locale et permettent de transmettre des traditions.

Ces jardins font montre d'une grande capacité d'adaptation. De nombreux changements économiques et sociaux se produisent dans ces pays, et les jardins évoluent en conséquence : souvent vers plus de commercialisation et de spécialisation, voire d'utilisation d'intrants ; les fonctions médicinales tendent à disparaître avec la médecine moderne ; en revanche, des clôtures apparaissent ; certaines espèces invasives viennent modifier la végétation spontanée. La population croît, et donc, la taille des jardins diminue. Enfin, les jardiniers témoignent être affectés par le changement climatique avec, en particulier, des épisodes de sécheresse et de crues extrêmes.

Il est donc difficile de savoir quels vont être les nouveaux arbitrages entre les services écosystémiques produits dans ces jardins. D'autant, comme le disent les auteurs, après avoir parcouru une centaine d'articles sur les services écosystémiques dans ces jardins, que l'on a très peu de véritables évaluations, qu'elles sont disparates et qu'il est difficile de se faire une idée générale des interactions entre ces services. Une de leurs remarques me paraît extrêmement intéressante : « la *diversité et la multifonctionnalité* de ces systèmes de jardins jouent un rôle important en fournissant une résilience générale contre des changements écosystémiques et climatiques ». En effet, c'est peut-être *en pratiquant tous différemment dans nos potagers* que nous avons une

chance de réussir, globalement, une adaptation, *plus qu'en utilisant tous une même méthode de maraîchage, même censée être optimale*, contre ces risques.

Un petit tour dans les potagers privés du « Nord »

Taylor et Lovell (2014) cherchent à réunir des informations scientifiques concernant les potagers privés dans les pays développés. Ils soulignent d'abord que les décideurs publics s'intéressent peu à leur développement, alors qu'ils représentent, tous ensemble une part bien plus importante de la surface du territoire que les potagers collectifs, comme ils le constatent à Chicago où ils travaillent. Mais ce n'est guère mieux du côté de la recherche, on ne connaît bien que les jardins privés dans les pays du Sud ou les jardins collectifs dans les pays du Nord. Ils donnent plusieurs explications à cette paucité : les pouvoirs publics, considérant qu'il s'agit là du domaine privé, ne subventionnent pas d'études à ce sujet ; c'est un sujet de recherche qui ne fait pas très « sérieux » ; les jardins du Nord sont souvent vus comme formant un paysage assez homogène, occupé essentiellement par des pelouses ; les pratiques et croyances qui sont associées au potager font partie d'un savoir indigène ou populaire, qui n'est plus censé exister dans le Nord, du fait des développements scientifiques et technologiques ; la dévaluation, dans un système capitaliste, de biens qui ne sont pas vendus, mais simplement échangés ou consommés dans le cercle familial[519] ; et des raisons plus techniques : ces jardins privés sont moins visibles, moins accessibles et les identifier, et plus encore, les échantillonner correctement, est bien compliqué ; il faut s'assurer du concours de nombreux propriétaires ; *ces jardins sont d'une grande diversité de situations géographiques, de tailles, d'objectifs, et il paraît naïf d'en parler de façon homogène* ; pour finir, leur étude, pour être un peu complète, réclame forcément une approche multidisciplinaire (économie, sociologie, psychologie, biologie, pédologie, agronomie...). On comprendra, dès lors, la pauvreté des informations scientifiques sur les potagers privés dans les pays développés : au moins, *on sait qu'on sait peu.*

---

[519] Même les ONG semblent préférer promouvoir des fermes urbaines, des dispositifs de professionnalisation, plutôt qu'une autoproduction moins légitime.

Néanmoins, Taylor et Lovell (*op. cit.*) s'attachent à compiler les informations disponibles, en étudiant, à la fois, les aspects sociaux et biophysiques. Au point de vue théorique, ces recherches relèvent de façon privilégiée de la théorie des systèmes socio-écologiques[520], car il s'agit d'expliquer les interactions entre les humains et leur environnement. C'est encore le concept de service écosystémique qui est apparu comme central : pour relier les écosystèmes, leur biocénose et leurs fonctions, aux populations humaines, par le truchement des services qu'ils leur rendent.

En ce qui concerne les contributions matérielles (alimentaires), celle à la sécurité alimentaire est sans doute faible, comme nous l'avons observé précédemment, avec des productivités extrêmement variables au potager, tout comme les profits qui en sont retirés. *La qualité sanitaire des productions*, généralement présupposée (c'est du vrai bio !), *reste, en définitive, un point à éclaircir* : le sol et l'eau pouvant être contaminés, et la fertilisation complètement déséquilibrée. Ce qui est, en revanche, bien établi, c'est que la pratique d'un potager augmente la consommation de fruits et de légumes, un point clairement positif pour la santé. De même, une corrélation a été rapportée entre la pratique potagère et l'activisme alimentaire, avec des achats complémentaires à des producteurs locaux.

En ce qui concerne les contributions non-matérielles, les jardins communautaires ont engendré toute une littérature sur la cohésion et l'intégration de populations marginalisées, dont nous avons vu qu'elle était plus discutée actuellement. Au niveau du potager privé, il y a bien des échanges de productions, de conseils voire d'outils, mais souvent dans un cercle très limité. L'exception est celle des échanges de graines. Mais le développement de leur distribution commerciale a très fortement réduit ce troc, ce qui peut avoir des effets collatéraux sur la biodiversité cultivée. En revanche, le jardinage entraîne souvent des communautés de pratiques qui se développe par le biais d'associations, de stages, de formations, mais également, des

---

[520] Ils font aussi allusion aux théories de l'acteur-réseau et de l'assemblage, qui ont le mérite de donner aux êtres vivants non-humains une part plus importante dans le raisonnement ; mais les applications sont encore balbutiantes.

communautés plus virtuelles, à travers les médias sociaux. N'oublions pas, aussi, que le jardin peut être source de conflits de voisinage. Même au sein de la famille, on ne connaît pas précisément l'effet du jardinage en commun, on en sait peu sur les reproductions et négociations de rôles de genre.

De la même façon, les effets de résistance collective et d'autonomisation personnelle sont souvent avancés pour les jardins collectifs ; il semble que cet espoir, lié à la contre-culture des années 1970, ait fait long feu. Ils sont à présent souvent organisés par des institutions. Le jardinage a, par le passé, plutôt été un outil de contrôle et d'assimilation de populations migrantes (des campagnes, par exemple). Si la permaculture évoque encore une révolution par le bas et individuelle des systèmes d'alimentation, son impact est inconnu.

> Du côté de chez Stéphane : Il existe une grande littérature, dans les pays anglo-saxons, sur la reproduction culturelle dans les jardins pour les populations immigrées et descendant d'immigrés. J'ai le sentiment qu'en France, l'accès de ces personnes à la propriété est limité, que les jardins collectifs sont finalement occupés par des classes sociales moyennes et supérieures et que les savoir et les motivations se sont évanouis avec le passage des générations ; mais cela n'engage que moi !
>
> Plus généralement, l'hypothèse est faite que « le potager est un support de reproduction du mode de vie du lieu d'origine du jardinier », hypothèse qui demanderait à être mieux étayée, mais me semble être pour le jardinier une question intéressante à se poser. Et cette transmission, comment s'est-elle faite ? Comment va-t-elle se faire ?

On en arrive au point central de ce chapitre. Et, en fait, *les études sur l'impact écologique sont rarissimes* ! Il y a sans doute une augmentation des pollinisateurs et plus de biodiversité dans un jardin en ville qu'aux alentours, mais ce n'est pas forcément discriminant par rapport à un espace urbain laissé, tout simplement, en friche. La plus grande diversité végétale des jardins est souvent due à des plantes exotiques, dont certaines peuvent être envahissantes et dommageables.

En ce qui concerne la biodiversité cultivée, des effets contradictoires sont relevés : si les potagers ont été longtemps considérés comme des hotspots de l'agrodiversité, du fait de l'activité de production et d'échange de graines entre les jardiniers, c'est bien moins le cas avec la professionnalisation de l'activité semencière ; et encore, ceci est à nuancer, car certains obtenteurs et producteurs sont sur des créneaux de niche, en se reportant sur la conservation de variétés locales. En fait, cette agrobiodiversité est tout simplement peu mesurée dans le Nord, alors que les rares études ont montré des résultats très surprenants : une richesse de 80 espèces présentes, ce qui correspond à l'agrobiodiversité tant louée des jardins domestiques du Sud !

Des effets indubitablement négatifs ont été relevés avec des taux d'azote et de phosphore nettement trop élevés (Witzling et al. 2011). La qualité de la structure des sols est probablement améliorée, permettant une meilleure régulation de l'eau. Si beaucoup de jardiniers compostent, ce qui *a priori* est une boucle vertueuse, il convient de s'assurer de la qualité du compost produit et de l'importance des « fuites » lors de sa production. En fait, la question des auteurs sur les services de régulation reste à étudier : « Quelles sont les caractéristiques des cycles des nutriments, du carbone et de l'eau dans les potagers privés ? » Sont-ils ouverts ? Fermés ? Insuffisants ? Excessifs ? En quelle période ?

Nous sommes donc un peu dans l'inconnu sur les services ou disservices de régulation que procurent en général un potager. Mais est-ce que, au moins, certaines pratiques pourraient être conseillées ? Guitart et al. (2015) s'intéressent aux jardins collectifs partagés qui ont été bien étudiés[521], particulièrement sous l'angle de leurs effets sociaux, et dans une moindre mesure, de leur productivité. On avance assez souvent à leur sujet des effets environnementaux ; le problème étant que nous ne disposons d'aucune preuve à ce sujet[522].

---

[521] En tout cas, plus que les jardins privés.

[522] Ce qui est un biais de recherche, les études précédentes ayant été menées par des chercheurs en sciences sociales. Un peu à l'inverse, les recherches initiales sur les services écosystémiques étaient situées dans le champ des sciences naturelles et de l'économie : il a fallu une approche multidisciplinaire pour en arriver aux

Or, lorsqu'une collectivité locale décide d'octroyer un terrain pour ce faire, ou bien une subvention ou des ressources humaines, cet argent public est-il mieux employé ici, en le réservant finalement à quelques usagers, plutôt que dans une autre infrastructure verte qui pourrait être ouverte à tous ? Des deux propositions, laquelle est la plus intéressante pour la société ? Parallèlement, il arrive que, pour des jardins privés, des collectivités locales subventionnent des composteurs, des réservoirs à eau ou bien des arbres. Quel gain y a-t-il pour la société par rapport à un autre investissement « vert » ? Il faut donc y regarder de plus près et voir si les pratiques de jardinage, supposément vertes, le sont bien !

Sur la base de 50 jardins collectifs, d'une surface proche de 1 000 m^2 en moyenne, les chercheurs vont s'appliquer à dénombrer des pratiques, censément écologiques, sur quatre dimensions : la gestion du sol, de l'eau et des indésirables (maladies, ravageurs, mauvaises herbes), mais aussi la provenance des plants et graines employés. Si on prend, par exemple, la dimension de la gestion de l'eau, il s'agit de six critères : n'utiliser que l'eau de pluie, disposer d'un réservoir pour celle-ci, appliquer un paillage, employer des plantes réclamant peu d'eau, mettre en place une irrigation efficiente et avoir des fossés. On ajoute un point, si on remplit le critère, et on en enlève un, si ce n'est pas le cas. On peut alors voir, d'une part, pour une dimension ou un critère, s'il est bien noté sur l'ensemble des jardins : ce qui indique, par là, le degré d'adoption d'une « bonne » pratique ; ou d'autre part, pour un unique jardin, si l'agrégation de l'ensemble des critères, qui fournit une « note » s'étalant de -23 à +30 (qu'ils appellent *indice de permaculture*), le désigne plutôt comme écologique[523].

Guitart et al. (*op. cit.*) précisent bien qu'il s'agit là d'un *proxy*, c'est-à-dire une mesure qui donne *seulement une idée de ce que l'on cherche vraiment*. Ce que l'on cherche vraiment ? Ce sont les

---

contributions de la nature aux populations, incluant des considérations sociales et culturelles.

[523] Vous pouvez, vous aussi, jouer à noter votre jardin avec cet indice, car l'ensemble des critères est donné dans le tableau 1 de l'article, dont une version est disponible en ligne : https://core.ac.uk

contributions de la nature que fournissent ces potagers aux populations, plus précisément les contributions de régulation. Or, si je reprends le thème de l'eau, nous avons comme contributions : (1) régulation quantitative de l'eau douce et (2) régulation qualitative de l'eau douce, sans compter la contribution matérielle centrale (3) aliments (on veut aussi manger des légumes). On peut très bien cocher la majorité des six critères, et de façon opposée, soit n'avoir pas assez d'eau et que rien ne pousse, soit trop irriguer et lessiver l'azote, soit employer de l'eau de pluie de mauvaise qualité ou des eaux grises douteuses... *Une pratique n'est donc pas bonne (ou écologique) en soi*, elle prend sa valeur selon un certain contexte, pédoclimatique ou de paysage environnant ou de taille du jardin, et selon les motivations et compétences du jardinier.

Disservices du potager

Russo et al. (2017) ont établi, pour les infrastructures vertes en ville, une liste des disservices écosystémiques potentiels. Je ne vais, ici, reprendre que les éléments qui peuvent s'appliquer à un potager.

Le risque le plus étudié est celui entraîné par la contamination des sols, et ses conséquences sur les légumes. Il est majeur en ville où les jardins succèdent parfois à des espaces industriels. Mais la proximité des routes n'est pas bonne non plus, générant une pollution pouvant être sévère, avec des métaux lourds : il est ainsi recommandé de ne pas cultiver à moins de 10 mètres d'une grande route.

> Du côté de chez Stéphane : Mais le risque de contamination des sols n'est pas nul à la campagne : je suis d'origine beaujolaise, et réaliser son potager sur des zones auparavant plantées en vigne, certainement traitées par de grandes quantités de pesticides, ne me semble pas anodin.

La gestion de l'eau est un problème complexe, je renvoie au chapitre correspondant pour trouver un juste-milieu, selon les saisons, entre des irrigations excessives, qui lessivent les nutriments (on ne sait où), et des irrigations insuffisantes, qui sacrifient les cultures, mais aussi la biodiversité nombreuse qui en dépend.

> Du côté de chez Stéphane : Certains refusent, en été, d'irriguer leur potager à l'eau potable ou l'arrosent très peu (pour des raisons tout à fait respectables). J'ai déjà signalé mon opinion sur la question : il faut alors réduire en cette saison la taille du potager pour lui fournir la quantité adéquate avec une irrigation déficitaire ; sinon, autant ne pas faire de potager, et laisser s'exprimer la végétation spontanée.

La bonne gestion des nutriments est aussi un problème complexe abordé dans le chapitre sur la santé chimique du sol. Il faut savoir que les potagers sont très couramment surabondants en phosphore et que maîtriser les apports d'azote est difficile. *La fertilisation, même organique, peut être polluante selon son mode d'application.*

Il va sans dire que tout emploi de pesticides, chimiques *ou biologiques*, menace la biodiversité et parfois même la santé humaine. De façon plus anecdotique, pour ceux qui possèdent dans leur jardin de nombreux arbres, les risques d'allergie existent, et ceux... de chutes de fruits également.

Si la biodiversité végétale est un objectif louable et entraînant de nombreuses conséquences positives, certaines espèces exotiques sont invasives et devraient être évitées.

13.4.4 Potager durable

Agrosystème de petite taille, inclus dans un jardin lui-même inclus dans l'écosystème environnant, la réflexion sur la durabilité d'un potage va interroger successivement : (1) notre capacité à évaluer ses contributions, et en premier lieu, celles de régulation, garantes d'un bon fonctionnement écologique ; (2) la surface qu'il occupe ; (3) la durabilité du jardin le contenant ; (4) les pistes qu'ouvrent les considérations sur la durabilité des agrosystèmes ; et plus particulièrement, (6) la possibilité d'une gestion basée sur la biodiversité.

Évaluer les contributions de son propre potager

Afin d'entreprendre des interventions au potager, ou bien afin d'en vérifier l'efficacité, il est bon d'avoir des mesures, à un moment précis,

des contributions de ce potager. Il est donc nécessaire de disposer d'indicateurs fiables, et possiblement mesurables par un jardinier amateur. Ces informations pourront être recueillies soit par le biais d'une cartographie du jardin (et du potager), soit d'une analyse classique de sol, soit de la tenue d'un carnet répertoriant les données météorologiques essentielles, les espèces et les variétés cultivées, les dates d'installation, les récoltes obtenues, les interventions effectuées (fertilisation, irrigation, désherbage, compostage...) et éventuellement, identifiant une liste des habitats et de la biodiversité présente (selon notre niveau de compétences en biologie : adventices, insectes, macrofaune du sol, les vers de terre au moins).

Pour donner quelques idées de tels indicateurs, le Tableau 23 résume ceux que Russo et al. (2017) ont repérés, dans la littérature scientifique, concernant les jardins domestiques urbains ; et ceux que Cabral et al. (2017) ont effectivement mesurés dans des potagers allemands. En ce qui concerne ces derniers, les mesures sont généralement à la portée de l'amateur. À part l'activité microbienne du sol qui leur sert à approcher un service écosystémique de support du MEA (2005) : la régulation du cycle des nutriments, qui a curieusement disparu dans l'actuelle liste des contributions de l'IPBES, et que j'ai choisi de rajouter à la liste des contributions aux populations pour le potager. Notons, toujours en ce qui concerne cette régulation du cycle des nutriments, que tenir une comptabilité des amendements et engrais au potager peut suffire : il revient à chacun d'établir son propre système d'évaluation. Pour ce qui est de la régulation du climat, Cabral et al. (*op. cit.*) expliquent comment estimer la biomasse stockée par les arbres du jardin, donc le carbone, simplement à partir de leur circonférence à hauteur de poitrine[524].

> Du côté de chez Stéphane : Pour ma part, la liste des contributions du potager à la nature est souvent une source

[524] C'est une technique proposée par Jenkins et al. (2003), disponible en ligne, qui repose sur une relation allométrique classique du type biomasse=exp[a×ln(circonférence)+b], avec la biomasse en kilogramme et la circonférence en centimètre ; les paramètres pour différents types d'arbres sont donnés dans l'article, pour le cèdre, par exemple, nous avons a= 2.2592 et b= -2.0336.

d'évaluation informelle. Elle m'invite effectivement à réfléchir aux conséquences écologiques de mes pratiques, particulièrement celles d'irrigation, de fertilisation, de maintien de la biodiversité (cultivée et spontanée) et d'installations comme des mares, des haies.

Il en a été de même pour la contribution non-matérielle de soutien identitaire, avec la culture plus consciente d'espèces zoubliées, de variétés locales, et la référence aux dictons locaux[525].

Tableau 23 : Contributions du potager aux populations et indicateurs permettant de les estimer. Tiré de (*) Russo et al. (2017) et (**) Cabral et al. (2017).

Contributions matérielles	
Alimentations humaine et animale	Production (kg/ha)* ; biodiversité cultivée** ; % de l'espace dédié aux cultures**
Énergie	
Matériaux et assistance	
Ressources médicinales biochimiques et génétiques	
Contributions non matérielles	
Apprentissage et inspiration	
Expériences physiques et psychologiques	Bien-être subjectif*
Soutien identitaire	
Contributions à la régulation	
Régulation du climat	Séquestration de carbone (kg/an)* ; biomasse des arbres (kg)**
Régulation des événements extrêmes	
Régulation de la qualité de l'air	Supression de la pollution de l'air (tonne/an)*
Régulation quantitative des eaux douces	% de réduction du ruissellement* ; surface
Régulation qualitative des eaux douces	
Formation et protection des sols	% de matière organique stable*
Régulation des cycles de nutriments	*Activité microbienne (proxy)***
Création et entretien d'habitats	% de couverture végétale** ; structures faites par l'homme : hôtel à insectes, mare**
Pollinisation et dispersion des graines	
Régulation des nuisibles	
Biodiversité	
Biodiversité	Indice de biodiversité de Shannon* ; place

Changer la surface de son potager

Contrairement aux agrosystèmes, avec le potager, on ne va pas seulement raisonner à surface constante. Si le potager peine à rendre des services suffisants, c'est, en partie, à cause de sa taille. La Figure

[525] Tant qu'ils restaient compatibles avec les données scientifiques que je pouvais recueillir...

126 montre clairement, par rapport à une pelouse, qu'il offre des contributions de régulation très intéressantes, et par rapport à un espace vert, c'est-à-dire la partie ornementale du jardin, qu'il fournit un service supplémentaire d'approvisionnement. Il paraît donc logique de songer à son extension.

Nous avons vu, dans un chapitre précédent, qu'une petite surface (25-50 m^2), cultivée de façon bio-intensive, permettait d'approcher l'autosuffisance en légumes pour une personne. Mais cette surface peut varier au cours de la saison : d'une part, il est facile et peu coûteux en temps de planter un champ complémentaire de pommes de terre ou de courges, afin de constituer des réserves alimentaires ; d'autre part, en été, dans une région au climat chaud, il est possible de le réduire pour des raisons de capacité d'irrigation, mais rien n'empêche, de l'automne au printemps, lorsque cette contrainte est levée, de l'agrandir alors considérablement.

La surface peut aussi varier si on adopte des méthodes moins intensives sur un espace plus vaste, soit avec des cultures plus pérennes, soit avec un niveau d'automatisation ou de mécanisation (manuelle) plus élevé, afin de conserver une durée de travail raisonnable. À ce sujet, tous les âges de la vie ne sont pas identiques, et il faut savoir adapter la taille de son potager au temps dont on dispose, ainsi qu'à son état de santé.

Jardin durable

En revenant, à nouveau, à la Figure 126, il est clair que le jardin dans lequel est inséré le potager peut fournir très peu de services écosystémiques, s'il est constitué en grande partie de surfaces non-végétalisées ; en fournir assez peu, s'il n'est qu'un grand terrain de golf (une pelouse) ; et en fournir beaucoup plus, si c'est un espace vert diversifié. Certains dispositifs, évoqués dans le chapitre sur l'adiversité, augmentent encore sa capacité à accueillir la vie (arbre, petite mare ou bassin, certains hôtels à insectes, friches, etc.). Il est, par conséquent, intéressant de voir, en réalité, de quoi sont constitués les jardins, qui peuvent ou non contenir un potager.

Aux Pays-Bas, 8 % des sols sont imperméables, inhibant dès lors de nombreuses contributions de régulation (eau, température, habitat pour la biodiversité). Il a été clairement démontré, dans la littérature

scientifique, que la présence d'infrastructures vertes et leur connectivité étaient reliées à la biodiversité, mais ce sont surtout les infrastructures publiques qui ont été étudiées. Or, les jardins privés peuvent représenter jusqu'à 40 % de l'environnement urbain, avec donc un très fort potentiel pour la conservation de la biodiversité et la durabilité des villes. La question est donc celle de l'opinion et du comportement des propriétaires sur ces sujets, dans le contexte de leur jardin privé.

Beumer (2018) réalise une enquête sur un échantillon représentatif d'adultes hollandais (n=517) dont 76 % s'avèrent posséder un jardin privé. Seuls 7 % ont d'ailleurs installé un potager. Un premier résultat est qu'une large majorité (66 %) a conscience du potentiel des jardins privés pour la biodiversité locale, voire globale. Un deuxième résultat est que, lorsqu'il s'agit de choisir des images du jardin privé idéal, ils optent d'abord pour des jardins assez sauvages ou des jardins de type anglais très verts, fleuris. Un troisième résultat est que leur propre jardin... ne ressemble pas du tout à cela ! Il est largement pavé, avec souvent des allées de gravier, du mobilier de jardin, une cuisine, une piscine, bref, il s'agit plus de la fameuse « pièce extérieure ». Ils disent, en effet, ne pas être jardiniers, ni être très motivés par l'activité ; et préférer d'abord un jardin avec peu de maintenance (49 %) et acheter des plantes prêtes à l'emploi ; les préoccupations écologiques, et même le jardinage, qui sert au mieux à se détendre et à mettre le nez dehors, s'avèrent secondaires... Rares sont les aménagements ou modes de management du jardin favorables à la biodiversité. Beumer parle de *dissonance cognitive entre le jardin idéal et le jardin réel* pour la plupart des répondants. Ce n'est évidemment pas le cas pour tous, cette étude repose sur la théorie de la culture et montre que, selon les perspectives des individus (sur la société, l'économie, la nature, la gouvernance), il y a des différences de comportements, mais un seul groupe, et encore minoritaire, parvient à aligner opinions et actes. Au total, 41 % de l'échantillon pense que le *verdissement* est de la responsabilité commune des municipalités et des individus (même s'ils ne le font pas en pratique), et 37 % que c'est le rôle des municipalités seulement. La conclusion de l'auteur est assez pessimiste, car les leviers de changement paraissent peu efficaces, et le fort potentiel des jardins privés semble destiné à rester... potentiel. Non seulement, il n'y a pas

d'actes en faveur de la biodiversité, mais les installations, pavages en premier lieu, lui nuisent : en retirant de l'espace pour les habitats et la nourriture disponible, en élevant la température, en ne laissant pas se faire le cycle hydrique naturel et... parce que ces installations sont généralement couplées avec plus d'utilisation d'herbicides (et de pesticides...).

Un potager durable est d'abord un agrosystème durable

La section sur les agrosystèmes durables a évoqué plusieurs directions de progrès, en augmentant la production tout en limitant les impacts sur l'environnement ; pour le dire autrement : optimiser globalement les contributions de l'agrosystème aux populations.

La première direction était plutôt un espoir, celui de nouveaux progrès dans la sélection des variétés qui, dans le domaine des céréales, avait tendance à s'essouffler. Pour le jardinier amateur, cela suggère des essais avec les variétés récentes[526], disposant d'atouts concernant la résistance aux maladies, en particulier. Cependant, c'est aussi du côté des espèces qu'il existe des possibilités intéressantes, comme la partie « Cabinet de curiosités » le montre : espèces d'hiver, d'été, asiatiques[527] ou oubliées.

La deuxième direction est la recherche de l'optimisation des intrants. Beaucoup d'efforts de recherche ont été déployés en agronomie, afin de régler au plus juste l'irrigation, la fertilisation et les apports de matière organique. Le projet d'*Homo sapiens* var. *hortus* était, entre autres, d'opérer une traduction de ces outils théoriques et pratiques (bilan hydrique, bilan azoté, bilan de matière organique) à l'échelle du potager et du jardinier amateur. Ces traductions ont permis, je l'espère, de faire saisir au lecteur tout le problème qu'il y a de gérer, par exemple, l'irrigation au doigt mouillé : on risque d'occasionner des stress de flétrissement, comme d'engorgement, aux légumes ; avec pour conséquences, d'un côté, la chute des productions, et de l'autre, le lessivage de nutriments, problématique pour

[526] Certes, à leur création, bien souvent réservées aux professionnels...

[527] Très rapides à la pousse, bien adaptées également à nos climats et à l'hiver, et souvent d'un goût puissant !

l'environnement et la santé humaine. *Observer ne suffit pas : lorsque le problème se voit, c'est qu'il est déjà trop tard.*

Il s'avère que les longs et techniques développements, égrenés dans *Homo sapiens* var. *hortus*, montrent que ces optimisations dépendent[528] toujours du contexte : zone climatique, topographie, paysage environnant, pédologie, culture en jeu. On n'irrigue pas un semis de carottes dans un potager sableux de Bretagne en juin, si on dispose d'une forte réserve d'eau de pluie, comme un plant de tomates mature à l'eau potable dans une terre argileuse du Gers, recouverte d'un paillage. *À chaque potager, sa (façon de gérer la) durabilité.*

La troisième direction est la réflexion sur la nature des intrants employés au potager : sont-ils renouvelables ? Issus d'un mode de production durable ? Sourcés localement ? Répartis équitablement dans la société ? *Un potager durable repose sur des intrants durables.*

La dernière direction nous est suggérée par les techniques de lutte contre les ennemis des cultures (IPM), employées dans les agrosystèmes durables. Elle repose, bien entendu, sur du contrôle mécanique, physique, et en dernier recours, sur un contrôle chimique raisonné ; mais c'est au rôle du contrôle biologique auquel je pense : activer des micro-organismes actifs, manipuler des habitats pour attirer les ennemis naturels... C'est la biodiversité qui est ici à l'œuvre, or, nous avons vu précédemment (Figure 123) qu'elle est le soubassement des contributions de la nature aux populations. Il s'agit donc de la mobiliser à nos côtés, idée essentielle, inspirée des agrosystèmes « basés sur la biodiversité » (Therond et al., 2017) : ce qui mérite bien... une nouvelle section.

Potager « basé sur la biodiversité »

L'environnement agit sur la vie, mais la vie agit aussi sur l'environnement[529]. Lorsque l'on souhaite baser la gestion de son potager sur la biodiversité, il est besoin de comprendre qui (quelle partie de la biodiversité) est responsable de quoi (quelle fonction écologique), et par conséquent, responsable de la contribution qui nous

---

[528] Ce qui parfois se lit directement dans les équations présentées !

[529] L'apparition massive de l'oxygène dans l'atmosphère terrestre, grâce aux premiers organismes photosynthétiques marins, en est le meilleur exemple.

intéresse. La Figure 127, tirée de Thérond et Duru (2019), identifie quatre composantes fondamentales de la biodiversité au potager et leurs rôles dans la fourniture de différentes contributions aux populations. Le paysage environnant, qui influence certaines de ces composantes, y est ajouté. Enfin, le rôle médiateur de la matière organique, souligné tout au long de ces notes de lectures scientifiques sur le potager, doit être également pris en compte. Cinq enseignements peuvent être tirés de cette représentation graphique.

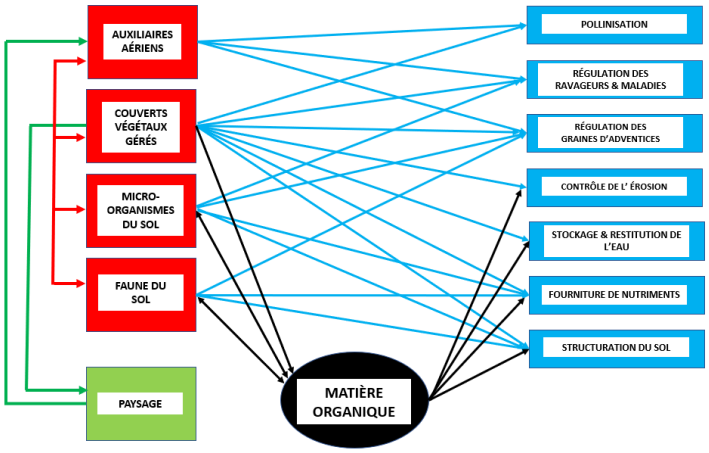


Figure 127 : Éléments permettant de gérer un potager basé sur la biodiversité : les quatre composantes de la biodiversité (en rouge) et les services écosystémiques (en bleu) qu'elles fournissent ; le rôle médiateur de la matière organique (en noir) est souligné ; ainsi que celui du paysage environnant (en vert).

Premier point, le potager est un système complexe : les composantes interagissent entre elles, agissent sur plusieurs contributions simultanément, parfois par l'intermédiaire de la matière organique, et le paysage, lui-même, module ces actions. Et encore, pour citer les auteurs : « Par souci de simplification, cette figure ne représente pas les boucles de rétroactions (feedbacks) des services écosystémiques vers les composantes de la biodiversité représentées, ni vers les autres composantes de la biodiversité (ex. flore ou faune sauvage du paysage) ». *Une solution simple à la durabilité est forcément une solution incomplète.*

Deuxième point : néanmoins, la décomposition en quatre composantes-clés de la biodiversité diminue la complexité biologique et

laisse imaginer les conséquences au potager d'interventions visant, soit spécifiquement une composante, soit une contribution donnée.

Troisième point : la diversité des couverts végétaux gérés (cultures, mais aussi mauvaises herbes, bandes fleuries, haies...) a un impact sur l'ensemble des contributions. *La diversité des couverts végétaux est à gérer en priorité.*

Quatrième point : *la biodiversité du sol, bien cachée et mal connue, ne doit plus être oubliée*. C'est tout d'abord la biodiversité la plus abondante, mais surtout la santé biologique du sol, santé biologique qui peut devenir le moteur de sa santé chimique (cycle des nutriments[530]) et de sa santé physique (bonne structure, érosion limitée, faible compaction, rétention et régulation de l'eau), *avec pour carburant les matières organiques* (cinquième point).

> Du côté de chez Stéphane : Toutes les contributions ne peuvent être représentées sur cette Figure 127 ; l'une d'entre elles est la régulation du climat qui doit mobiliser, à raison, toute notre attention. Le jardinier voulant modestement s'y employer pensera immédiatement à la plantation d'arbres qui, de surcroît, sera très favorable à la biodiversité et à d'autres contributions.
>
> Ce n'est pas possible dans les petits jardins, pour diverses raisons de compétition inégale avec les légumes. Mais le plus important lieu de stockage du carbone est, en réalité, le sol, et plus précisément la matière organique ! Or, cette dernière est bien en vedette dans la Figure 127, car son augmentation aura d'autres conséquences très positives. *La biodiversité, même morte, peut donc, bien stockée dans le sol, aussi sauver le climat.*

13.5 Au-delà du portillon du potager

Winkler et al. (2019) se posent la question des conséquences possibles de l'activité de jardinage sur un comportement plus durable,

---

[530] « Tout est fait de compost, et retournera au compost. » (Ecclésiaste 3.20)

y compris à l'extérieur du potager, comme par exemple dans des actes de consommation. Il s'agit, en outre, d'étudier les méthodes de jardinage utilisées, particulièrement celles qui sont respectueuses de l'environnement, mais aussi certaines innovations récentes. L'étude est limitée, comme souvent, à des jardins collectifs partagés urbains[531]. Ce sont des jardins allemands, un pays dans lequel l'écologie a un vrai poids politique. À partir d'un questionnaire passé à 380 jardiniers, ces derniers se révèlent être : plutôt de sexe féminin (2/3), d'âges relativement variables (de 30 à 60 ans), mais sur-diplômés (les $\frac{3}{4}$ ont une licence ou plus). Ceci explique que leurs motivations dans la pratique du jardinage soient, plus souvent que d'habitude, de nature environnementale.

Concernant leurs techniques de jardinage, il s'agit, presqu'unanimement, de méthodes agroécologiques traditionnelles (mulch, compost, vermicompostage). Les innovations proposées les séduisent assez peu, à part l'emploi d'énergies renouvelables (qui pourraient permettre une irrigation automatique) ou de micro-organismes utiles. Les dispositifs scientifiques de mesure ou les applications de plus haute technologie ne les tentent guère. De fait, ils déclarent surtout rechercher des occasions de se reconnecter à la nature.

Concernant leurs comportements de consommation, ils achètent des outils de jardinage sur des critères de fonctionnalité, de qualité, fabriqués localement avec des matériaux durables, et pas des critères de prix ou de design : ce sont donc plutôt des comportements écoresponsables. Avec la pratique du jardinage, leur alimentation a changé : incluant plus de légumes frais, plus de légumes de saison et plus de variétés anciennes, mais moins de viande. Leurs achats alimentaires se sont aussi modifiés avec des produits plus locaux, plus de saison, et plus biologiques.

Les critères appliqués à l'achat d'outils et les changements de consommation entraînés par le jardinage laissent augurer de modes de vie plus durables chez les sondés. Nous avons toutefois vu qu'ils avaient

---

[531] À croire que les universitaires affectionnent les terrains urbains : cela leur demanderait moins de déplacements ?

un profil très particulier, et cela ne préjuge donc pas d'un changement d'ensemble pour la société.

La fin de l'article est assez particulière : les auteurs indiquent, à juste titre, qu'il faudrait proposer des méthodes de jardinage respectueuses des cycles de nutriments, pouvant servir de « démonstration » concrète de l'importance des cycles du vivant et de pédagogie pour les mieux respecter. Ils préconisent de s'appuyer sur les technologies les plus utilisées par ces jardiniers et les innovations les séduisant le plus. Pourtant, je ne sais que penser de leur proposition finale, d'ailleurs commercialisée[532], qui me semble être un *potager à la Elon Musk*.

13.6 Références

Abdo, A. I., Sun, D., Shi, Z., Abdel-Fattah, M. K., Zhang, J., & Kuzyakov, Y. (2024). Conventional agriculture increases global warming while decreasing system sustainability. *Nature Climate Change*. DOI: 10.1038/s41558-024-02170-4

Balvanera, P., Pfisterer, A. B., Buchmann, N., He, J. S., Nakashizuka, T., Raffaelli, D., & Schmid, B. (2006). Quantifying the evidence for biodiversity effects on ecosystem functioning and services. *Ecology Letters, 9*(10), 1146-1156.

Beumer, C. (2018). Show me your garden and I will tell you how sustainable you are: Dutch citizens' perspectives on conserving biodiversity and promoting a sustainable urban living environment through domestic gardening. *Urban Forestry & Urban Greening, 30*, 260-279.

Cabral, I., Keim, J., Engelmann, R., Kraemer, R., Siebert, J., & Bonn, A. (2017). Ecosystem services of allotment and community gardens: A Leipzig, Germany case study. *Urban Forestry & Urban Greening, 23*, 44-53.

Calvet-Mir, L., Gómez-Baggethun, E., & Reyes-García, V. (2012). Beyond food production: Ecosystem services provided by home

[532] Je laisse le lecteur parlant l'allemand se faire sa propre idée : https://geco-gardens.de

gardens. A case study in Vall Fosca, Catalan Pyrenees, Northeastern Spain. *Ecological Economics, 74*, 153-160.

Calvet-Mir, L., March, H., Corbacho-Monné, D., Gómez-Baggethun, E., & Reyes-García, V. (2016). Home garden ecosystem services valuation through a gender lens: a case study in the Catalan Pyrenees. *Sustainability, 8*(8), 718.

Camps-Calvet, M., Langemeyer, J., Calvet-Mir, L., & Gómez-Baggethun, E. (2016). Ecosystem services provided by urban gardens in Barcelona, Spain: Insights for policy and planning. *Environmental Science & Policy, 62*, 14-23.

Clarke, L. W., Li, L., Jenerette, G. D., & Yu, Z. (2014). Drivers of plant biodiversity and ecosystem service production in home gardens across the Beijing Municipality of China. *Urban Ecosystems, 17*, 741-760.

Daily, G. C., Söderqvist, T., Aniyar, S., Arrow, K., Dasgupta, P., Ehrlich, P. R., ... & Walker, B. (2000). The value of nature and the nature of value. *Science, 289*(5478), 395-396.

Dainese, M., Martin, E. A., Aizen, M. A., Albrecht, M., Bartomeus, I., Bommarco, R., ... & Steffan-Dewenter, I. (2019). A global synthesis reveals biodiversity-mediated benefits for crop production. *Science Advances, 5*(10), eaax0121.

De Frenne, P., Zellweger, F., Rodríguez-Sánchez, F., Scheffers, B. R., Hylander, K., Luoto, M., ... & Lenoir, J. (2019). Global buffering of temperatures under forest canopies. *Nature Ecology & Evolution, 3*(5), 744-749.

Dewaelheyns, V., Elsen, A., Vandendriessche, H., & Gulinck, H. (2013). Garden management and soil fertility in Flemish domestic gardens. *Landscape and Urban Planning 116*, 25–35.

Díaz, S., Pascual, U., Stenseke, M., Martín-López, B., Watson, R. T., Molnár, Z., ... & Shirayama, Y. (2018). Assessing nature's contributions to people. *Science, 359*(6373), 270-272.

Galluzzi, G., Eyzaguirre, P., & Negri, V. (2010). Home gardens: neglected hotspots of agro-biodiversity and cultural diversity. *Biodiversity and Conservation, 19*, 3635-3654.

Garbach, K., Milder, J. C., Montenegro, M., Karp, D. S., & DeClerck, F. A. J. (2014). Biodiversity and ecosystem services in

agroecosystems. *Encyclopedia of Agriculture and Food Systems, 2*, 21-40.

Garbach, K., Milder, J. C., DeClerck, F. A., Montenegro de Wit, M., Driscoll, L., & Gemmill-Herren, B. (2017). Examining multi-functionality for crop yield and ecosystem services in five systems of agroecological intensification. *International Journal of Agricultural Sustainability, 15*(1), 11-28.

Giannadaki, D., Giannakis, E., Pozzer, A., & Lelieveld, J. (2018). Estimating health and economic benefits of reductions in air pollution from agriculture. *Science of the Total Environment, 622*, 1304-1316.

Guitart, D. A., Byrne, J. A., & Pickering, C. M. (2015). Greener growing: Assessing the influence of gardening practices on the ecological viability of community gardens in South East Queensland, Australia. *Journal of Environmental Planning and Management, 58*(2), 189-212.

Hansen, M. M., Jones, R., & Tocchini, K. (2017). Shinrin-yoku (forest bathing) and nature therapy: A state-of-the-art review. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 14*(8), 851.

Huai, H., & Hamilton, A. (2009). Characteristics and functions of traditional homegardens: a review. *Frontiers of Biology in China, 4*, 151-157.

IPBES (2019). Résumé à l'intention des décideurs du rapport sur l'évaluation mondiale de la biodiversité et des services écosystémiques de la Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques. https://www.ipbes.net/fr/node/35274

Jax, K. (2005). Function and "functioning" in ecology: what does it mean?. *Oikos, 111*(3), 641-648.

Jenkins, J. C., Chojnacky, D. C., Heath, L. S., & Birdsey, R. A. (2003). National-scale biomass estimators for United States tree species. *Forest Science, 49*(1), 12-35.

Jim, C. Y., & Chen, W. Y. (2009). Ecosystem services and valuation of urban forests in China. *Cities, 26*(4), 187-194.

Langemeyer, J., Latkowska, M. J., Gómez-Baggethun, E. N., Voigt, A., Calvet-Mir, L., Pourias, J., ... & Baležentienė, L. (2016).

Ecosystem services from urban gardens. In *Urban allotment gardens in Europe* (p. 115-141). Routledge.

Mohri, H., Lahoti, S., Saito, O., Mahalingam, A., Gunatilleke, N., Hitinayake, G., ... & Herath, S. (2013). Assessment of ecosystem services in homegarden systems in Indonesia, Sri Lanka, and Vietnam. *Ecosystem Services, 5*, 124-136.

Mullu, D. (2016). A review on the effect of habitat fragmentation on ecosystem. *Journal of Natural Sciences Research, 6*(15), 1-15.

O'connell, P. E., Ewen, J., O'Donnell, G., & Quinn, P. (2007). Is there a link between agricultural land-use management and flooding?. *Hydrology and Earth System Sciences, 11*(1), 96-107.

Partap, U., & Ya, T. (2012). The human pollinators of fruit crops in Maoxian County, Sichuan, China. Mountain *Research and Development, 32*(2), 176-186.

Pearce, F. (2019). Rivers in the sky. *New Scientist, 244*(3254), 40-43.

Peterson, M. J., Hall, D. M., Feldpausch-Parker, A. M., & Peterson, T. R. (2010). Obscuring ecosystem function with application of the ecosystem services concept. *Conservation Biology, 24*(1), 113-119.

Potschin, M. and R. Haines-Young (2016): Defining and measuring ecosystem services. In M. Potschin, R. Haines-Young, R. Fish and R.K. Turner (Eds.), *Routledge Handbook of Ecosystem Services* (p. 25-44). Routledge, London and New York.

Raymond, C. M., Diduck, A. P., Buijs, A., Boerchers, M., & Moquin, R. (2019). Exploring the co-benefits (and costs) of home gardening for biodiversity conservation. *Local Environment, 24*(3), 258-273.

Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F. S., Lambin, E. F., ... & Foley, J. A. (2009). A safe operating space for humanity. *Nature, 461*(7263), 472-475.

Russo, A., Escobedo, F. J., Cirella, G. T., & Zerbe, S. (2017). Edible green infrastructure: An approach and review of provisioning ecosystem services and disservices in urban environments. *Agriculture, Ecosystems & Environment, 242*, 53-66.

Scanes, C. G. (2018). Human activity and habitat loss: destruction, fragmentation, and degradation. In *Animals and human society* (p. 451-482). Academic Press.

Schilling, K. E., Gassman, P. W., Kling, C. L., Campbell, T., Jha, M. K., Wolter, C. F., & Arnold, J. G. (2014). The potential for agricultural land use change to reduce flood risk in a large watershed. *Hydrological Processes, 28*(8), 3314-3325.

Taylor, J. R., & Lovell, S. T. (2014). Urban home food gardens in the Global North: Research traditions and future directions. *Agriculture and Human Values, 31*, 285-305.

Therond, O., Duru, M., Roger-Estrade, J., & Richard, G. (2017). A new analytical framework of farming system and agriculture model diversities. A review. *Agronomy for Sustainable Development, 37*, 1-24.

Therond, O., & Duru, M. (2019). Agriculture et biodiversité : les services écosystémiques, une voie de réconciliation ? *Innovations Agronomiques, 75*, 29-47.

Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R., & Polasky, S. (2002). Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature, 418*(6898), 671-677.

Velten, S., Leventon, J., Jager, N., & Newig, J. (2015). What is sustainable agriculture? A systematic review. *Sustainability, 7*(6), 7833-7865.

Wilhelm, J. A., & Smith, R. G. (2018). Ecosystem services and land sparing potential of urban and peri-urban agriculture: A review. *Renewable Agriculture and Food Systems, 33*(5), 481-494.

Winkler, B., Maier, A., & Lewandowski, I. (2019). Urban gardening in Germany: Cultivating a sustainable lifestyle for the societal transition to a bioeconomy. *Sustainability, 11*(3), 801.

Witzling, L., Wander, M., & Phillips, E. (2010). Testing and educating on urban soil lead: A case of Chicago community gardens. *Journal of Agriculture, Food Systems, and Community Development, 1*(2), 167-185.

Zhang, W., Ricketts, T. H., Kremen, C., Carney, K., & Swinton, S. M. (2007). Ecosystem services and dis-services to agriculture. *Ecological Economics, 64*(2), 253-260.

Cabinet de curiosités

Cette partie s'adresse aux jardiniers curieux. Elle répertorie une bonne quarantaine de légumes présentant divers intérêts : certains se prêtent aisément à la culture d'hiver, sans doute plus courante de nos jours du fait du réchauffement climatique ; ce dernier, *a contrario*, complique largement la culture d'été, mais quelques espèces tolèrent bien ces nouvelles conditions ; des légumes asiatiques sont aussi présentés, ils sont, en effet, adaptés à nos climats et diversifient agréablement les salades ; les herbes aromatiques, qui relèvent le goût de tant de nos plats, sont pourtant souvent les parents pauvres du jardin, elles méritent d'être mises plus en avant ; d'autres légumes, zenfin, sont tout simplement des zoubliés.

Pour chacun de ces légumes, j'essaie de fournir les mêmes renseignements[533] : spécificités botaniques, variétés intéressantes, températures de référence, modes d'installation (semis ou plants, profondeur de semis), modes de récolte (mature, *baby*, mini-pousse),

[533] Mais la di(s)gression sera de mise...

irrigation, fertilisation[534], désherbage, et parfois, principaux bioagresseurs.

[534] Pour ce qui est de la fertilisation phosphatée et potassique, je ne vais pas cacher une difficulté : selon les documents, les quantités (kg/ha) sont indiquées soit en unités P et K, soit en unités P_2O_5 et K_2O. Si on passe aisément des unes aux autres par des facteurs de conversion, il faut encore que la source donne *clairement* son système de référence. Ce n'est malheureusement pas toujours le cas... Et même si, en général, les publications scientifiques ont tendance à plutôt employer le système P et K... il y a des exceptions. En cas d'hésitation... je signalerai donc ce problème.

14 Aromatiques

Avec l'art de cuisiner, le Diable se cache souvent dans les détails... et Dieu dans la Bible. Il y a des miracles, les fines herbes peuvent transsubstantier un plat au goût d'hostie. Pourtant, les livres de jardinage passent souvent très vite sur le sujet.

14.1 Aneth

Depuis que je connais l'aneth, je suis moins terrorisé à l'idée de me réincarner en danois : ses feuilles et graines sont, en effet, délicieuses dans un smørrebrød, et les sommités florales sont parfois utilisées comme *pickles* (après macération dans du vinaigre). *Anethum graveolens* est une plante aromatique herbacée annuelle et parfois bisannuelle, de la famille des apiacées.

Les températures cardinales de germination sont pour la minimale de 5 °C, pour la maximale de 33 °C et pour l'optimale[535] de 13 °C ; sachant que la plage de 10 à 20 °C est satisfaisante (Boroumand & Kouchaki, 2006). Le trempage des graines est conseillé pour accélérer la germination qui est assez lente. La profondeur de semis est de 0.5 cm (PMG=.1.2-2.1 g).

Pour ce qui est de l'implantation, une température de croissance de 15-17 °C est optimale, mais l'étendue va de 7 °C à 30 °C ; la plante est toutefois assez rustique (RHS=H4). Une place au soleil lui convient bien, mais elle doit être abritée du vent, car elle ne s'avère pas très « solide ». La récolte des feuilles peut se faire 45-60 jours après le semis, mais la floraison est ensuite rapide[536]. Couper les hampes florales, dès leur apparition, permet de prolonger la cueillette du feuillage, mais il vaut mieux *renouveler les semis tous les mois*. En cas de semis direct, le sol doit être bien affiné. L'espacement d'implantation est classiquement de 20 cm, toutefois, il peut aller de 10 à 25 cm, voire parfois jusqu'à 45 cm selon les sources. (Il est bon de

---

[535] C'est bien le résultat du calcul des auteurs, mais la vue de la figure 1c dans leur article me laisse penser que cet optimum doit être plus proche de 15-20 °C.

[536] Les graines sont matures 130-150 jours après le semis.

se souvenir ici de la relation entre récolte et densité !) Pour plante compagne, l'aneth aime les soucis comme Annie aime les sucettes[537].

Gupta et al. (2012) suggèrent un amendement initial de compost ou de fumier bien décomposé de 1 kg/m^2. L'aneth répond bien à la fertilisation et il est possible d'y ajouter 60–90 N / 40-45 P_2O_5 / 20 K_2O (kg/ha). Elle est très sensible au stress hydrique au moment de la germination et de la floraison ; bien qu'il lui soit reconnue une bonne résistance à la sécheresse, l'irrigation permet une production plus importante (Popović et al., 2019) et retarde aussi la montaison. Patel et al. (2019) constatent que deux désherbages, à 25 et 45 jours après le semis (direct), sont suffisants.

L'aneth en plein champ ne présente généralement pas de problèmes. Dans la culture en serre, ont été signalés essentiellement l'oïdium (*Itersonilia perplexans*) et le mildiou (*Erysiphe heraclei*). On évitera, par conséquent, une humidité excessive et d'arroser le feuillage...

Les feuilles d'aneth peuvent se faire sécher pour une conservation longue, mais concernant les feuilles fraîches, la conservation ne peut excéder une à deux semaines, en respectant une température de 0 °C et une forte humidité.

Il existe des variétés naines pour la culture en pot (*e.g.* 'Compatto', 'Ella', 'Nano'), ou au contraire, des variétés de très grande taille (*e.g.* 'Mammoth', 'Hercules') ou d'autres à floraison plus tardive (*e.g.* 'Tetra' 'Goldkrone', 'Fernleaf' AAS, 'Domino' AGM). Il existe également une sous-espèce asiatique (*Anethum graveolens* subsp. *sowa*) légèrement différente de la version européenne.

L'aneth est une plante de jours longs, qui porte des fleurs mâles, femelles et hermaphrodites sur ses ombelles. Elle est sujette à une pollinisation croisée par de nombreux insectes (Meena et al., 2022). Le fruit est un schizocarpe, avec deux carpelles qui se séparent à maturité en deux méricarpes, appelés couramment graines, mais contenant en fait la véritable graine.

---

[537] C'est une blague ; pour ce qui est de l'intérêt des plantes compagnes, se reporter au chapitre sur les interactions végétales.

Du côté de chez Stéphane : Ma façon de cultiver l'aneth et la coriandre, c'est de multiplier les successions par transplantation (très peu de plants à la fois), toutes les deux semaines d'avril à septembre, afin de disposer de feuilles en permanence. En effet, ces cultures sont, toutes deux, très susceptibles à la montaison, ce qui n'est pas une catastrophe puisque leurs graines sont utilisables comme épices (et comme semences, bien sûr).

Boroumand, R. Z., & Kouchaki, A. (2006). Evaluation of cardinal temperature for three species of medicinal plants, Ajowan (Trachyspermum ammi), Fennel (Foeniculum vulgare) and Dill (Anethum graveolens). *Desert (BIABAN), 11*(2), 11-16.

Gupta, R., Anwer, M. M., & Sharma, Y. K. (2012). Dill. In K.V. Peter (Ed.), *Handbook of Herbs and Spices* (p. 275-285). Woodhead Publishing.

Ljevnaić-Mašić, B., Džigurski, D., Nikolić, L., Brdar-Jokanović, M., & Adamović, D. (2015). Weed flora in dill (Anethum graveolens L., Apiaceae, Apiales) grown in conventional and organic production systems. *Ratarstvo i Povrtarstvo/Field and Vegetable Crops Research*, *52*(1), 14-17.

Meena, N. K., Meena, R. S., Singh, R., Verma, A. K., Choudhary, S., Singh, B., ... & Meena, M. (2022). Managed pollination is a much better way of increasing productivity and essential oil content of dill seeds crop. *Scientific Reports*, *12*(1), 1-12.

Patel, S. M., Amin, A. U., & Patel, H. B. (2019). Integrated weed management practices for dill seed (Anethum graveolens L.) cultivation. *International Journal of Seed Spices*, *9*(2), 81-85.

Popović, V., Maksimović, L., Adamović, D., Sikora, V., Ugrenović, V., Filipović, V., & Mačkić, K. (2019). Yield of biomass and essential oil of dill (Anethum graveolens L.) grown under irrigation. *Ratarstvo i Povrtarstvo*, *56*(2), 49-55.

14.2 Basilic

Le basilic (*Ocimum basilicum*), de la famille des lamiacées, est une plante annuelle herbacée. Elle est principalement consommée pour ses feuilles, mais dans la perspective de fabrication de pesto, elle peut être coupée complètement en jeunes pousses (puis hachée).

Sur la base de l'étude de six cultivars, Zhou et al. (2016) situent la température de germination minimale à 10 °C, maximale à 43 °C, correcte à partir de 20 °C et optimale entre 30 et 35 °C (avec une levée dans ce cas entre 5 à 10 jours). Hamasaki et al. (1994) évoquent une profondeur de semis de 0.5 cm (PMG=1-5 g).

Le basilic est une plante de climat chaud et de jours longs, à installer au soleil[538]. Sa rusticité est très faible (RHS=1c) et on reportera le semis direct après les gelées. Le semis indirect est transplanté au bout de six à sept semaines, à partir de 4-5 feuilles, et la récolte peut commencer 30-35 jours après. Il existe d'énormes variations en ce qui concerne les espacements, dues au fait que l'on peut chercher à maximiser la biomasse pour du pesto, la taille des feuilles pour une salade de tomates, ou même, de façon plus spectaculaire, la dimension de la plante – plus de deux mètres – pour la fête de la vierge à Bétera en Espagne. Ainsi, d'après Garibaldi et al. (1997), le basilic peut être sursemé à 5 000 graines/m^2 pour faire du pesto industriel ; sinon, pour produire de larges feuilles, Hamasaki et al. (1994) évoquent un écart de 15 à 60 cm sur le rang, selon la taille du cultivar. Enfin, la culture du basilic peut se faire uniquement en pot (sans le trasplanter): il existe d'ailleurs des variétés naines adaptées, et même une espèce proche *Ocimum minimum* que l'on peut poser à sa fenêtre ; comme le chante le fado sous le nom de « manjerico ».

Le sol doit être riche, avec des apports d'azote allant de 20-25 N (kg/ha) jusqu'à 75 N, et 10–15 P_2O_5 (Pushpangadan & George, 2012). Cependant, Hamasaki et al. (1994), pour des sols déficients, proposent 135 N / 135 P_2O_5 / 135 K_2O (kg/ha). Pour un amendement organique en compost, Khalid et al. (2010) avancent[539] 5 L/m^2.

---

[538] Attention, elle peut toutefois prendre un « coup de soleil » en plein été.

[539] En fait, 20 m^3/feddan, où 1 feddan=4200 m^2 soit 20000L/4200~5 L/m^2.

Le stress hydrique diminue la production (Ekren et al., 2012) et un arrosage régulier est donc important, en conservant un niveau proche de la capacité au champ sur une profondeur de 30 cm, dans un sol toutefois bien drainé. Un désherbage est nécessaire, ma lecture de Wariyo et al. (2022) me conduit à suggérer une période critique de 0 à 45 jours après l'émergence pour un semis direct[540].

Garibaldi et al. (2014) présentent les principaux bioagresseurs : virus de la tâche (Impatiens Necrotic Spot Virus), fusariose du basilic (*Fusarium oxysporum* ssp. *basilici*), mildiou du basilic (*Peronospora* sp), moisissure grise (*Botrytis cinerea*), pucerons... Pour les contenir, ils conseillent : de limiter l'humidité dans l'air, dans le sol ou dans le substrat, et sur les plants, ce qui est complexe puisqu'une irrigation régulière est nécessaire... il faut, au moins, éviter le feuillage ; il convient d'assurer une bonne circulation de l'air en serre et une faible densité de plantation ; une température supérieure à 15 °C permet de ne pas affaiblir la plante ; une fertilisation azotée mesurée est préférable ; enfin, les rotations sont à recommander. Il existe, pour certains pathogènes, des méthodes de contrôle biologique ; plus simplement, on trouve des variétés résistantes (F1 'Prospera' ou 'Reutgers') et des graines certifiées sans maladies.

Une récolte régulière limite la floraison. La plante ramifiant beaucoup, on ne la cueille pas feuille à feuille, mais par tiges de 10 à 15 centimètres. Il est intéressant de laisser en dessous deux paires de feuilles, qui vont occasionner quatre nouvelles tiges. Le basilic se conservant difficilement, il vaut mieux le cueillir le matin, au lever du soleil et à la levée de la pâte à pizza, et le plonger rapidement dans l'eau froide. Après l'avoir essoré en douceur, il peut être mis dans un plastique perforé et conservé une semaine à une température allant de 5 °C à 13 °C.

Le basilic est polymorphe : il en existe de nombreux cultivars avec des tailles[541], des formes, des couleurs et des textures de feuille très

---

[540] Ce qui n'est absolument pas leur conclusion, je tire ma suggestion de la relecture de leurs tables 5 et 6 sur la production de matière fraîche.

[541] Comparez les tailles des feuilles du basilic 'Aristotle' de type grec avec celles de 'Feuille de laitue'.

différentes, mais également des parfums et des goûts divers (citron, anis, réglisse, cannelle...).

Le taux d'allogamie par pollinisation entomophile est sans doute inférieur à 20 %, mais la littérature n'est pas consensuelle à ce sujet (Akbari et al., 2019). Néanmoins, du fait de sa polymorphie, produire ses propres graines de basilic peut donc conduire à des surprises.

> Du côté de chez Stéphane : Ma façon de cultiver le basilic, en fin de saison, est de semer un mètre carré avec énormément de graines (ce qui me reste, à la volée), de faire une récolte complète au ras du sol, puis de réaliser du pesto et de le congeler pour la saison froide.

Akbari, G. A., Binesh, S., Ramshini, H., Soltani, E., Amini, F., & Mirfazeli, M. S. (2019). Selection of basil (Ocimum basilicum L.) full-sib families from diverse landraces. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, *12*, 66-72.

Ekren, S., Sönmez, Ç., Özçakal, E., Kurttaş, Y. S. K., Bayram, E., & Gürgülü, H. (2012). The effect of different irrigation water levels on yield and quality characteristics of purple basil (Ocimum basilicum L.). *Agricultural Water Management*, *109*, 155-161.

Garibaldi, A., Gullino, M. L., & Minuto, G. (1997). Diseases of basil and their management. *Plant Disease, 81*(2), 124-132.

Hamasaki, R. T., Valenzuela, H. R., Tsuda, D. M., & Uchida, J. Y. (1994). *Fresh basil production guidelines for Hawai'i*.

Khalid, K. A., Hendawy, S. F., & El-Gezawy, E. (2006). Ocimum basilicum L. production under organic farming. *Research Journal of Agriculture and Biological Sciences*, *2*(1), 25-32.

Paton, A., & Putievsky, E. (1996). Taxonomic problems and cytotaxonomic relationships between and within varieties of Ocimum basilicum and related species (Labiatae). *Kew Bulletin, 51*(3), 509-524.

Pushpangadan, P., & George, V. (2012). Basil. In K.V. Peter (Ed.), *Handbook of Herbs and Spices* (p. 55-72). Woodhead Publishing.

Wariyo, A., Abayechaw, D., & Guteta, N. (2022). Determination of Critical Weed Competition Period in Basil (Ocimum basilicum

L.) Production at Mid Altitude of Wondo Genet and Alage, Southern Ethiopia. *International Journal of Food Science and Agriculture, 6*(3), 272-281.

Zhou, D., Barney, J., Ponder, M. A., & Welbaum, G. E. (2016). Germination response of six sweet basil (Ocimum basilicum) cultivars to temperature. *Seed Technology*, *37*(1), 43-51.

14.3 Ciboule

La ciboule (*Allium fistulosum*) est le premier représentant de la famille des amaryllidacées auquel nous allons nous intéresser. En France, elle reste confinée au jardinage amateur, contrairement à l'Asie orientale, où elle y est domestiquée depuis plus de deux mille ans et où elle est plus importante commercialement que l'oignon. C'est une plante herbacée pérenne, généralement cultivée comme annuelle, voire bisannuelle. Sa hauteur varie de 30 à 150 centimètres. Son goût est proche de celui de l'oignon, en plus doux ; elle peut être consommée crue ou cuite, préparée de différentes manières. La partie consommée est soit le fût (comme pour un poireau, et préparé comme un légume), soit les feuilles vertes (comme pour une herbe aromatique), soit la plantule en jeune pousse, et plus rarement, la hampe florale. Ceci conduit, d'une part, à des itinéraires techniques assez différents, et d'autre part, à des groupes de cultivars spécifiques à ces divers objectifs.

En ce qui concerne la germination, les températures optimales s'étalent de 15 à 25 °C ; elle est lente en dessous de 10 °C ; et elle est faible au-dessus de 30 °C. Il faut se méfier de la longévité des semences, particulièrement médiocre à température ambiante (Padula et al., 2022). Le PMG est de 2.4-3.4 g. En général, le semis a lieu, soit en pépinière, soit en contenant, puis est transplanté. Il faut, pour ce faire, attendre que la plante ait, comme le poireau, atteint la taille d'un crayon et 15-20 cm de haut, ce qui semble prendre entre deux et trois mois. Kolota et al. (2013) sèment trois à quatre graines dans des contenants 4×4 (cm), et pour produire des fûts, ne conservent que deux plantules. Ils récoltent de petits fûts, deux mois et demi après la transplantation.

La température de croissance optimale est de 15-20 °C, c'est donc une plante de saison fraîche, avec deux périodes privilégiées pour le semis : le printemps et l'automne. La ciboule a été adaptée à des conditions climatiques très différentes, il existe ainsi des cultivars supportant les hautes températures et d'autres pouvant encaisser -45 °C à -25 °C comme un alcoolique russe[542] ! En hiver, elle peut entrer en dormance, voire perdre ses feuilles, ou bien continuer à pousser.

La fertilisation est un point intéressant à développer rapidement. Je rappelle que, pour le jardinier amateur, il ne s'agit pas de réaliser une opération aussi précise qu'on peut le faire sur une monoculture pratiquée à grande échelle, mais d'utiliser les recommandations produites pour ces systèmes, afin de tenter d'ajuster, « à la louche », les quantités apportées à son propre potager. Une des prescriptions usuelles (Inden & Asahira, 1990) est 200-300 N / 100-200 P / 150-200 K (kg/ha), scindée en plusieurs applications, ce qui montre un important besoin de la ciboule. Cependant Kolota et al. (2013) s'aperçoivent que 70 N (kg/ha) est en fait suffisant pour une culture plus courte (10 semaines après la transplantation pour produire des fûts jeunes). L'idée sous-jacente est simplement de s'adapter à la longueur du cycle de culture. Le phosphore est également un facteur limitant ; Tawaraya et al. (2012) rappellent que la production dépend, à la fois, de la quantité de phosphore dans le sol et de la possibilité de son accès par les plantes : ce dernier étant, pour la ciboule, principalement le fait des mycorhizes à la vue de son faible système racinaire. Ils montrent qu'une bonne mycorhization permet de combler une faible présence de phosphore, et à l'inverse, que la forte présence de phosphore a pour effet de décourager leur installation. Par conséquent, pour limiter les apports de phosphore et pour qu'ils soient les plus efficaces possible, on peut soit, comme ils le font, inoculer des mycorhizes aux transplants, soit savoir au mieux utiliser les mycorhizes « indigènes », par des pratiques de sol peu travaillé, de cultures de couverture, et bien entendu, en évitant les fongicides, y compris la bouillie bordelaise...

---

[542] Elle provient d'ailleurs peut-être de Sibérie...

La ciboule doit pousser sur un sol bien drainé, car, comme un alcoolique russe, elle ne supporte pas l'hydromorphie ; en revanche, contrairement à beaucoup de plantes cultivées du genre *Allium*, elle tolère une humidité importante et l'apprécie même pour avoir une croissance maximale. Elle tolère, en outre, un certain stress hydrique (au détriment de sa croissance, évidemment).

Divers modes d'installation de la culture existent. Afin de produire des fûts, la méthode japonaise (Inden, & Asahira,1990) est de creuser des sillons séparés de 55-85 cm et d'une quinzaine de centimètres de profondeur, puis d'y planter les ciboules tous les 3-15 cm. Il sera alors facile de les butter ultérieurement (pour les blanchir) sur une hauteur de 30 cm, en trois fois : la première fois 50 jours après la transplantation et la dernière fois 30 jours avant la récolte (cette méthode progressive permet une aération correcte), récolte qui a lieu six à neuf mois après l'implantation pour obtenir de grands fûts. Afin de produire des feuilles vertes, soit la technique précédente est employée, mais avec des sillons moins profonds de cinq centimètres (Inden, & Asahira,1990), soit au contraire, des billons sont créés sur lesquels les transplants sont installés, et l'irrigation a lieu par inondation des sillons (Rana & Harshita, 2017). La récolte des feuilles se fait deux à trois mois après la transplantation. Les graines peuvent aussi être semées directement à forte densité, afin de produire des jeunes pousses récoltées, deux mois plus tard environ, à 8-10 cm de haut.

Les mauvaises herbes causent des pertes en quantité et en qualité, car la ciboule n'est pas très compétitive. Rana et Harshita (2017) suggèrent un à deux désherbages dans les premiers temps de l'implantation. Toutefois, ceci semble insuffisant, si je me réfère aux cultures du poireau et de l'oignon, pour lesquelles Lichtenhahn et al. (2005) préconisent une période critique d'un mois de plus à la moitié de la saison de culture. On envisagera, bien sûr, un paillage en été.

La ciboule est, parmi le genre *Allium*, une plante relativement épargnée par les problèmes. Toutefois, le ravageur principal est le thrips de l'oignon (*Thrips tabaci*), les maladies usuelles sont la rouille du poireau (*Puccinia allii*, *P. mixta* et *Uromyces ambiguus*) et l'alternariose du poireau (*Alternaria porri*) ; enfin, du côté des virus,

OYDV (Onion yellow dwarf virus) est le plus courant, apporté par les pucerons.

La floraison a lieu la deuxième année, induite par des températures basses (<16 °C et surtout une vernalisation optimale vers 2-7 °C) et des jours courts, il faut toutefois que la plante ait atteint un certain stade (12 feuilles ou un diamètre du fût de 7 mm). Il existe, par conséquent, un risque de montaison prématurée, particulièrement pour des semis d'automne (récoltés l'année suivante). Les fleurs, disposées sur une ombelle sphérique, sont petites, blanches, complètes, mais protandres. La ciboule est allogame, pollinisée par les insectes, mais elle peut aussi être autopollinisée : il existe, dès lors, un risque de dépression de consanguinité. Le fruit est une capsule en trois parties, chacune contenant deux graines. Pour qui veut produire ses semences, il est bon de savoir qu'il n'y a pas de période de dormance.

Nous avons, plus haut, évoqué l'incroyable russeticité de la ciboule. Elle peut s'expliquer, car son ancêtre sauvage est peut-être *Allium Altaicum*, avec lequel des hybridations sont relativement simples. Chez les *Allium* cultivés, la ciboule est plus proche de l'oignon (*Allium cepa*), il existe d'ailleurs des hybrides naturels de ces deux espèces : *Allium wakegi* qui est un croisement avec l'échalote, *Allium proliferu* qui est l'oignon égyptien, et le plus backroom de tous : *Allium fistulosum fuckingum*. Un croisement artificiel, très employé aux États-Unis, est le cultivar 'Beltsville Bunching'. Au Japon, de nombreuses variétés-populations très hétérogènes ont été développées par les agriculteurs, mais il existe à présent 120 cultivars différents, dont des hybrides F1. Pour ceux qui doutent que la force soit avec les hybrides F1, il faut savoir qu'il existe une variété inscrite au catalogue français qui s'appelle 'Yoda'. Outre la division entre cultivars à fût et cultivars à feuilles, les Japonais considèrent un système de classification de la ciboule plus complexe en quatre groupes, en prenant en compte le comportement de dormance en hiver. Les groupes Kaga et Senju comprennent surtout des ciboules à fût, le premier est utilisé en climat froid et est dormant l'hiver, alors que le second est adapté à des climats intermédiaires. Le groupe Kujyo, correspondant à des ciboules à feuilles, est bien adapté aux climats chauds, où il pousse continûment. Le groupe yagura negi est un peu particulier : ses inflorescences produisent des bulbilles et sa reproduction est végétative ; il est plutôt

cultivé pour ses feuilles. Dans la culture en jeunes pousses, on emploie le groupe Kujyo ou le cultivar 'Iwatsuki' du groupe Kaga.

Ford-Lloyd, B. V., & Armstrong, S. J. (1993). Welsh onion: Allium fistulosum L. In G. Kalloo and B.O. Bergh (Eds.), *Genetic improvement of vegetable crops* (p. 51-58). Pergamon.

Inden, H., & Asahira, T. (1990). Japanese bunching onion (Allium fistulosum L.). In J.L. Brewster (Ed.), *Onions and allied Crops. Volume III. Biochemistry, Food Sciences, and Minor Crops* (p. 159-179). CRC Press.

Kołota, E., Adamczewska-Sowińska, K., & Uklańska-Pusz, C. (2013). Response of Japanese bunching onion (Allium fistulosum L.) to nitrogen fertilization. *Acta Scientiarum Polonorum Hortorum Cultus*, *12*(2), 51-61.

Lichtenhahn, M., Koller, M., Dierauer, H., & Baumann, D. (2005). *Weed control in organic vegetable cultivation*. Research Institute of Organic Agriculture (FiBL),

Padula, G., Xia, X., & Hołubowicz, R. (2022). Welsh onion (Allium fistulosum L.) seed physiology, breeding, production and trade. *Plants*, *11*(3), 343.

Rana, M.K., & Harshita, M. (2017). Welsh onion. In M.K. Rana (Ed.), *Vegetable Crop Science* (p. 43-50). CRC Press,

Tawaraya, K., Hirose, R., & Wagatsuma, T. (2012). Inoculation of arbuscular mycorrhizal fungi can substantially reduce phosphate fertilizer application to Allium fistulosum L. and achieve marketable yield under field condition. *Biology and Fertility of Soils*, *48*, 839-843.

14.4 Ciboulette chinoise

La ciboulette de Chine (*Allium tuberosum*) est une plante pérenne herbacée de la famille des amaryllidacées. C'est, en France, une production de jardiniers amateurs, et que l'on trouve rarement dans le commerce. Il y a 4 à 9 feuilles d'une trentaine de centimètres par bulbe, bulbes qui tiennent à un rhizome commun : la plante poussant en touffe. Les hampes florales peuvent atteindre 50 centimètres et portent

des ombelles de 20 à 40 fleurs blanches étoilées. Si la ciboulette de Chine est parfois employée comme simple plante ornementale, les feuilles et les hampes florales – avec les boutons non encore ouverts, de préférence - sont utilisées comme herbes condimentaires. Son goût est celui de l'ail, en plus doux. Le bulbe ne présente pas d'intérêt. On ne sera pas très surpris d'apprendre que les graines ont été employées en Chine pour constituer des aphrodisiaques, qui semblent fonctionner sur des rats mâles (Guchua et al., 2009) : une bonne nouvelle pour les rhinocéros !

Spech et Keller (1997) ont mené une étude de la température de germination de différents membres du genre *Allium*, mais pour *Allium tuberosum*, seulement à 5 °C (très mauvaise) et à 11 °C (bien meilleure : 90 % de germination, mais lente, de l'ordre de 40 jours). En s'inspirant, faute de mieux, de la germination de l'oignon (*Allium cepa*) plus étudiée, Rowse et al., (2003) arrivent à une gamme optimale vers 15-20 °C. La profondeur de semis est de 1 cm (PMG=4-5 g). Les semences n'ont pas une grande durée de conservation. La culture en pot est classique, en n'hésitant pas à sursemer. La transplantation est courante, avec cinq graines en contenant 4×4 (cm), et deux mois plus tard, une implantation de chaque touffe à 20-30 cm. La plante se multiplie également par division.

La ciboulette chinoise pousse dans les climats frais et de façon optimale à 20-25 °C. On peut l'exposer en plein soleil ou à mi-ombre. En jours longs, en été ou à la fin de l'été, selon les cultivars, la plante fleurit et la croissance est ralentie. Elle est aussi très limitée en hiver, car les jours courts et les températures basses induisent une dormance, et sauf dans les climats chauds, les feuilles finissent par disparaître. La plante est toutefois rustique (RHS=H5) et elle va repartir au printemps. Une protection d'hiver permet de continuer à récolter, mais en quantités et en qualités moins intéressantes.

Saito (2020) décrit le mode de culture chinois à grande échelle, permettant de produire sur de nombreuses années, et dont il est possible de s'inspirer. Dans des sillons profonds de 10 cm, la graine est semée à 1 cm de profondeur. La première année, la plante n'est pas trop arrosée pour encourager son système racinaire (qui est peu développé) et elle n'est pas coupée, afin de maximiser ses réserves. La seconde année, les feuilles abimées sont supprimées et la terre est tirée

dans le sillon pour enterrer la base des feuilles. Trois coupes sont faites, à un mois d'intervalle, lorsque les feuilles[543] font 20 cm. On prend garde de ne pas couper les feuilles au ras du sol, pour la repousse. Des fertilisants peuvent être apportés après chaque coupe. On ne cueille pas en automne, pour laisser les réserves se reconstituer. Au printemps suivant, on ratisse pour enlever les vieilles racines et les vieilles feuilles. On rajoute parfois un peu de terre (et de compost) pour enterrer les racines qui ont tendance à sortir de terre. À partir de la troisième année, il est possible d'ajouter une coupe des hampes florales en fin d'été. Il faut être patient avec la ciboulette chinoise, la production augmente avec les années.

Dans d'autres systèmes (Rubatsky & Yamaguchi, 2012), il est également possible de blanchir la ciboulette chinoise, avec une cloche obscure, par exemple. Se succèdent alors deux ou trois récoltes de feuilles vertes, puis deux ou trois récoltes de feuilles blanchies, puis une récolte de hampes florales la même année.

Pour ce qui est de la fertilisation, elle doit être réitérée sur les années de culture. Sahoo et Nalla (2017) proposent, à la préparation du sol, 1.5-2 kg/m^2 de fumier, puis 50-60 N (kg/ha)[544] ; chaque début d'année, sont ajoutés 5 N (kg/ha). L'irrigation est importante pour une bonne productivité, même si la ciboulette chinoise peut tolérer un stress hydrique. Le contrôle des mauvaises herbes est fondamental les deux premiers mois de l'installation, mais doit ensuite rester régulier. Il faut faire attention aux racines, assez superficielles, de la plante et se contenter d'un sarclage. Au fil des années, les adventices exercent une plus grande pression et un mulch est bienvenu (Adamczewska-Sowinska & Turczuk, 2016). La couverture du sol est intéressante, mais son effet dépend du type de paillage et du climat. Ainsi, en région froide, on aura intérêt à utiliser une bâche noire, et en zone plus chaude, un mulch organique clair.

---

[543] Les feuilles ne peuvent être conservées au frais que deux ou trois jours au mieux.

[544] Je préfère ne pas donner leurs préconisations en phosphore et potassium, car je ne suis pas certain qu'ils parlent en termes de P et K ou bien en termes de P_2O_5 et K_2O.

La ciboulette chinoise ne souffre pas réellement de ravageurs ou de maladies problématiques, ce qui constitue un avantage par rapport à d'autres espèces du genre *Allium* ; et sa culture permet une diversification, et donc une répartition des risques (Pandey et al., 2014).

La version domestique de la ciboulette chinoise a peu évolué par rapport à la version sauvage qui existe toujours en Chine. Dans ce pays, la plante présente une certaine variabilité phénotypique s'exprimant, entre autres, par des floraisons plus ou moins précoces, mais que l'on ne retrouve pas ailleurs, où une espèce type est essentiellement cultivée. On peut dénicher quelques cultivars à feuilles plus larges d'origine japonaise (où elle prend le nom de *nira*). Les fleurs de la ciboulette de Chine sont complètes, mais protandres. Elle est allogame, mais, pollinisée ou pas, la reproduction par apomixie est la plus courante (Kojima & Nagato, 1992).

Adamczewska-Sowinska, K., & Turczuk, J. (2016). Yielding and biological value of garlic chives (Allium tuberosum Rottl. ex Spreng.) depending to the type of mulch. *Journal of Elementology*, *21*(1), 7-19.

Guohua, H., Yanhua, L., Rengang, M., Dongzhi, W., Zhengzhi, M., & Hua, Z. (2009). Aphrodisiac properties of Allium tuberosum seeds extract. *Journal of Ethnopharmacology*, *122*(3), 579-582.

Kojima, A., & Nagato, Y. (1992). Pseudogamous embryogenesis and the degree of parthenogenesis in Allium tuberosum. *Sexual Plant Reproduction*, *5*, 79-85.

Pandey, A., Pradheep, K., & Gupta, R. (2014). Chinese chives (Allium tuberosum Rottler ex Sprengel): a home garden species or a commercial crop in India. *Genetic Resources and Crop Evolution*, *61*, 1433-1440.

Rowse, H. R., & Finch-Savage, W. E. (2003). Hydrothermal threshold models can describe the germination response of carrot (Daucus carota) and onion (Allium cepa) seed populations across both sub-and supra-optimal temperatures. *New Phytologist*, *158*(1), 101-108.

Rubatzky, V. E., & Yamaguchi, M. (2012). *World vegetables: principles, production, and nutritive values*. Springer Science & Business Media.

Sahoo, D., & Nalla, M.K. (2017) Chinese chives. In M.K. Rana (Ed.), *Vegetable crop science* (p. 9-16). CRC Press.

Saito, S. (2020). Chinese Chives Allium tuberosum Rottl. In J.L. Brewster (Ed.), *Onions and allied Crops. Volume III. Biochemistry, Food Sciences, and Minor Crops* (p. 219-230). CRC Press.

Specht, C. E., & Keller, E. R. J. (1997). Temperature requirements for seed germination in species of the genus Allium L. *Genetic Resources and Crop Evolution*, *44*, 509-517.

14.5 Ciboulette

« Ciboulette » est le titre du seul opéra dont l'héroïne est maraîchère. Mais c'est aussi *Allium schoenoprasum*, une plante pérenne, poussant en touffe, de la famille des amaryllidacées ; elle est utilisée comme herbe condimentaire. Ses feuilles cylindriques sont d'une longueur de 15-30 cm, mais sa tige peut atteindre 50 cm lors de la floraison ; alors apparaissent des ombelles d'une couleur allant du blanc jusqu'au violet, en passant par le rose. Ces ombelles sont peuvent également être mangées, mais sont surtout employées, de façon décorative, dans des salades.

La graine n'est pas très grosse (PMG=1 g), et une profondeur de semis de 0.5-1 cm s'avère satisfaisante. Attention, le pourcentage de germination est assez bas (50-65 %) et la longévité des semences est des plus faibles, particulièrement à température ambiante (Nagel & Börner, 2010) : il vaut donc mieux sursemer. La germination débute lentement à 3-5 °C, les températures optimales se situant plutôt à 15-20 °C (Chen, 2006). La ciboulette est une plante monocotylédone.

Lorsque la plantule a trois à six vraies feuilles, et que le bulbe primaire, à la base de la tige, atteint un diamètre de 8 mm, deux bourgeons axillaires permettent de créer deux nouvelles tiges. Deux ou trois feuilles se forment alors sur chaque tige de la plante, puis elle se divise de nouveau. Ce processus de multiplication se répète cinq à sept fois, ce qui conduit à une touffe d'environ 80 feuilles en première année.

Les tiges de cette touffe sont reliées par un rhizome, en dessous du bulbe.

En début d'automne, une dormance partielle commence, influencée par une durée du jour passant au-dessous de 14 heures et des températures entre 6 °C et 20 °C (Krug & Fölster, 1976). Pendant quatre semaines, environ, la croissance s'arrête, les feuilles jaunissent, puis meurent. Leurs réserves ont été transférées vers les bulbes et les racines. La dormance véritable commence ensuite et dure, a minima, quatre semaines, mais elle s'étire normalement jusqu'aux premiers beaux jours.

À partir de la deuxième année, la plante fleurit au printemps. Les ombelles portent de 10 à 50 fleurs, chacune étant complète. La plante est souvent pollinisée de façon croisée par les insectes, mais l'autopollinisation est également possible, bien que la ciboulette soit protandre. Il y a un risque de dépression de consanguinité. La plante peut être diploïde, triploïde ou tétraploïde (Tatlioglu, 1993).

La température de croissance optimale de la ciboulette est de 17–25 °C (Brewster, 1979), mais elle survit aux températures extrêmes : elle est, en particulier, rustique (RHS=6). Son irrigation doit être soignée, en évitant la saturation, car c'est une plante présente spontanément dans les pelouses et rochers humides (Gilet & Haudricourt, 1977) et dont la racine est de faible profondeur. La ciboulette répond très bien à la fertilisation (Suojala, 2003) et une quantité de 185–200 N / 17-20 P / 120-140 K (kg/ha) peut lui être proposée, sachant que l'apport d'azote doit être fractionné ; on visera donc un apport au moins à chaque récolte. Dieu, s'il existe, a créé les mauvaises herbes le même jour que la ciboulette : elle est, en effet, très peu compétitive, du fait de son faible enracinement et de sa canopée très limitée. Lichtenhahn et al. (2005) considèrent que la période critique de désherbage... ne s'arrête jamais. C'est pourquoi un paillage peut s'avérer intéressant, car il permet en outre de conserver une certaine humidité du sol, voire même de le nourrir, si ce mulch est organique. Il convient, toutefois, de se méfier des fortes températures générées par l'utilisation d'une bâche en plastique.

Plusieurs modes de culture sont envisageables. La ciboulette peut être cultivée à la maison, par exemple en pot de 12 cm, en sursemant à 40 graines. Au champ, elle peut être cultivée comme annuelle ou

comme vivace. Dans ce dernier cas, elle perd généralement en productivité au bout de trois années : il faut alors soit la multiplier par division de la touffe, soit la semer de nouveau. Bien qu'un semis direct soit possible, la transplantation offre l'avantage d'éviter une trop forte compétition avec les mauvaises herbes en début de culture : Suojala (2003) utilise des contenants de 5×5 (cm), avec 8 graines, mais on peut en mettre jusqu'à 15 pour gêner ultérieurement l'immiscion d'adventices, et en une seule coupe, récolter plus. Au bout de six semaines, on plantera à 10-15 cm pour une culture annuelle, et au double pour une culture pluriannuelle. Il est peu probable que le jardinier amateur crée de longues lignes de ciboulette pour sa consommation personnelle : de courtes lignes peuvent toutefois constituer des séparations de planches ou des bordures vivantes, particulièrement jolies au moment de la floraison. Pour ceux qui aiment les procédés compliqués, manger hors saison et la violence : il est possible de casser la période de dormance et de cultiver la ciboulette en serre pendant l'hiver. Pour opérer un tel forçage, je les renvoie à Fölster & Kru (1977) qui détaillent des techniques de traitements des bulbes à l'eau chaude ou de températures de l'air élevées. Afin d'étendre la saison, on se contentera, pour des plants en place, d'utiliser des cloches, en janvier, pour un peu avancer la reprise ; ou bien de préparer, en février, des nouveaux plants à l'intérieur pour une installation précoce.

La ciboulette peut se récolter en plusieurs fois, en coupant à 2-3 cm au-dessus de la surface du sol, pour ainsi permettre la repousse. La première année, il faut procéder à deux ou trois récoltes seulement, sinon celles des années suivantes seront diminuées. Ces années suivantes, la récolte commence début mai, avant la floraison, puis début juin, il vaut mieux supprimer les hampes florales qui ont un goût désagréable. En juillet et en août, les récoltes sont importantes, et possibles deux fois par mois. Une seule coupe doit avoir lieu début septembre, sinon la première récolte de l'année suivante sera hypothéquée (Poulsen, 2020).

Une fois cueillie, la ciboulette peut être conservée à 0 °C avec une forte humidité, pendant une voire deux semaines, mais le résultat s'avère nettement moins probant à 4 °C (Vina & Cerimele, 2009). Elle peut également être congelée, après avoir été blanchie à la vapeur

pendant cinq minutes, et garde, dans ce cas, ses qualités nutritionnelles pendant au moins quatre mois (Iosin et al., 2017). Séchée, elle perd fortement de son arôme.

La ciboulette est une plante relativement épargnée par les problèmes. Les rares maladies sont causées par *Puccinia allii* (la rouille de l'ail), *Sclerotium cepivorum* (la pourriture blanche des oignons) et *Peronospora destructor* (le mildiou de l'oignon). Le ravageur principal est *Delia antiqua* (la mouche de l'oignon).

Il s'agit d'une culture de faible importance économique qui, dès lors, n'a pas donné lieu à de grands efforts de sélection. Même si, apparemment, rien ne ressemble plus à une ciboulette qu'une autre ciboulette, les populations cultivées donnent cependant des rendements assez diversifiés. Cette production n'est pas toujours très uniforme et peut d'ailleurs s'être hybridée avec les populations sauvages. Il existe néanmoins quelques véritables cultivars, à plus grosses feuilles et semences reproductibles, voire des hybrides F1 avec des résistances aux maladies.

Brewster, J. L. (1979). The response of growth rate to temperature in seedlings of several Allium crop species. *Annals of Applied Biology*, *93*(3), 351-357.

Chen, H. (2006). Chives. In K.V. Peter (Ed.), *Handbook of Herbs and Spices* (p. 337-346). Woodhead Publishing.

Fölster, E., & Krug, H. (1977). Influence of the environment on growth and development of chives (Allium schoenoprasum L.). II. Breaking of the rest period and forcing, *Scientia Horticulturae, 7*(3), 213-224.

Gillet, H., & Haudricourt, A. G. (1977). Ciboule et ciboulette. *Journal d'Agriculture Traditionnelle et de Botanique Appliquée*, *24*(1), 55-59.

Iosin, A., Raba, D., Moldovan, C., Popa, V., & Dumbravă, G. (2017). The influence of freezing on the content of vitamin C, chlorophylls and carotenoids in chives (Allium schoenoprasum L.). *Scientific and Technical Bulletin*, *14*, 49-52.

Krug, H., & Fölster, E. (1976). Influence of the environment on growth and development of chives (Allium schoenoprasum L.). I. Induction of the rest period. *Scientia Horticulturae, 4(3),* 211-220.

Lichtenhahn, M., Koller, M., Dierauer, H., & Baumann, D. (2005). *Weed control in organic vegetable cultivation*. Research Institute of Organic Agriculture (FiBL).

Nagel, M., & Börner, A. (2010). The longevity of crop seeds stored under ambient conditions. *Seed Science Research*, *20*(1), 1-12.

Poulsen, N. (2020). Chives Allium schoenoprasum L. In J.L. Brewster (Ed.), *Onions and allied crops* (p. 231-250). CRC Press.

Splittstoesser, W. E. (1990). *Vegetable growing handbook*. Springer Science & Business Media.

Suojala, T. (2003). Yield potential of chive: effects of cultivar, plastic mulch and fertilisation. *Agricultural and Food Science in Finland, 12*, 95-105.

Tatlioglu, T. (1993). Chive: Allium schoenoprasum L. In G. Kalloo and B.O. Bergh (Eds.), *Genetic improvement of vegetable crops* (p. 3-13). Pergamon.

Vina, S. Z., & Cerimele, E. L. (2009). Quality changes in fresh chives (Allium schoenoprasum L.) during refrigerated storage. *Journal of Food Quality*, *32*(6), 747-759.

14.6 Coriandre

Il y a trois genres d'individus : ceux qui déclarent ne pas aimer la coriandre, ceux qui sont trop polis pour le dire et les Asiatiques. *Coriandrum sativum* est une plante annuelle herbacée de la famille des apiacées. Elle ramifie facilement et ses feuilles, ressemblant au persil plat, n'ont pas forcément la même forme sur l'ensemble de la plante (hétérophyllie) ; les feuilles du haut étant généralement plus découpées. L'ensemble de la plante est comestible : ses racines, sa tige, ses fleurs, et bien entendu, les deux principales récoltes que sont ses feuilles et ses graines. Selon la récolte visée, nous verrons que la conduite de la culture est un peu différente.

Son fruit contient deux méricarpes (schizocarpe). Le gros gabarit de ce fruit facilite la manipulation, mais son épaisse cuticule ralentit la germination des graines, qui prend deux à trois semaines. On peut accélérer le processus en la faisant tremper dans l'eau chaude pendant une journée (Malhotra, 2016). La température optimale de germination est de 25 °C, avec une minimale à 5 °C et une maximale vers 30-35 °C

(Allahmoradi, et al., 2013). La profondeur maximale de semis est de 2-2.5 cm (PMG=10.3 g).

La coriandre est bien adaptée aux climats tempérés, supportant une large gamme de températures et résistant à de légers gels (RHS = H5). La chaleur a tendance à accélérer la montée à graines. Il existe un sévère trouble psychologique chez de nombreux jardiniers qui voudraient, à toute force, l'éviter ; la dure réalité est que ce n'est pas possible en été ; la douce réalité est, d'une part, que les graines obtenues sont délicieuses et se conservent longtemps, et d'autre part, qu'elles permettent une succession régulière des semis, qui réglera le problème de la production de feuilles. Ainsi, on choisira une exposition en plein soleil, si la graine est le but de la récolte ; pour obtenir des feuilles fraîches en été, une exposition à mi-ombre est, en revanche, préférable, ainsi que l'évitement du stress hydrique.

Les écarts conseillés sur le rang varient de 10 à 20 cm, et entre les rangs, de 25 à 75 cm. (Ce qui reflète probablement des techniques différentes de récolte ou de désherbage, on peut même aller jusqu'à une densité de 100 plants au mètre carré !) En ce qui concerne la fertilisation, il faut, là aussi, distinguer selon que l'on souhaite des feuilles, et dans ce cas, une fertilisation de 100 N (kg/ha) est possible ; ou que l'on souhaite des fruits, et il ne faut alors pas dépasser les 50 N (Diederichsen, 1996). Pour leur part, Sharma & Sharma (2012) conseillent 1-2 kg/m^2 de fumier ou de compost, additionné de 20-30 N / 30 P_2O_5 / 20 K_2O (kg/ha) au semis, puis 40 N en deux doses. Pour le désherbage, la coriandre est très sensible aux mauvaises herbes lors de son stade juvénile, deux désherbages sont conseillés, typiquement à 30 jours d'intervalle.

Les problèmes que peut rencontrer la coriandre sont les gastéropodes, à l'installation, puis le puceron (*Hyadaphis coriandari Das*). Si vous avez une passion pour les maladies de la coriandre, la lecture de l'article de Khare et al. (2017) sera jouissive.

On peut commencer la récolte des feuilles, six semaines après le semis. Il faut couper régulièrement, en particulier, pour éviter la montée à graines, car la croissance des feuilles devient alors négligeable. Une fois cueillies, les feuilles ne se conservent pas longtemps, et les prolonger sur deux semaines demande une faible température (0-1 °C) et une bonne humidité.

Il existe des variétés à montaison *plus lente* (*e.g.* 'Quick Bolting', 'Marino', 'Cruiser'), ou avec un feuillage plus fin ('Confetti'), ou encore un arôme plus citronné ('Lemon'). Pour produire ses propres graines, il faut savoir que les fleurs sont hermaphrodites ou mâles. Dans les fleurs hermaphrodites, il y a un décalage temporel entre la maturité des organes mâles et femelles. La plante présente 50 à 60 % de pollinisation croisée ; la pollinisation est essentiellement le fait des abeilles (Patil & Pastagia, 2016). Il faut 45-60 jours pour la floraison, et la récolte de graines est possible environ trois mois après le semis.

Allahmoradi, P., Ghobadi, M., & Taherabadi, S. (2013). Assessing cardinal temperature for germination in coriander (Coriandrum sativum), Sainfoin (Onobrychis vicifolia) and Bitter Vetch (Vicia ervilia). *Annual Research & Review in Biology, 3*(4), 881-887.

Diederichsen, A. (1996). *Coriander: Coriandrum Sativum L* (Vol. 3). Bioversity International.

Khare, M. N., Tiwari, S. P., & Sharma, Y. K. (2017). Disease problems in the cultivation of coriander (Coriandrum sativum L.) and their management leading to production of high quality pathogen free seed. *International Journal of Seed Spices, 7*(1), 1-7.

Malhotra, S. K. (2016). Recent advances in seed spices research–a review. *Annals of Plant and Soil Research, 18*(4), 300-308.

Patil, P. N., & Pastagia, J. J. (2016). Effect of bee pollination on yield of coriander, Coriandrum sativum Linnaeus. *International Journal of Plant Protection, 9*, 79-83.

Sharma, M. M., & Sharma, R. K. (2012). Coriander. In K.V. Peter (Ed.), *Handbook of Herbs and Spices* (p. 216-249). Woodhead Publishing.

14.7 Maceron

Le maceron (*Smyrnium olusatrum*) est une plante bisannuelle herbacée. Il a été cultivé en Europe durant l'Antiquité et le Moyen-

âge[545] pour être ensuite supplanté par le céleri (*Apium graveolens*). Il se trouve, à l'état sauvage, surtout en bord de Méditerranée, où ses feuilles sont encore employées pour réaliser des salades de plantes sauvages (Biscotti & Pieroni, 2015). En fait, l'ensemble de la plante est comestible : sa racine, sa tige, ses feuilles, ses jeunes pousses, ses boutons floraux et ses graines. Le maceron semble, en outre, avoir des propriétés médicinales intéressantes, il est, entre autres, utilisé sous forme d'huile essentielle (Maggi et al., 2012). Il s'agit donc d'un « légume oublié », dont la redécouverte passe par les réponses à trois questions : comment le cultiver ? Comment le cuisiner ? Comment trouver des graines ?

14.7.1 Comment cultiver le maceron ?

Le maceron fait partie de la famille des apiacées. Doust et Doust (1982) relèvent, avec d'autres auteurs, que cette famille comprend 2 850 espèces et 275 genres, ce qui semble... beaucoup, et qu'un Linné d'un autre continent aurait, peut-être, été plus circonspect, en se limitant à quelques genres. Tout cela, pour dire qu'ils soulignent de fortes ressemblances dans cette famille : par conséquent, en cas de manque d'information sur la culture du maceron, nous pourrons faire le pari raisonnable que la conduite de la culture d'autres apiacées, mieux connues (carotte, persil, céleri), peut nous inspirer.

En ce qui concerne la germination du maceron, elle réclame une période de froid pour lever la dormance de sa graine. On peut également imaginer qu'un trempage peut contribuer à une germination plus rapide, comme c'est le cas pour plusieurs apiacées qui sont, de façon générale, plutôt lentes à lever. Si les températures cardinales de germination ne sont pas connues, Randall (2003) montre qu'à l'état naturel, la germination se déroule de septembre à mars, pas loin de Londres (Essex, où la température moyenne à cette saison va de 15 °C

[545] Il est cité dans le capitulaire *De Villis* promulgué par Charlemagne : Barbaud, J. (1989). Le capitulaire de villis et le développement des jardins médicinaux sous Charlemagne. *Histoire des Sciences Médicales*, *23*, 299-308.

à 5 °C). Les autres apiacées cultivées[546] (persil, carotte, céleri) mettent de 10 à 20 jours pour germer à 15-20 °C.

En ce qui concerne les températures de croissance, il s'agit d'une plante de saison fraîche. Il faut noter que le maceron subit, la première année, une estivation, c'est-à-dire qu'il est plus ou moins dormant en été. La seconde année, il fleurit d'avril à juin, voire plus tardivement. Il arrive également, en cas de vernalisation, qu'il y ait une montée à graines prématurée : on évitera donc une exposition trop prématurée au froid. Le maceron est considéré par Palme (2021) comme rustique, ce qui est confirmé par un classement RHS=H6, et permet d'envisager sa culture l'hiver. L'exposition idéale en Méditerranée est dans des endroits frais et à mi-ombre, mais on considérera naturellement une place plus ensoleillée lorsqu'on remonte vers le nord. Randall (*op. cit.*) décrit le maceron comme une espèce maritime : on en déduira qu'en été, une irrigation peut être bienvenue. Toutefois, sa forte racine pivot et ses mycorhizes, laissent espérer une certaine résistance à la sécheresse. Le maceron est initialement peu compétitif et va demander un désherbage attentif. On a peu de renseignements sur les ravageurs et les maladies du maceron, il ne semble, en tout cas, pas être sensible à la mouche de la carotte.

Trois modes de culture, au moins, sont envisageables. Premièrement, un semis, sans doute direct, car beaucoup d'apiacées ne supportent guère le repiquage, du moins si l'objectif est d'en consommer la racine. On le retardera à avril-mai, pour éviter une vernalisation. Deuxièmement, un semis multi-graines en godets, effectué mi-août et transplanté un mois plus tard, afin d'avoir une récolte hivernale de feuilles (Palme, 2021). Troisièmement, un semis en pépinière ou godets en septembre, bien tenu à l'abri, pour un repiquage en fin d'hiver, avec pour objectif principal de produire des fleurs ou des graines.

---

[546] Bierhuizen, J. F., & Wagenvoort, W. A. (1974). Some aspects of seed germination in vegetables. 1. The determination and application of heat sums and minimum temperature for germination. *Scientia Horticulturae*, *2*(3), 213-219.

14.7.2 Comment cuisiner le maceron ?

Maggi et al. (2012) évoquent un certain nombre d'utilisations des différentes parties du maceron. Les jeunes feuilles peuvent être employées comme du persil, et les feuilles plus âgées comme du céleri. Les jeunes tiges peuvent être cuisinées comme des asperges. Les boutons floraux peuvent être ajoutés à des salades, ou frits, voire bouillis et mangés comme des petits brocolis. Les graines peuvent être employées pour aromatiser des viandes, des soupes ou comme substitut du poivre. Il est, enfin, possible d'utiliser la racine comme celle du panais.

14.7.3 Comment trouver des graines de maceron ?

Difficilement. Les semenciers les plus importants le proposent rarement, et il faut se tourner vers des producteurs alternatifs, avec un coût non-négligeable. Seule l'espèce type existe, et il n'y a pas de cultivar connu, à part 'Emmanuel'[547]. On envisagera donc de produire ses propres graines ?

Pour ce faire, il faut savoir que le maceron est une plante monoïque dont les fleurs jaunes, disposées en ombelles, sont soit mâles, soit hermaphrodites, dans une proportion de 4 contre 1 ; et il est de plus protandre. Il est allogame, pollinisé par de nombreux insectes, et peut-être considéré comme une plante mellifère. Le maceron ne semble pas s'hybrider avec d'autres espèces, mais il reste qu'il peut, bien entendu, se croiser avec sa version sauvage, dans les zones où elle est répandue. Le fruit noir est un diakène (classique chez les apiacées).

Biscotti, N., & Pieroni, A. (2015). The hidden Mediterranean diet: wild vegetables traditionally gathered and consumed in the Gargano area, Apulia, SE Italy. *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*, *84*(3).

Brinkkemper, O. (2015). *Smyrnium olusatrum* L. (alexanders): an ancient kitchen herb from late medieval Rotterdam (The

[547] Emmanuel Maceron...

Netherlands). *Vegetation History and Archaeobotany*, *24*, 249-252.

Doust, J. L., & Doust, L. L. (1982). Life-history patterns in British Umbelliferae: a review. *Botanical Journal of the Linnean Society*, *85*(3), 179-194.

Palme, W. (2021). *Le potager au cœur de l'hiver*. Tana éditions, Paris.

Randall, R.E. (2003). *Smyrnium olusatrum* L. *Journal of Ecology*, *91(2),* 325-340.

Maggi, F., Barboni, L., Papa, F., Caprioli, G., Ricciutelli, M., Sagratini, G., & Vittori, S. (2012). A forgotten vegetable (*Smyrnium olusatrum* L., Apiaceae) as a rich source of isofuranodiene. *Food Chemistry, 135*, 2852–2862

14.8 Oseille(s)

Le genre *Rumex* contient plusieurs espèces utilisées pour l'alimentation humaine. Sont principalement cultivées[548] : l'oseille commune (*Rumex acetosa*), la plus petite oseille ronde (*Rumex scutatus*), la plus douce oseille-épinard (*Rumex patientia*) et la plus ornementale oseille sanguine (*Rumex sanguineus*). Avec la rhubarbe, elles sont les rares représentantes de la famille des polygonacées au potager.

En ce qui concerne la germination, bien qu'appartement au même genre, la différence apparaît assez nettement entre les différentes espèces (Van Assche et al., 2002, qui comparent neuf espèces du genre *Rumex*). Pour l'oseille commune, les températures de germination sont de 5 °C (minimale), de 17.5-22.5 °C (optimale) et de 30 °C (maximale). Elle préfère les températures alternées (jour/nuit) aux températures constantes. Elle peut germer dans le noir, mais elle est plus performante à la lumière, et une profondeur de semis de 1 cm s'avère satisfaisante (PMG=0.79 g). La longévité des graines est assez faible. L'oseille ronde a un comportement proche en termes de longévité des graines. Elle est plus sensible à la lumière qu'à l'alternance des

[548] Mais d'autres sont comestibles, comme *R. abyssinicus*, *R. acetosella*, *R. alpinus*, *R. hymenosepalus*, *R. gracilescens* et *R. pseudonatronatus*...

températures. Ses températures cardinales sont de 5 °C / 20-30 °C / 35 °C. Une profondeur de semis de 1 cm lui convient également (PMG=1.3 g). L'oseille sanguine est assez différente, elle germe mieux en surface (PMG=0.83 g), mieux à la lumière, nécessite absolument une température alternée (donc attention, pour les semis à l'intérieur) et les températures cardinales sont de 12.5 °C / 20 °C / 30 °C. La longévité de ses graines est plus grande.

Sauf indication contraire, nous parlerons uniquement de l'oseille commune dans la suite de la présentation. Il s'agit d'une plante pérenne, de 30 à 80 cm de hauteur. Elle est utilisée soit crue en jeunes feuilles, dans des salades avec d'autres légumes-feuilles, soit cuite pour des feuilles plus développées, dans des soupes, dans des sauces ou pour accompagner des œufs ou du poisson. Dotée de grandes qualités nutritionnelles et antioxydantes, elle contient, cependant, une quantité importante d'acide oxalique, aussi appelé « sel d'oseille ». La qualité des feuilles, une fois cueillies, se détériore très rapidement. Les hampes florales sont également comestibles. L'oseille ronde a un goût moins prononcé, l'oseille-épinard est fort peu acide et l'oseille sanguine est à réserver à ses ennemis.

En ce qui concerne la reproduction, chez les angiospermes, la grande majorité (90 %) des espèces sont hermaphrodites. L'oseille commune est usuellement présentée comme dioïque, ce qui signifie que certains individus portent des fleurs mâles et d'autres des fleurs femelles. De plus, l'oseille commune possède un chromosome sexuel, ce qui est rarissime chez les plantes (Korpelainen & Pietiläinen, 2020). Bien que ce ne soit pas le chromosome Y qui détermine le sexe, le résultat est qu'il y a, en fait, des individus mâles, femelles, mais aussi hermaphrodites (fleurs complètes) ou... intersexes (fleurs mâles et femelles chez le même individu). On rappellera que c'est aussi le cas pour 1.7 % à 4 % des individus chez *Homo sapiens* (Jones, 2018). Il restera à déterminer le sexe de ses propres plants à la floraison. Les plantes femelles ont un effort reproductif plus important à produire (pas seulement des fleurs, mais aussi des akènes triangulaires, et des graines obtenues grâce à une pollinisation anémophile), on pourrait par conséquent s'attendre à une croissance plus faible et une survie moindre. Pourtant, il y a généralement plus de plantes femelles et elles sont de taille plus importante. Championnes !

Les températures de croissance optimales de l'oseille commune sont de 16-20 °C. Au-dessous de 5 °C, sa croissance s'arrête, mais elle peut supporter des gels (RHS= 7). La température maximale de croissance est vers 25 °C. L'oseille commune fleurit en jours longs et lorsque les températures s'élèvent. Il vaut mieux alors couper l'ensemble de la plante (pas au ras du sol, mais laisser un peu de la rosette pour qu'elle puisse repousser rapidement) afin de l'encourager à créer de nouvelles feuilles, de ne pas épuiser la plante et d'éviter sa prolifération, car elle peut devenir invasive. Elle va perdre ses feuilles en hiver, puis repousser au printemps ; toutefois, il est possible d'allonger la saison de culture en automne, et de l'avancer au printemps, à l'aide de protections. Pour l'automne, il ne faut pas récolter vers la fin d'août et le début de septembre, car elle ne poussera plus ensuite, mais on pourra récolter un peu plus longtemps. Palme (2021) développe une stratégie particulière pour l'hiver, propre à l'oseille sanguine, qui est un semis fin août (six graines par godet). On se méfiera du grand soleil, et mi-septembre, on plantera sous protections à 15 cm. On pourra alors récolter plusieurs fois de novembre à mars.

L'oseille commune préfère les sols bien drainés. Une exposition en plein soleil ou à mi-ombre est possible (et même conseillée pour l'oseille sanguine). Elle peut tolérer un certain niveau de sécheresse (l'oseille ronde le tolère mieux, et l'oseille sanguine très peu), car elle est dotée d'un fort système racinaire ; cependant, sa production sera bien meilleure, si le sol reste convenablement humide. En ce qui concerne la fertilisation, Silva et al. (2018) montrent une bonne réponse, et qu'avec 150 N / 100 P_2O_5 / 60 K_2O (kg/ha) : c'est *tudo bêm* ; Shama (2017) insiste sur l'intérêt de fertiliser après chaque récolte. Il faut désherber assez souvent, la première année, autour de l'oseille commune. De façon générale, bien qu'elle soit vivace, il est nécessaire de continuer à en prendre soin, même une fois la récolte passée, en la désherbant, en l'arrosant et en la fertilisant : il faut penser aux années suivantes.

Les problèmes sont les limaces et les pucerons, (parfois la puce à l'oseille), mais généralement, rien de bien sérieux. Globalement, c'est une plante assez simple à cultiver.

Il existe deux stratégies de culture : primo, une stratégie annuelle, où l'on ressème chaque année en mars-avril et où l'on peut obtenir une

récolte deux mois plus tard ; secundo, une stratégie pluriannuelle, où l'on récolte régulièrement, sauf à la floraison. Dans ce dernier cas, on divise la plante tous les 4-5 ans pour la relancer : elle se multiplie très bien de façon végétative. Les espacements en pluriannuel sont de 35 cm pour l'oseille commune, et de 30 cm pour l'oseille ronde. En annuel, il est possible de descendre à 15 cm.

C'est l'espèce type qui est souvent proposée, comme semences à la vente, mais des cultivars existent, comme 'Large de Belleville' et 'Blonde de Lyon'. 'Profusion' est un cultivar très particulier qui ne produit pas de fleurs (ni de graines), mais beaucoup de feuilles ; il ne peut être reproduit que de façon végétative.

Jones, T. (2018). Intersex studies: A systematic review of international health literature. *Sage Open*, *8*(2), 2158244017745577.

Korpelainen, H., & Pietiläinen, M. (2020). Sorrel (Rumex acetosa L.): not only a weed but a promising vegetable and medicinal plant. *The Botanical Review*, *86*, 234-246.

Maynard, D. N., & Hochmuth, G. J. (2006). *Knott's handbook for vegetable growers*. John Wiley & Sons.

Palme, W. (2021). *Le potager au cœur de l'hiver*. Tana éditions, Paris.

Sharma, A. (2017). Sorrel. in M.K. Rana (Ed.), *Vegetable crop science* (p 885-890). CRC Press.

Silva, L. F., de Souza, D. C., Resende, L. V., Gonçalves, W. M., Pereira, T. D. A., & Vieira, S. D. (2018). Nutrição mineral, densidade de plantio, caracterização biométrica e fenológica de Rumex acetosa L. *Revista de Ciências Agrárias*, *41*(1), 129-137.

Van Assche, J., Van Nerum, D., & Darius, P. (2002). The comparative germination ecology of nine Rumex species. *Plant Ecology*, *159*(2), 131-142.

14.9 Persil

Le persil (*Petroselinum crispum*) fait partie de la famille des apiacées. C'est une plante bisannuelle herbacée ramifiée. Les feuilles sont principalement consommées, mais il existe des variétés dont la racine a été développée par sélection (persil tubéreux) ; les tiges sont également comestibles.

Les températures cardinales de germination sont de 2 °C pour la minimale, de 20 °C pour l'optimale, et supérieure à 30 °C pour la maximale. Le persil est une plante notoirement lente à germer, mais à 20 °C, il peut émerger en une dizaine de jours (Ely & Heydecker, 1981). Un trempage des graines améliore sensiblement le pourcentage de germination (Dursun & Ekinci, 2010), mais d'une façon générale, le substrat de culture doit rester mouillé pendant toute la phase de germination qui peut être très longue (deux à trois mois...), si la température est fraîche. Une profondeur de semis de 0.5 cm est conseillée dans Charles (2012), avec un PMG=1.6 g.

Le persil est une plante de saison fraîche, la température idéale de croissance se situant entre 7 et 16 °C. Au-dessous de 7 °C, la croissance est ralentie, mais la plante est très rustique (RHS=H6). Pour une culture d'été, on préférera un emplacement à mi-ombre.

Le persil se comporte mieux en sol léger ; en sol très argileux, il est possible d'incorporer du sable. Le sol doit, en tout cas, être bien ameubli pour un semis direct, et ce, tout particulièrement dans le cas du persil tubéreux, pour lequel cette précaution est quasiment obligatoire. Le semis en pleine terre est assez compliqué à réussir, car, au printemps, la terre est généralement humide, mais froide, rendant le processus de germination long (et aléatoire) ; en été, même si le temps de germination est plus court, la terre doit rester en permanence mouillée, ce qui nécessite parfois plusieurs arrosages par journée, vu la faible profondeur du semis. L'automne est la saison la plus indiquée, mais le plant aura à peine le temps de pousser ensuite, à cause de l'ensoleillement qui diminue, et il montera très vite à graines au printemps. Il me semble plus judicieux de semer une dizaine de graines de persil (non-tubéreux) par godet et de réaliser ainsi, périodiquement, de petits bouquets, pour les garder en pot ou pour les transplanter. Les espacements préconisés varient de 10 à 20 cm sur le rang, et de 45 à 90 cm entre les rangs.

La fertilisation proposée par Kolota (2011) est conséquente, de l'ordre de 80 N (kg/ha) à l'implantation, puis la même quantité en deux fractions au moment des récoltes successives. Le persil est une plante qui craint le stress hydrique (El-Zaeddi et al., 2016), il doit donc être régulièrement arrosé pour une production importante. Étant une plante de croissance relativement lente, il va falloir choisir entre la

persillade et la posture contemplative, car sans désherbage, la perte peut s'élever à plus de 90 % en semis direct ! La période critique, suggérée par Karkanis et al. (2012), est entre 10 et 40 jours après l'émergence.

Les pucerons, apportant des virus, et la mouche de la carotte sont des problèmes usuels pour le persil, lequel souffre aussi de maladies causées par des bactéries et des champignons (et des virus).

La récolte du persil peut commencer entre deux à trois mois après le semis. Il est possible de récolter lorsque la plante atteint 20-25 cm de hauteur, en la coupant à 5 cm au-dessus du sol[549]. On recommence ensuite tous les 20-30 jours, pour obtenir trois à quatre récoltes au final. Le persil peut être séché, mais il est usuellement consommé frais. Il doit alors être conservé au froid (0 °C) et à l'humidité, pour être prolongé sur un mois ou deux.

Il existe deux grands types de persil à feuilles : le persil frisé et le persil à feuilles plates. Ce dernier présente généralement un goût plus prononcé. Pour le persil frisé, on peut choisir le très rustique 'Bravour' (AGM), ou pour une culture en pot, le plus compact 'Afrodite'; pour le persil plat, 'Gigante d'Italia' est le classique, et 'Oeione' une version résistante au mildiou.

Le persil est plutôt allogame et il est pollinisé par les insectes. Le fruit est schizocarpique, et à maturité, se sépare en deux méricarpes contenant la graine... comme souvent chez les apiacées.

> Du côté de chez Stéphane : Ma façon de cultiver le persil plat est de ne jamais le mettre à côté, ou pire encore, associé à la coriandre. Autant la différence visuelle est claire avec le persil frisé, autant pour le persil plat, elle est mince. Il suffit certes de le faire goûter à un Asiatique, mais c'est un peu loin... Autant amener l'Asie dans son jardin, comme l'explique le chapitre suivant !

---

[549] En fait, au-dessus de quelques feuilles portant aux aisselles des bourgeons ramifiants...

Dursun, A., & Ekinci, M. (2010). Effects of different priming treatments and priming durations on germination percentage of parsley (Petroselinum crispum L.) seeds. *Agricultural Sciences, 1*(1), 17.

Charles, D. J. (2012). Parsley. In K.V. Peter (Ed.), *Handbook of Herbs and Spices* (p. 430-451). Woodhead Publishing.

El-Zaeddi, H., Calín-Sánchez, Á., Martínez-Tomé, J., Noguera-Artiaga, L., Burló, F., & Carbonell-Barrachina, Á. A. (2016). Irrigation dose and plant density affect the essential oil content and sensory quality of parsley (Petroselinum sativum). *Scientia Horticulturae*, *206*, 1-6.

Ely, P. R., & Heydecker, W. (1981). Fast germination of parsley seeds. *Scientia Horticulturae*, *15*(2), 127-136.

Karkanis, A., Bilalis, D., Efthimiadou, A., & Katsenios, N. (2012). The critical period for weed competition in parsley (Petroselinum crispum (Mill.) Nyman ex AW Hill) in Mediterranean areas. *Crop Protection*, *42*, 268-272.

Kołota, E. (2011). Yield and quality of leafy parsley as affected by the nitrogen fertilization. *Acta Scientiarum Polonorum-Hortorum Cultus, 10*(3), 145-154.

Marthe, F. (2020). Petroselinum crispum (Mill.) Nyman (Parsley). In J. Novak and W.D. Blüthner (Eds.), *Medicinal, Aromatic and Stimulant Plants* (p. 435-466). Springer, Cham.

15 Légumes asiatiques

Dans leur article sur le potentiel des légumes asiatiques en Europe, Hong et Gruda (2020) indiquent que leur culture, celle des choux chinois, surtout, s'y développe rapidement. Ces légumes peuvent, en effet, répondre à une demande de diversification de la nourriture et d'une alimentation plus saine, ce qui participerait à limiter le risque de maladies chroniques[550]. Ils soulignent qu'il reste cependant à régler certains problèmes d'acclimatation, le plus caractéristique, pour les choux, étant celui de la montaison prématurée.

15.1 Bardane cultivée

La bardane cultivée (*Arctium lappa*) est une plante herbacée érigée pouvant largement dépasser la hauteur d'un mètre. Il s'agit d'une bisannuelle, appartenant à la famille des astéracées. Bien que, parfois, uniquement considérée comme une mauvaise herbe, elle possède de nombreuses propriétés médicinales et elle est, sous le nom de Gobo, un légume très apprécié au Japon. Les jeunes feuilles, en forme de cœur, se consomment comme des épinards, mais ce sont surtout les racines qui sont intéressantes. Elles peuvent atteindre 80 centimètres et sont assez fines, un peu comme des salsifis, ce qui ne facilite pas leur extraction du sol.

D'après Tripathi et al. (2012), la température optimale de germination de la bardane cultivée est de 22 °C. Nakamura (1954) précise qu'il est préférable que cette température soit alterne, que la semence soit exposée à la lumière, et par conséquent, qu'elle soit pratiquement semée à la surface du sol. Enfin, ou plutôt au préalable, un trempage peut faciliter la germination.

Douglas et al. (1992) notent que la transplantation, si elle est possible, se traduit généralement par des racines nettement plus courtes. On utilisera plutôt un semis direct qui pourra être en poquets, en visant un écart de 15 cm sur le rang (Sanders et al., 1997). La racine

---

[550] Hong, J., & Gruda, N. S. (2020). The potential of introduction of Asian vegetables in Europe. *Horticulturae*, *6*(3), 38.

de la bardane a une forte tendance à fourcher, aussi la préparation du lit de semences s'avère fondamentale. Il doit être bien ameubli, comme pour des carottes, mais encore plus profondément : c'est peut-être le moment de tester la fatigante technique de double-bêchage préconisée par Jeavons (2001). Une autre solution, plus pharaonique, peut être d'additionner du sable[551] au sol, voire de constituer une lasagne.

Les températures idéales pour la croissance de la bardane sont plutôt de 18 à 28 °C, même si elle tolère les températures élevées. Une exposition ensoleillée convient, mais il faudra veiller à conserver une bonne humidité dans le sol[552]. Lee et al. (2016) suggèrent une fertilisation assez importante de 230 N / 140 P_2O_5 / 210 K_2O (kg/ha). Une fois que les feuilles ont poussé, elles forment une belle canopée, gênant considérablement les concurrentes : un seul désherbage devrait donc suffire.

Le cycle de vie de la plante, la première année, consiste à croître végétativement, particulièrement au printemps et en automne, et à constituer des réserves dans sa racine pour l'année suivante, qui est celle de la floraison. Bien qu'il puisse se dérouler plus tôt, le semis de juillet est intéressant, car primo, le sol est bien réchauffé, et secundo, l'exposition aux très fortes températures est moins longue (penser peut-être à un ombrage initial des fragiles plantules et à leur irrigation régulière) ; ce qui permet de profiter d'un automne lui convenant mieux et qui procure, trois à quatre mois après le semis, une récolte des racines. Quoique la racine puisse se conserver dans le sol en hiver, il vaut mieux ne pas trop tarder à l'extraire, afin d'éviter qu'elle ne devienne fibreuse. La bardane perd ses feuilles en hiver ; elles repoussent vigoureusement au printemps et apparaît alors une tige florale portant des inflorescences corymbiformes, exhibant des capitules formés de fleurs violettes. Ces capitules s'accrochent facilement aux vêtements et aux fourrures des animaux, aidant à la dispersion des graines.

---

[551] Mais attention, pour que de tels apports de sable soient efficaces, cela implique des quantités considérables, de l'ordre de 50 kg/m^2 (*cf.* section 5.7).

[552] Mais je n'ai pu trouver plus de précisions à ce sujet... Pour faciliter la pénétration de la racine ?

Pour ce qui est de la production de semences, il faut savoir que la bardane cultivée peut s'hybrider avec la petite bardane *Arctium minus*. Les semenciers français ne proposent généralement que l'espèce type. Il existe au Japon de nombreuses variétés à cycle court (4 mois) et à cycle long (6 mois).

Douglas, M. H., Burgmans, J. L., Burton, L. C., & Smallfield, B. M. (1992). The production of burdock (Arctium lappa L.) root in New Zealand-a preliminary study of a new vegetable. *Proceedings Agronomy Society of New Zealand, 22*, 67-70.

Gross, R. S., Werner, P. A., & Hawthorn, W. R. (1980). The biology of Canadian weeds. 38. Arctium minus (Hill) Bernh. and A. lappa L. *Canadian Journal of Plant Science*, *60*(2), 621-634.

Jeavons, J. C. (2001). Biointensive sustainable mini-farming: II. Perspective, principles, techniques and history. *Journal of Sustainable Agriculture*, *19*(2), 65-76.

Lee, Y. J., Sung, J. K., Lee, S. B., Lim, J. E., Song, Y. S., & Lee, D. B. (2016). Yield and free sugar contents of burdock (Arctium lappa L.) depending on nitrogen levels. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, *49*(6), 677-681.

Lim, T. K. (2015). Arctium lappa. In *Edible Medicinal and Non Medicinal Plant*s: Volume 9, Modified Stems, Roots, Bulbs (p. 655-686). Springer.

Moro, T. M., & Clerici, M. T. (2021). Burdock (Arctium lappa L) roots as a source of inulin-type fructans and other bioactive compounds: Current knowledge and future perspectives for food and non-food applications. *Food Research International*, *141*, 109889.

Nakamura S. (1954). Germination of edible burdock (Arctium Lappa L.) seeds. I. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science, 23*(1), 43-47. (le résumé uniquement)

Sanders, D. C., Frick, J., & Jester, W. R. (1997). Development of a Cultural Production System for Gobo (Japanese Burdock). *HortScience*, *32*(3), 503C-503.

Splittstoesser, W. E. (1990). *Vegetable growing handbook*. Springer Science & Business Media.

Tanga, M., Lewu, F. B., Oyedeji, A. O., & Oyedeji, O. O. (2020). Yield and morphological characteristics of Burdock (Arctium lappa L.) in response to mineral fertilizer application. *Asian Journal of Agriculture and Biology, 8*(4), 511-518.

Tripathi, S., Mewar, D., Prasad, B., & Jain, V. K. (2012). Standardization of temperature regimes for better seed germination and seedling growth of Burdock (Arctium lappa). *Journal of Hill Agriculture*, *3*(2), 77-81.

15.2 Chrysanthème comestible

Cette culture offre une bonne occasion de discuter de la fiabilité des sources dans le cadre de ces notes de lecture. Le chrysanthème comestible est, en effet, cultivé, en tant que légume-feuille, essentiellement en Asie ; dès lors, il y a probablement une littérature scientifique spécifique, mais qui nous est inaccessible : pour des problèmes de langage et de disponibilité des sources. Au-delà de ces difficultés, comment peut-on, d'un point de vie scientifique, *hiérarchiser* les sources d'information ? Au premier niveau, on considérera ce qui est publié dans des revues scientifiques avec relecture anonyme par des experts. C'est très pauvre sur le sujet du chrysanthème comestible, car ces revues restent plutôt concentrées sur des cultures majeures : il s'agit donc de revues scientifiques mineures[553] et dont l'accès est difficile (souvent, seul un résumé en langue anglaise est disponible, ce qui ne permet pas de vérifier le détail des conditions d'application des résultats annoncés). Au deuxième niveau, on placera les livres/encyclopédies produits dans des maisons d'édition scientifique et écrits par des experts reconnus dans le domaine agronomique ; les ouvrages collectifs sont à préférer, car il est difficile d'être expert sur un champ très large. On y joindra les communications scientifiques résultant de congrès, qui sont des textes plus courts et moins expertisés. Au troisième niveau, on aura ensuite ce qui est appelé

[553] Il existe plusieurs systèmes pour classer l'importance des revues scientifiques, un sujet âprement discuté, car la carrière des scientifiques en dépend ! Le plus classique est l'*impact factor* (IF), et il correspond au nombre de fois où un article de la revue est cité (en moyenne).

littérature grise, c'est-à-dire des rapports techniques produits par des universités (anglo-saxonnes), des écoles d'ingénieurs agronomes (en France), des centres de recherche agronomique ou des organisations de conseil agricole. L'avantage est que les auteurs ont une formation agronomique de bon niveau et qu'ils décrivent des situations souvent plus proches des nôtres, au moins du point de vue climatique. Enfin, au quatrième niveau, on trouvera les ouvrages destinés au grand public ; on pourra distinguer selon l'expertise de l'auteur, par exemple : est-ce qu'il a, par ailleurs, produit des articles scientifiques (et on peut alors espérer qu'il garde la même rigueur) ? Tout le reste ne sera pas pris en considération. Pour se faire une idée du résultat, j'ai classé, en ordre décroissant selon ces critères, la bibliographie qui suit... Mais commençons à parler de notre sujet.

Le chrysanthème comestible (*Glebionis coronaria*, anciennement *Chrysanthemum coronarium*) est une plante annuelle de la famille des astéracées. Elle est érigée, pouvant s'élever entre 30 et 80 centimètres de hauteur selon les variétés, voire plus lors de la floraison. D'origine méditerranéenne, elle est à présent répandue dans le monde entier, où elle est parfois une mauvaise herbe invasive. Comme légume-feuille, le chrysanthème comestible est essentiellement cultivé en Asie Orientale, particulièrement au Japon ; en Europe, il reste plutôt une plante ornementale. Les feuilles et les jeunes pousses sont principalement consommées[554]. Les fleurs sont également comestibles, mais le centre a un goût un peu fort, et ce sont plutôt les pétales qui sont mangés. La plante contient des protéines, des hydrates de carbone, pas mal de fibres, de la vitamine C et du bêta-carotène ; les minéraux principaux sont le potassium, le calcium et le fer (Wijaya et al., 2020).

---

[554] Larkom (1991) permet d'obtenir un certain nombre de renseignements sur l'utilisation du chrysanthème comestible. Les variétés à grosses feuilles sont plus douces et conviennent mieux, crues, aux salades que celles à petites feuilles, plus fortes. Le goût des feuilles augmente avec la maturité de la plante et devient très fort à la floraison. On utilise les jeunes feuilles en salade avec d'autres légumes-feuilles, ou bien avec des tomates. Au Japon, on les blanchit souvent quelques secondes, avant de les plonger dans l'eau froide (pour les consommer en salade). On peut aussi cuire les feuilles ou les jeunes pousses à la vapeur, à l'eau ou à la poêle, mais très brièvement, car sinon le goût devient plus fort.

Le taux de germination du chrysanthème comestible est notoirement bas (40 % chez Jang et al., 2011). Hada et al. (2019) indiquent une température de germination minimale de 2 °C, maximale de 40 °C et optimale de 18 °C (de 5 °C à 30 °C). Chiang et Park (1994) confirment que les températures de germination sont optimales à 15 et 20 °C, mais plus encore, en version alternées à 25/15 ou 20/15 (jour/nuit). L'exposition préalable au froid et la lumière ne semble pas changer le taux de germination ; en revanche, retirer le péricarpe ou le scarifier ont un effet significatif. La graine est assez petite (PMG=2 g), Liu et al. (2020) conseillent une profondeur de semis de 0.5 à 1 cm.

C'est une plante à l'aise en climat tempéré frais, les températures supérieures à 25 °C nuisent à la qualité des feuilles. Elle est rustique (RHS=H7) et continue à pousser en hiver, de préférence sous protection (Larkom, 2008 ; Palme, 2021). On visera donc des installations de début de printemps ou de fin d'été. D'autant plus qu'il s'agit d'une plante de jours longs (Fujime et al., 1996) et que la qualité des feuilles pâtit de la floraison. Il existe une variété à petites feuilles laciniées (en lanières) proche de l'espèce sauvage, elle est de plus petite taille et peu ramifiée, et s'adapte à de nombreux climats, en particulier froids, mais elle est peu productive. Il existe également une variété à feuille large qui est plus adaptée aux climats plus chauds, et ses feuilles ont une saveur moins forte. Le type le plus répandu est en fait un type intermédiaire.

Pour ce qui est de l'implantation, on distinguera le cas d'une récolte unique de jeunes pousses, avec un semis à la volée ou en ligne relativement serré (5-10 cm sur le rang, mais en semant assez dru vu le faible taux de germination), et le cas d'une récolte répétée, où l'espacement est plus large, avec usuellement une transplantation (Palme, 2021, 3-5 graines par contenant, plantation à trois semaines). Dans le premier cas, la récolte peut avoir lieu au bout de 30-40 jours après le semis. Dans le second cas, Dorajeerao et Mokashi (2011a) retrouvent le résultat classique que des plants plus espacés (60×60) deviennent plus importants, mais au final, qu'un espacement moins large (30×30) permet une plus grande récolte globale. Dans le cas d'une récolte répétée de jeunes pousses, en étêtant la plante à 30 jours et à 45 jours après la transplantation, on augmente significativement le nombre de feuilles par plante et on recule un peu la date de floraison :

on coupe alors la jeune pousse au-dessus de deux feuilles pour multiplier la ramification. Dans le cas d'une récolte répétée de feuilles, on étête également les bourgeons, et il peut devenir nécessaire de tuteurer la plante. Wen et al. (2007) indiquent que la capacité de conservation du chrysanthème comestible est limitée et que la consommation doit être rapide.,

Pour maximiser la production de fleurs[555], Dorajeerao et Mokashi (2011b) proposent une fertilisation de 150 N / 100 P_2O_5 / 100 K_2O (kg /ha). Il n'existe pas, dans la littérature consultée, d'indications spécifiques sur l'irrigation. En termes de désherbage, Hada et al. (2021) signalent que la plante est une mauvaise herbe des céréales d'hiver et qu'elle a même développé des résistances aux herbicides : elle a donc des qualités certaines de compétition. Toutefois, Palme (2021) et Larkom (1991) considèrent le désherbage comme indispensable lorsque la plante est jeune, soit pour un semis direct, soit même pour une transplantation lorsque l'on a effectué une récolte et une coupe sévère. Le chrysanthème comestible présente peu de problèmes avec les insectes ou les maladies (Splittstoesser, 1990).

Le chrysanthème comestible est une plante à cycle assez court : deux ou trois mois. Il a une forte capacité à se ressemer spontanément. Les fleurs sont hermaphrodites et auto-pollinisées.

Il existe des cultivars disponibles en France, éventuellement décrits par la taille de leurs feuilles ou la couleur de leurs fleurs, mais le plus souvent, il s'agit de l'espèce type. En Asie, on cultive également *Chrysanthemum spatiosum* pour ses feuilles et *Chrysanthemum morifolium*[556] pour ses fleurs.

Niveau 1 : articles scientifiques, classés par impact factor (IF) décroissant.

Hada, Z., Menchari, Y., Rojano-Delgado, A. M., Torra, J., Menéndez, J., Palma-Bautista, C., ... & Souissi, T. (2021). Point mutations as main resistance mechanism together with P450-based

[555] Qui n'est, bien entendu, pas la récolte de feuilles ou de jeunes pousses, qui bénéficieraient sans doute d'un supplément d'azote ?

[556] Qu'il est possible de trouver en France.

metabolism confer broad resistance to different ALS-inhibiting herbicides in Glebionis coronaria from Tunisia. *Frontiers in Plant Science*, *12*, 626702. [IF~6.5]

Wen, Q., Ye, J., Xue, W., Huang, A., Hugura, Y., & Suzuki, K. (2007). Correlation between dielectric properties and freshness of leaf vegetables. *Journal of Food Processing and Preservation*, *31*(6), 736-750. [IF~2.7]

Dorajeerao, A. V. D., & Mokashi, A. N. (2011a). Growth analysis as influenced by planting geometry in garland chrysanthemum (Chrysanthemum coronarium L.). *Journal of Agriculture Research and Technology*, *36*(3), 397-402. [IF~1.5]

Fujime, Y., & Okuda, N. (1996). Effects of daylength and temperature on capitulum initiation and development of garland chrysanthemum (Chrysanthemum coronarium L.). *Environment Control in Biology*, *34*(1), 21-28. [IF~0.45]

Dorajeerao, A. V. D., & Mokashi, A. N. (2011b). Nutritional studies in garland chrysanthemum (Chrysanthemum coronarium L.). *Plant Archives*, *11*(1), 557-562. [IF~0.3]

Jena, S., Mohanty, C. R., & Dash, R. M. (2021). Effect of pinching on growth and flowering of annual chrysanthemum (Chrysanthemum coronarium L.). *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, *10*(2), 1042-1045. [IF~0.3]

Jang, S. W., Hur, Y. Y., Choi, H. S., Yang, E. Y., Kim, K. D., & Yeoung, Y. R. (2011). Germplasm Evaluation and Selection of Lettuces (Lactuca sativa L.), Edible Chrysanthemums (Chrysanthemum coronarium L.) and Mallows (Malva verticillata) for Organic Farmers. *Korean Journal of Organic Agriculture*, *19*(spc), 230-233. [IF~0.1]

Wijaya, E. J., Nathanael, J., Carolan, O., Adiyanto, S. A., Bun, W. B., & Sahamastuti, A. A. T. (2020). A Review of Phytochemical Properties and Therapeutic Activities of Glebionis coronaria. *Indonesian Journal of Life Sciences*, *2*(2), 44-55. [IF~?]

Chiang, M. H., & Park, K. W. (1994). *Effects of temperature, light and mechanical treatment on seed germination of Chrysanthemum coronarium L. Korean Society for Horticultural Science, 35*(6), 534-539. [Seul le résumé est disponible]

Niveau 2 : ouvrages scientifiques et communications.

Hada, Z., Jenfaoui, H., Royo-Esnal, A., Torra, J., & Souissi, T. (2019). Temperature thresholds, light requirement, and growing-degree-day model for Glebionis coronaria L. germination and development. In *24e Conférence du COLUMA: Journées internationales sur la lutte contre les mauvaises herbes, Orleans, France, 3, 4 et 5 décembre 2019*. Végéphyl–Association pour la santé des végétaux.

Rubatzky, V. E., & Yamaguchi, M. (2012). *World vegetables: principles, production, and nutritive values*. Springer Science & Business Media. [Tous deux professeurs émérites en cultures légumières à l'université de Californie]

Splittstoesser, W. E. (1990). *Vegetable growing handbook*. Springer Science & Business Media. [Professeur de physiologie des plantes en Horticulture, 300 publications scientifiques]

Niveau 3 : littérature grise.

Liu, G., Wang, Q., Wells, B. C., Li, Y., & Dinkins, D. (2020). Tong Hao—an Asian Vegetable Expanding in Florida: HS1276, 3/2016. *EDIS*, *2016*(2), 4-4. [Guide de culture de la plante fourni par l'Institute of Food and Agricultural Science de l'université de Floride]

Niveau 4 : ouvrages grand public.

Palme, W. (2021). *Un potager au cœur de l'hiver*. Tana édition. [chercheur reconnu, travaille au Horticultural College and Research Institute (Schönbrunn, Autriche)]

Larkcom, J. (1991). *Oriental vegetables: the complete guide for the garden and kitchen*. John Murray. [Auteure anglaise de livres de jardinage, avec une passion pour les légumes asiatiques]

15.3 Moutarde(s)

Les « moutardes » sont un groupe informel de plantes de la famille des brassicacées, dont les graines sont utilisées pour la fabrication du condiment du même nom. Leurs usages sont toutefois bien plus larges :

elles peuvent être consommées en légumes crus, pour les jeunes feuilles ; en légumes cuits, pour celles plus âgées, y compris parfois leurs tiges ; en épices, avec les graines entières ; en condiments, avec les graines broyées pour donner de la moutarde ; et en huile, que ce soit pour un usage alimentaire ou autre. Enfin, certaines moutardes sont employées comme fourrage ou comme engrais vert.

La moutarde blanche (*Sinapis alba*), d'origine méditerranéenne, ne nous intéressera au potager que pour ce dernier usage, et nous ne développerons pas son mode de culture. La moutarde noire (*Brassica nigra*), originaire d'Asie Centrale et du Proche-Orient, a été appelée *Sinapis nigra* par Linné, ce qui montre sa similarité à la précédente ; nous en parlerons peu, car elle est essentiellement produite pour ses graines, particulièrement piquantes, et là encore, comme engrais vert. Il faut cependant savoir que les deux prochaines sont, en fait, des hybrides de cette moutarde noire, et donc, que les informations qui les concernent peuvent lui être, en partie, répercutées[557]. La présentation qui suit sera concentrée sur la moutarde brune (*Brassica juncea*), et dans une moindre mesure, sur la moutarde d'Abyssinie (*Brassica carinata*).

Les couleurs attribuées à ces moutardes ne viennent pas des fleurs qui sont, dans tous les cas, jaunes et disposées en grappes, mais des graines.

15.3.1 Moutarde brune

La moutarde brune est une plante herbacée, érigée, annuelle ou bisannuelle. Il s'agit d'un hybride de *Brassica nigra* et *Brassica rapa*. Il existe des cultivars destinés à la production de graines (var. *sarepta*), car elle est très utilisée pour fabriquer de la moutarde (plus que la moutarde noire, à présent) et de l'huile (avec des cultivars spécifiques à composition faible en acide érucique). Mais ce sont plutôt ceux dévolus à la consommation comme légumes qui vont nous intéresser au

---

[557] Attention toutefois à la taille de la graine de la moutarde noire, particulièrement petite (PMG=0.8 g), qui demande un semis en surface, d'assurer un bon contact avec le sol par plombage et une humidité permanente.

potager. Et là, il faut prendre conscience que l'espèce se présente en Asie (on l'appelle également la moutarde indienne ou la moutarde de Chine) sous une grande diversité de formes, qui rappelle celle d'autres brassicacées. Il y a des formes à feuilles lâches, frisées (var. *crispifolia*) ou plates (var. *foliosa*), des formes pommées (var. *rugosa*), tubéreuses (var. *napiformis*), à tige (var. *tsaitsai*) ou encore de type brocoli (var. *faciliflora*). En France, on ne se procurera pas des semences correspondant à toutes ces formes, mais la diversité est quand même conséquente. On retrouve, à peu près partout, la 'Moutarde Rouge de Chine' qui, à mon avis, est décorative et savoureuse.

Les températures de germination sont de 6 °C pour la minimale, 31 °C pour l'optimale et 41 °C pour la maximale. En bonnes conditions, les vitesses de germination et de croissance sont remarquables, et autorisent des « cultures éclair ». La profondeur de semis est de l'ordre d'un centimètre (PMG=2.8 g).

On suivra, pour la moutarde brune, les stratégies d'implantation et de récolte des verdures asiatiques. Il est possible de viser (1) des micro-pousses (deux vraies feuilles), en à peine deux semaines, (2) des bébés-feuilles (feuilles de 10 cm), en trois-quatre semaines, (3) des plants semi-matures (récolte feuille à feuille ou coupe avec repousse), après quatre semaines, ou (4) des plants matures (feuille à feuille, ou coupé avec repousse), en cinq semaines. Dans les deux premiers cas, le semis direct à haute densité semble s'imposer ; dans les deux derniers, la transplantation s'avère intéressante. Cette transplantation se pratique au stade 3-4 feuilles, au bout de 3-4 semaines, avec un espacement qui peut aller de 10 cm à 30 cm.

Cette plante s'avère capable de tolérer une grande variété de températures, mais dès que les jours s'allongent et que les températures s'élèvent, la moutarde peut nous monter au nez ; le stress hydrique et la faible fertilité accélèrent également ce processus. On la préférera donc comme culture de saison fraîche, et compte tenu de sa très bonne rusticité (RHS=H6), peu surprenante vu son origine himalayenne, elle constituera une culture d'hiver des plus intéressantes.

Il lui faut une fertilisation de l'ordre de 90 N / 60 P_2O_5 / 60 K_2O (kg/ha). Si besoin est, la croissance rapide est entretenue par l'irrigation. Un désherbage est nécessaire au stade plantule ; à titre de

repère, la période critique est de 15-40 jours pour la production de graines.

La moutarde brune n'est pas sans problèmes avec les bactéries (*Erwinia carotovora*, *Xanthomonas campestris*), les champignons (alténariose des crucifères : *Alternaria brassicae)* et les virus (TuMV). Ses ravageurs (teigne des crucifères : *Plutella xylostella*) sont heureusement plutôt rares dans les saisons fraîches.

Les fleurs sont hermaphrodites. La plante est autogame, mais la pollinisation croisée par des abeilles est possible. Le fruit est une silique que certains consomment immatures.

Une fois les feuilles récoltées, il faut immédiatement les mettre humides au réfrigérateur, de préférence dans un sac plastique. Il est également possible de déraciner des plants et de les conserver, racines plongées dans l'eau. Les feuilles étant assez jolies, l'ensemble forme un bouquet dans lequel on prélève, à la demande, des « touches piquantes ».

15.3.2 Moutarde d'Abyssinie

La moutarde d'Abyssinie est également une plante herbacée, érigée, annuelle ou bisannuelle, mais elle est un hybride de *Brassica nigra* et *Brassica oleracea*. Comme la précédente, il ne s'agit pas d'une plante domestiquée récemment : on estime qu'elle était cultivée 4 000 ans avant Jules César. En Afrique, elle est essentiellement produite pour ses feuilles qui sont plutôt consommées cuites. En Occident, elle a été popularisée comme salade à mesclun, parfois sous le nom de « Texsel greens ». ('Texsel' est en fait un cultivar sélectionné au... Texas.) Pas mal de tentatives ont été faites afin d'employer son huile comme biocarburant pour l'aviation, et nous tirons une partie de nos informations en climat tempéré de cette littérature.

Les températures de germination[558] de la moutarde d'Abyssinie sont de 2.5 °C (minimale), 25 °C (optimale) et 42.5 °C (maximale). Aucune

---

[558] Tiré d'un travail universitaire dont j'ai légèrement modifié les résultats, car les modèles employés trop « symétriques » décrivaient, selon moi, assez mal ce qui se passe aux valeurs extrêmes : Persaud, Leelawattie (2020). *Thermotolerance classification of Brassica carinata genotypes using germination assay and vegetative*

vernalisation n'est nécessaire. Avec un PMG de 3.1 g, on retiendra la même profondeur de semis que pour la moutarde brune.

Il s'agit d'une espèce qui a une grande capacité d'adaptation aux conditions climatiques, même froides, explicable par son origine (les hauts plateaux africains). Mais elle est surtout étonnante, pour une brassicacée, par sa bonne tolérance à la chaleur et à la sécheresse (qui réduisent quand même la taille des feuilles et la productivité). Ceci peut provenir de son système racinaire assez développé, fait plutôt rare dans cette famille (par ailleurs non-mycorhizée). Si elle est assez neutre par rapport à la photopériode, les fortes températures et le stress hydrique hâtent sa floraison. On peut certes la retarder par des coupes successives, mais on s'occasionne moins d'ennuis en la cultivant au printemps et à l'automne.

Les modes d'implantation, de récolte et de conservation sont assez similaires à ceux de la moutarde brune, mais sa croissance est un peu plus lente. Pour la culture des feuilles, un sol fertile est préférable ; en revanche, la plante a suscité l'intérêt pour les biocarburants, car la culture pour ses graines reste possible sur des terres pauvres. La fertilisation de base est de 100 kg/ha d'azote et 30 kg/ha de phosphore, mais elle peut monter à 300 pour l'azote. Bien qu'assez compétitive, un léger désherbage limitera la perte (mesurée) de récolte. La moutarde d'Abyssinie est plutôt résistante aux maladies, mais possède quelques ravageurs assez classiques chez d'autres crucifères.

Les fleurs sont hermaphrodites, et la fécondation est largement autogame (70 %). Le fruit est une silique qui contient jusqu'à 20 graines.

Il y a des cultivars spécifiques pour produire de l'huile, qui fleurissent plus rapidement (10 semaines au lieu de 12), mais nous nous focalisons plutôt, au potager, sur ceux qui produisent des feuilles. Les semences sont peu commercialisées en France.

McCormick, J. I., Goodger, R. A., & Chynoweth, R. J. (2014). Cardinal temperatures and vernalisation requirements for a selection of

---

growth parameters. Theses and Dissertations. 4719.
https://scholarsjunction.msstate.edu

vegetables for seed production. *Agronomy New Zealand*, *44*, 71-83.

Mnzava, N.A., & Schippers, R.R. (2006) Brassica carinata In G.J.H.Grubben and O.A. Denton (Eds.), *Plant Resources of Tropical Africa 2. Vegetables* (p. 119-123). PROTA Foundation, Wageningen, Netherlands / Backhuys Publishers, Leiden, Netherlands / CTA, Wageningen, Netherlands.

Schippers, R.R., & Mnzava, N.A. (2006) Brassica juncea In G.J.H.Grubben and O.A. Denton (Eds.), *Plant Resources of Tropical Africa 2. Vegetables* (p. 123-127). PROTA Foundation, Wageningen, Netherlands / Backhuys Publishers, Leiden, Netherlands / CTA, Wageningen, Netherlands.

Seepaul, R., Kumar, S., Iboyi, J. E., Bashyal, M., Stansly, T. L., Bennett, R., ... & Wright, D. L. (2021). Brassica carinata: Biology and agronomy as a biofuel crop. *GCB Bioenergy*, *13*(4), 582-599.

Shekhawat, K., Rathore, S. S., Premi, O. P., Kandpal, B. K., & Chauhan, J. S. (2012). Advances in agronomic management of Indian mustard (Brassica juncea (L.) Czernj. Cosson): an overview. *International Journal of Agronomy*, *2012*. https://doi.org/10.1155/2012/408284

Takahama, M., Kawagishi, K., Sugawara, A., Araki, K., Munekata, S., Nicola, S., & Araki, H. (2019). Classification and screening of baby-leaf vegetables on the basis of their yield, external appearance and internal quality. *The Horticulture Journal*, *88*(3), 387-400.

Thomas, J., Kuruvilla, K. M., & Hrideek, T. K. (2012). Mustard. In K.V. Peters (Ed.), *Handbook of herbs and spices* (p. 388-398). Woodhead Publishing.

15.4 Navet et Cie

Cette partie est destinée à éclairer la culture d'un certain nombre de « verdures asiatiques » (komatsuna, mizuna, mibuna, pak-choï, pe-tsaï, et tat-soï) sur lesquelles les informations sont encore lacunaires, du moins hors de l'Asie Orientale. Toutes ces cultures constituent, en fait, une seule et même espèce : *Brassica rapa*... le navet ! Aussi, nous allons, dans un premier temps, faire un peu de taxonomie, pour nous

y retrouver dans cette diversité apparente. Nous développerons, dans un deuxième temps, les éléments de culture du navet, légume un peu sous-estimé à mon sens, éléments qui sont, eux, bien connus en Europe, et nous servirons de référence. Dans un troisième temps, nous donnerons de bonnes raisons de s'intéresser aux verdures asiatiques, en faisant un long détour pour exposer du même coup la différence entre les publications scientifiques et une information plus destinée au grand public. Enfin, dans un quatrième temps, nous préciserons, pour chacune de ces variétés asiatiques, quelques particularités.

15.4.1 Un peu de taxonomie

Les brassicacées sont une très grande famille botanique, de l'ordre de 4 000 espèces, ayant donné lieu à de nombreuses domestications ; en particulier, les genres *Raphanus* (celui du radis, dont nous parlerons ensuite), *Barbarae*, *Lepidium* et *Nasturtium* (les cressons), *Crambe* (le presque inconnu crambe maritime), voire des plantes condimentaires comme *Eutrema japonicum* (le wasabi) et *Armoracia rusticana* (le raifort). Cependant, le genre le plus important pour le potager est probablement *Brassica*. Ce dernier est un univers en lui-même, dont on a un aperçu visuel en Figure 128, qui s'appelle le triangle de U[559].

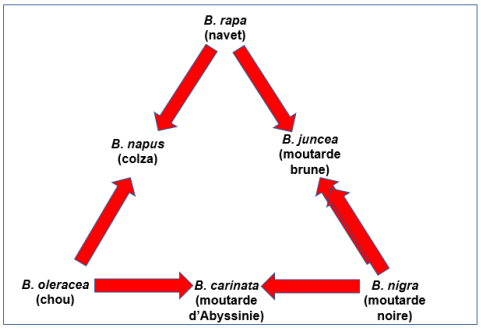


Figure 128 : Triangle de U décrivant le genre Brassica (B.).

Dans ce triangle, on voit aux extrémités les trois espèces primitives : les choux avec *Brassica oleracea*, un type de moutarde dite noire avec *Brassica nigra* et ce qui nous intéresse ici, les navets, avec *Brassica*

[559] C'est le nom japonisé d'un chercheur coréen.

rapa. De plus, ces espèces se sont hybridées et ont donné : *Brassica napus* (rutabaga et colza), *Brassica carinata* (un deuxième type de moutarde dite d'Abyssinie, parfois mieux connue sous le nom anglais de Texsel greens) et *Brassica juncea* (un troisième type de moutarde, dite brune ou indienne, voire chinoise).

On connaît en Europe la grande diversité des choux, mais beaucoup moins celle des navets. Pourtant, dans ce groupe, sont distinguées un bon nombre de variétés botaniques. *Brassica rapa* var. *rapa* est le navet classique. Les feuilles de ce navet peuvent être consommées, mais une variété botanique est consacrée à cet objectif, et non pas à obtenir une racine fortement tubérisée : le navet-feuille (*Brassica rapa* var. *septicens*). Provenant d'Italie, on connaît le navet-brocoli (*Brassica rapa* var. *cima di rapa*), dont on consomme la hampe florale.

Passons maintenant aux variétés asiatiques[560]. On distingue trois variétés et demie de « choux chinois » : *Brassica rapa* var. *pekinensis* que nous appellerons pe-tsaï, *Brassica rapa* var. *chinensis* que nous appellerons pak-choï, avec une variante le choy-sum (*Brassica rapa* var. *parachinensis*), et *Brassica rapa* var. *narinosa* que nous appellerons tat-soï. Du côté des « choux japonais », on a le mizuna et le mibuna (*Brassica rapa* var. *nipposinica*) et le komatsuna (*Brassica rapa* var. *perviridis*).

Pour être complet, il faut signaler la navette (*Brassica rapa* var. *oleifera* ou var. *sarson*), destinée à produire de l'huile, que nous ne décrirons pas ici.

Évidemment, il s'agit d'une « simplification », car en Asie, de nombreux cultivars existent, résultant de croisements entre ces différentes variétés, croisements pas très difficiles à réaliser... puisqu'il s'agit de la même espèce.

15.4.2 Navet

Le navet (*Brassica rapa* var. *rapa*) a longtemps constitué une nourriture de base, avant d'être remplacé par la pomme de terre. Il a

---

[560] Dont les noms vernaculaires diffèrent, bien entendu, d'un pays à l'autre, j'ai dû faire un choix. De plus, le genre de ces noms étant évidemment arbitraire, j'ai choisi, pour tous, d'employer le masculin.

été dénommé « viande du pauvre » ; ce mépris perdure et il joue, de nos jours, un rôle très secondaire dans la cuisine française. Ce qu'on consomme dans le navet est surtout la base de la tige (hypocotyle) tubérisée, mais les feuilles sont également comestibles, et particulièrement agréables en jeunes pousses. La réputation du navet est heureusement bien meilleure au Japon, d'où proviennent dorénavant de nombreux cultivars intéressants.

Le navet est une plante herbacée, bisannuelle, demandant une vernalisation qualitative[561]. La conséquence est aussi qu'il peut monter à graines prématurément avec un froid de 7 °C pendant 2-4 semaines, et ce, dès l'émergence. (Il n'y a pas de phase juvénile pour le navet ; Wiebe, 1990.) Ce sera une des difficultés de sa culture, en fin d'hiver et début de printemps.

Les températures de germination sont de 4 °C pour la minimale, 29 °C pour l'optimale et 41 °C pour la maximale (Andreucci et al., 2016). Les graines n'ont pas de dormance et la lumière n'a aucun effet sur la germination. Les temps d'émergence donnés dans Maynard et Hochmuth (2006) en font le plus rapide de tous les légumes classiques. Le temps pour atteindre la maturité est lui aussi très court, allant, selon les cultivars, de 35 à 50 jours, en conditions optimales ; mais jusqu'à 110 jours en hiver. La cueillette des feuilles en jeunes pousses étant encore plus rapide, c'est donc une culture intercalaire intéressante.

Le navet est une plante de saison fraîche, avec une température de croissance optimale de 15-18 °C, une minimale à 5 °C et une maximale à 25 °C. Il est rustique (RHS=H3). Même si Bierhuizen et Wagenvoort (1974) observent une température de base plus basse pour la germination (1.4 °C), les calculs qu'on peut mener avec leur technique de somme des températures (HS=97) montrent que tenter un semis très précoce en fin d'hiver, sans protection, est peu intéressant, car le temps d'émergence est alors très long[562]. C'est la deuxième difficulté des cultures de début d'année. En revanche, pour des semis en août-

---

[561] Il est nécessaire que la plante subisse de basses températures pour induire la floraison.

[562] Respectivement 88, 27, 16 et 11 jours à 2.5 °C, 5 °C, 7.5 °C et 10 °C.

septembre, le démarrage est fulgurant, vu la température du sol, avec peu de montaison à craindre.

La fertilisation donnée par Maynard et Hochmuth (2006, Table 4.37) est de 55 N / 55-125 P_2O_5 / 55-170 K_2O (kg/ha), ce qui, dans l'absolu, reste assez faible, mais il faut tenir compte du cycle très court de la plante. Il convient cependant de s'assurer que ces quantités, même modestes, soient *immédiatement* disponibles.

Le point le plus délicat concernant le navet est, sans aucun doute, l'irrigation. Tous les auteurs s'accordent à dire qu'il ne doit pas manquer d'eau[563]. Rowe et Neilsen (2010), dans une étude du navet fourrager, observent que l'effet de l'irrigation est additif et indépendant chez le navet, c'est-à-dire qu'un déficit sur une certaine période n'est jamais rattrapé, même si la reprise de l'irrigation a une efficacité (limitée). On cherchera donc une régularité de l'approvisionnement en eau du navet, et on soignera la période de tubérisation. (Je chante personnellement « il était un petit navet qui n'avait ja-ja-jamais... » pour toujours m'en souvenir.) Il est cependant inutile de noyer les navets, au risque de lixivier trop d'éléments nutritifs, de gâcher l'eau, et de saturer le sol, ce que les plantes n'apprécient guère. En définitive, le plus simple est encore de l'installer en période humide...

> Du côté de chez Stéphane : Ma façon de voir l'irrigation avec les navets est la suivante. Je vais essayer de simplifier la proposition très intéressante de Simonne et al. (1993). L'idée est celle du bilan hydrique classique : il s'agit de conserver dans le sol suffisamment d'eau pour les besoins de la plante malgré l'évapotranspiration. Pour simplifier une longue suite de calculs et d'approximations[564], j'arrose

---

[563] Pour le formuler de trois façons différentes, mais qui se recoupent sur le haut niveau nécessaire : Toxopeus et Baas (2004) indiquent que l'on doit rester dans la zone de 65-85 % de la capacité au champ, Zhang et al. (2008) conseillent de ne pas descendre au-dessous de 50 % de la réserve utile. Smittle et al. (1992) donnent comme limite de potentiel matriciel -25×10^3 Pa.

[564] L'eau utilisable un jour j par la plante est $A(j)=p\times Zr(j)\times TAW$ (mm). On utilise classiquement pour le navet (Allen, 1998) une tolérance au stress hydrique de p=0.5. Zr(j) la profondeur de racine dépend de l'âge de la plante, et Simonne et al. (1993) suggèrent $12.7\times(j-3)$ (parce qu'à partir du 3e jour, il y a émergence, et la

quotidiennement les cinq premiers jours (2 L/m^2), puis tous les deux jours (3 L/m^2) jusqu'au onzième jour, et ensuite, je passe à deux arrosages par semaine (6 L/m^2) jusqu'à la récolte. Bien entendu, on peut lever le pied en cas de pluie ou si l'ensoleillement est faible ; ou au contraire, en fin d'été si la chaleur est forte, on peut augmenter un peu.

Le navet est essentiellement semé directement, c'est une graine d'assez petite taille (PMG=2-4 g), et on veillera, par conséquent, à lui offrir un lit de semence affiné, mais ferme, et une faible profondeur de semis, de l'ordre de 0.5-1 cm (et non pas à la surface du sol, selon Salmon & Dumbleton, 2006). Les espacements classiques de plantation sont de 5–15×30–90 (cm), et pour les jeunes pousses, de 2.5–10×15–30. On visera donc une semence tous les 5 cm, en évitant de semer trop dru, et on pourra éclaircir à 10 cm (en utilisant ce qui est retiré comme micro-pousse !). Malgré sa vitesse de croissance, le navet peut subir la concurrence de mauvaises herbes. La période critique pour le désherbage est de 15-20 jours après le semis (Chacko et al., 2021). On

---

racine pousse alors de 12.7 mm par jour). La valeur de la réserve utile TAW (en mm eau/mm de sol) dépend du type de sol, nous envisagerons ici un sol « moyen » avec TAW=0.15 mm.

Or, chaque jour, ce qui est utilisé est d(j)=ET(j)-R(j)-I(j) (mm) ou R(j) est la quantité de pluie tombée ce jour et I(j) la quantité d'irrigation apportée. ET(j) est l'évapotranspiration ; pour cette dernière, on emploie la technique suivante (Allen, 1998) ET(j)=Kc(j) ×ET0(j). Kc(j) est le coefficient de culture qui dépend de l'espèce et de son stade de maturité au jour j. Je vais employer une approximation linéaire entre un Kc(ini)=0.5 et un KC(fin)~1 (alors que Simmone et al. (1993) utilisent une approximation quadratique, mais basée sur une évaporation de référence en bac dont je ne dispose pas) d'où Kc(j)=0.5+j×0.5/30 que l'on plafonnera à 1 au bout de 30 jours.

La technique consisterait à suivre les ETP(j) et R(j) au jour le jour, et d'irriguer lorsque le cumul des d(i) dépasse A(i). Je propose de simplifier considérablement les choses afin de trouver un ordre de grandeur de l'irrigation nécessaire. Sur la période qui nous intéresse (le printemps ou l'automne), je vais proposer un ET0(j)=3 mm moyen, et donc constant, et qu'il ne pleut pas (R(i)=0). L'idée est de proposer un agenda d'arrosage I(i) assez simple et qui permette que le cumul des d(i) ne dépasse jamais A(i). La proposition dans l'encadré est une des solutions possibles.

peut aussi, pour la fin d'hiver et le début du printemps, réaliser des plants à l'intérieur, avec trois ou quatre graines par contenant 4×4 (cm), pour gagner du temps. On plante très rapidement, au stade une feuille (15 jours plus tard).

Les problèmes rencontrés par le navet sont l'altise, la mouche du chou et les limaces, selon les saisons. Les maladies classiques sont la fonte des semis, la hernia du chou et le mildiou. Pour ces maladies, les rotations et des espacements raisonnables sont les solutions préventives.

Après sa récolte, le navet se stocke quelques mois à 0 °C avec une bonne humidité, et ses feuilles se stockent environ deux semaines.

Il y a des cultivars adaptés aux deux périodes de production (voire à un forçage, mais il vaut mieux alors disposer d'une serre). Un cultivar classique de printemps est 'de Milan à Forcer'. À cette période, le principal facteur limitant est la température. Il est donc judicieux, primo, de chauffer le sol (par une bâche en plastique transparent par exemple ou un tunnel mis en place quelques jours avant le semis), secundo, d'utiliser un petit engrais organique starter (sang séché, guano...), car la vie biologique du sol est encore léthargique en début d'année et peut difficilement fournir l'azote, en particulier, tertio, éventuellement, de transplanter pour assurer un bon démarrage au chaud, et quarto, de protéger les cultures avec un voile de forçage.

Un cultivar typique d'automne est 'Jaune Boule d'Or'. À cette période, les soins indispensables sont, au début (août), de bien assurer l'irrigation, et souvent d'ombrer les plantules, voire de pailler dès qu'elles ont une taille suffisante ; mais aussi de poser un filet anti-insectes.

Cultivar de printemps ou cultivar d'automne, un facteur pour minimiser l'échec est de réaliser des successions de semis tous les 15 jours. Certains cultivars, comme 'de Croissy', sont utilisables sur les deux périodes de production. Il existe également des cultivars dans les deux groupes précédents, à maturité rapide ou plus lente, générant des tubercules plus ou moins imposants. Ce tubercule peut être varié en forme (ronde, cylindrique ou aplatie) et en couleur, de peau comme de chair.

Chaque région de production de navets a eu son propre cultivar, ce qui explique qu'ils portent souvent des noms de lieux, et étaient, au

début du vingtième siècle, assez nombreux. Comme l'indiquent Pitrat et Foury (2003), à la création du catalogue officiel des variétés (1956), il y avait 32 cultivars, puis il y a eu, par la suite, une perte de diversité, car le navet était peu à la mode, et corrélativement, on n'a guère vu de créations... puisqu'on se retrouve en 1999 avec 23 variétés, dont seulement 5 créations. En revanche, une récente consultation du catalogue (7 décembre 2022) montre un retour à 33 cultivars, ces dernières années ayant vu plus de créativité, sous la forme quasi-systématique d'hybrides F1. Sans parler de l'arrivée des hybrides japonais, d'un merveilleux blanc de neige du mont Fuji. On peut aussi signaler l'existence de cultivars adaptés à la culture des feuilles ('Namenia', 'Seven Top').

Le navet est allogame. Son fruit est une silique qui compte de 15 à 20 graines.

Pour finir ce long exposé, quelques mots sur ce que nous apporte l'ethnobotanique (Vogl-Lukasser, 2007) concernant le navet. Cette approche, incluant des sciences sociales, étudie les connaissances empiriques accumulées par des générations de fermiers, en l'espèce sur la « culture du navet » au Tyrol. Ce type d'étude permet, premièrement, de connaître des itinéraires techniques[565] qui fonctionnent bien, à la suite d'essais et d'erreurs innombrables (à l'échelle d'une vie de jardinier), et pouvant être fort utiles dans une optique de jardinage low-tech ; deuxièmement, de tenter des conservations de cultivars originaux ; et troisièmement, de tirer de l'oubli des méthodes culinaires, comme le navet fermenté, un *pickle* emblématique de cette région.

15.4.3 Quelques bonnes raisons de s'intéresser aux verdures asiatiques

Le potentiel des verdures asiatiques est très important en Europe. Il reste toutefois à sélectionner de bons cultivars, optimiser les

[565] On y retrouve notre insistance sur l'importance d'une bonne date de semis, de l'humidité du sol, de ne pas semer trop dru, de désherber, ainsi que le conseil de ne pas laver les navets pour les mieux conserver, en tout cas, pas avant de passer à une éventuelle transformation.

techniques de production dans nos contextes pédoclimatiques, et aussi savoir comment les consommer (Hong & Gruda, 2020). Les verdures asiatiques s'insèrent bien dans de nouvelles tendances culinaires, comme celles des graines germées, des micro-pousses, des mescluns avec de nouvelles couleurs et formes, et des bébés-légumes. Il reste beaucoup à découvrir... et probablement aussi à inventer (comme Ssachoo, un hybride de chou et de chou chinois).

Je vais profiter de cette partie d'exploration de leur potentiel, pour expliquer, en même temps, quel est l'intérêt de consulter des articles scientifiques, parallèlement à la lecture d'ouvrages plus grand public sur le jardinage : l'exemple décortiqué permettra, en outre, de définir des stratégies de culture pour les verdures asiatiques.

Borrelli et al. (2013) cherchent à savoir dans quelle mesure, il est possible de produire - et non pas de seulement récolter - des verdures en hiver, avec pour seule aide, un équipement simple : de grands tunnels non chauffés[566]. Il s'agit de tester les classiques épinards et laitues, mais aussi les verdures asiatiques objets de cette section.

Le premier indice rassurant est que l'article est publié dans une grande revue scientifique *Hortscience*, ce qui signifie qu'il a été relu, amélioré puis considéré comme recevable, par au moins deux chercheurs (en science agronomique), et que les quatre auteurs sont, eux-mêmes, membres de départements soit d'horticulture, soit des cultures et science du sol, de l'université de l'État de Washington. Ce sont des personnes possédant généralement des doctorats, ce qui signifie huit ans d'études, dans des disciplines reliées : biologie végétale, sciences du sol, horticulture...

L'introduction de l'article nous apprend que d'autres recherches ont ainsi montré la résistance aux basses températures des laitues (-2 °C) et des épinards (-9 °C), et que les verdures asiatiques semblent également de bonnes candidates, même si on manque d'informations précises à ce sujet. Au moins, on sait qu'on ne sait pas[567]... Il s'ensuit une partie présentant les conditions de culture, avec force détails, en

---

[566] Mais cela s'applique aussi aux petits tunnels, plus accessibles aux jardiniers amateurs....

[567] Theurl et al. (2017) indiquent que des températures de -14 °C sont envisageables pour ces verdures !

particulier les deux sites qui sont, respectivement, à une latitude de 45.6° (altitude 50 m) et 46.7° (altitude 780 m). On en déduit, pour ce qui est de l'ensoleillement, que nous sommes dans la gamme de Lyon ou Limoges, donc que cela nous concerne directement. Ce sont deux villes qui sont, de début novembre à fin janvier, en deçà de la mythique « barre des dix heures » de soleil par jour... Une bonne occasion de tester, au passage, cette hypothèse ! Les températures extérieures moyennes de décembre à février des deux sites sont respectivement de 5.7 °C (climat marin) et 0.8 °C (climat continental froid), on imagine, là encore, les équivalents en France.

Ce qui va différencier fondamentalement un article scientifique d'un écrit grand public, outre cette précision de description[568], c'est ce qu'on appelle le dispositif expérimental. Vont être comparés ici 20 cultivars (de verdures asiatiques, d'épinards et de laitues), sur les deux sites, sur deux années, et avec, à chaque fois, trois dates à quinze jours d'intervalle de semis. Cela va permettre de voir quels résultats vont rester stables dans des environnements changeants et quels résultats vont être plus spécifiques. De plus, pour éviter ce qu'on appelle des confusions (ici, la terre est plus riche ou plus hydromorphe, ici, on est plus proche du bord de la parcelle, donc plus ensoleillé), on utilise un plan randomisé en blocs complets avec quatre répétitions : c'est-à-dire que chaque culture va être, à chaque fois, reproduite quatre fois (sur des parcelles de 15 m^2, ce qui n'est pas rien...) ; le terme randomisé indique que les parcelles sont tirées au hasard pour recevoir une culture, annulant les confusions potentielles ; le terme blocs complets est une disposition spatiale pour augmenter la précision de comparaisons (lire un bon livre sur les plans d'expérience pour en savoir plus). Enfin, les conditions de culture sont standardisées : tout est semé, puis transplanté aux mêmes dates, avec les mêmes espacements (40 plants/m^2) et les mêmes opérations de préparation de sol, de fertilisation, d'arrosage, de couverture thermique, etc.

---

[568] Je ne m'étends pas ici sur les descriptions détaillées, également données, sur le sol, la fertilisation, l'irrigation, pouvant nous servir pour construire un itinéraire technique...

Les résultats sont précisément quantifiés (production en grammes, durée de culture en jours...). En l'espèce, les meilleurs résultats sont obtenus pour les verdures asiatiques, puis les épinards, et enfin, les laitues (et les auteurs suggèrent que les variétés de laitue doivent être bien choisies). Il faut, en gros, 6 semaines pour produire les plants, et ensuite 10-11 semaines après plantation au champ ; sachant que les verdures asiatiques sont aussi les plus rapides et qu'il est suggéré de séparer les cultures (donc pas d'associations), pour faciliter les opérations de récolte, en particulier.

La température est également suivie, on apprend qu'il y a eu des températures inférieures à -5 °C *sous les tunnels*, et que les plantes gèlent alors, mais pour citer les auteurs : « after temperatures increased above freezing, the plants continued to grow with minimal apparent leaf damage ». Les tunnels permettent de gagner 1.9 °C en moyenne, et s'ils n'empêchent donc pas de geler, en revanche ceci suffit pour passer plus régulièrement la barre du zéro de végétation, qui est autour de 4 °C pour tous ces légumes-feuilles, et donc leur permettre de pousser. Plus lentement, certes. Environ trois fois plus lentement, puisqu'il faut de l'ordre de 115 jours pour obtenir une récolte, par rapport à des conditions optimales où il faut 35-40 jours (Grahn et al., 2015).

Reste effectivement que le facteur limitant est bien la lumière (et la présence de tunnels en fait perdre 30 %), mais la conclusion est que ces légumes poussent quand même, et donc constituent une exception bienvenue à la règle de la « barre des dix heures ». Les auteurs évoquent également : primo, la possibilité de doubler les couvertures pour sécuriser la température, mais probablement au risque de perdre encore de la lumière ; secundo, les nécessités d'aération et les problèmes possibles de surchauffe ; par conséquent, on sent que la gestion d'un tunnel... c'est quand même un peu plus compliqué que de le poser.

Ce qui nous intéresse, pour l'heure, c'est bien que les cultivars les plus performants pour cette production d'hiver soient ceux du pak-choï, du tat-soï, du mizuna et du komatsuna, et qu'ils permettent, en

semant en octobre et en novembre, d'avoir des légumes-feuilles frais en janvier, février et mars... moyennant un petit équipement[569].

Maintenant, produire en hiver est se placer dans une condition particulièrement extrême, et les périodes les plus classiques pour les verdures asiatiques sont plutôt le printemps et surtout la fin de l'été et l'automne. Nous y reviendrons, mais le printemps pose un problème particulier aux verdures asiatiques : celui de la montaison prématurée. Pour le contourner, il est possible de récolter des plantes immatures, afin de les consommer en mesclun.

Takahama et al. (2019) décrivent, à nouveau en serre non chauffée, des semis la dernière semaine de mars pour une récolte de feuilles de 8 cm en 25 jours (mais nous sommes à la latitude 41°5 avec une moyenne de 11 °C à l'intérieur, soit autour de 9 °C à l'extérieur), donc on misera sur un bon mois pour ne pas perdre de l'espace juste avant les plantations d'été. Les densités sont impressionnantes, de 1 000 semences au m^2 (1 cm × 10 cm) et complètement différentes de celles convenant à l'obtention de plantes matures. L'avantage de vitesse et de production de ces brassicacées asiatiques, comme le mizuna, est à nouveau net sur les astéracées (chicorée et laitue) et un peu moins sur les amaranthacées (épinard et feuille de betterave).

Grahn et al. (2015), toujours pour une production de mesclun, mais en climat plus froid, comparent des semis (à densité très élevée, là encore) de printemps (avril à juin, 13.5 °C de moyenne) et d'automne (septembre à novembre, 11 °C de moyenne), mais cette fois sans couverture thermique. Leurs conclusions sont complémentaires, ils soulignent encore les performances du pak-choï, du komatsuna et du bekana[570]. Cependant, ils observent de fortes variabilités de performances entre cultivars, saisons, sites et dates de semis, ce qui les conduit à d'utiles observations. Déjà, il n'est pas certain que les itinéraires techniques et les cultivars usuels pour obtenir des plantes matures soient les mêmes que pour le mesclun. Il faut, dès lors, a minima, semer simultanément un bon nombre de cultivars pour assurer

---

[569] Petit bémol quand même, la production des plants, elle, est faite en serre en octobre-novembre, il n'est pas certain que le délai de six semaines soit tenu...

[570] Cultivar de l'espèce *Brassica rapa* également...

une récolte en moyenne satisfaisante. Globalement, les récoltes de printemps sont plus importantes, plus rapides, mais plus encombrées par les mauvaises herbes, ce qui est dû à une température plus élevée, mais surtout au fait que cette température est en phase ascendante, ainsi que la durée du jour (on est vers 48° de latitude), alors que c'est le contraire en automne. Ils indiquent que c'est l'enherbement qui est à surveiller au printemps, et la température à l'automne (donc des dispositifs spécifiques). La dernière information intéressante est la possibilité, en coupant à trois centimètres les plants, d'effectuer deux nouvelles récoltes.

15.4.4 Verdures asiatiques

Les variétés asiatiques de *Brassica rapa* ont donc beaucoup en commun, que ce soit entre elles ou avec le classique navet. Le mode de culture de ce dernier a été précédemment décrit et peut être largement repris. Les verdures asiatiques sont des plantes bisannuelles, dont un problème majeur (sauf en ce qui concerne le choy-sum) est la montaison prématurée.

Figure 129 : plantules de diverses verdures asiatiques.

Nous allons, dans un premier temps, décrire chacune de ces variétés botaniques, déjà sur le plan morphologique, ce que résume bien la Figure 129 ; mais aussi, pour le pak-choï et le pe-tsaï, aller plus dans le détail. Dans un second temps, nous soulignerons les degrés divers de rusticité, de risques de vernalisation et de tolérance aux hautes températures, et de probabilité de montaison. Nous donnerons des

conseils d'espacement pour conduire les plantes à maturité, et enfin, les possibilités de consommation à divers stades.

Pak-choï

Le pak-choï (*Brassica rapa* var. *chinensis*) est le « chou chinois du sud » et sans doute la variété cultivée la plus ancienne du groupe des verdures asiatiques. C'est une plante érigée, de 15 à 30 cm, qui ressemble un peu à la bette à cardes (*Beta vulgaris* var. *crispa*), avec une rosette de feuilles possédant de larges pétioles. Plus la plante est jeune, et plus elle est tendre à consommer crue en salade, sinon elle peut être cuite de nombreuses façons, mais toujours assez brièvement.

Les températures de germination selon McCormick et al. (*op. cit.*) sont de 3 °C (minimale), 29 °C (optimale) et 45 °C (maximale). La profondeur de semis est de l'ordre de 0.5-1 cm (PMG=3.2 g). Le pak-choï se démarre très bien en contenant et peut être installé, au bout de 3-4 semaines, à un espacement de 25 cm.

C'est une plante de climat frais, avec une température de croissance optimale vers 18-20 °C. Elle supporte au moins des gels jusqu'à -3 °C (RHS= H5). Au printemps et à l'automne, une exposition ensoleillée sera visée. Les installations de printemps font courir le risque de montaison prématurée. Il vaut mieux, dans ce cas, attendre les dernières gelées pour semer directement ou transplanter.

Comme les autres verdures asiatiques, il est possible de récolter le pak-choï en micro-pousses (deux vraies feuilles), en bébés-feuilles (feuilles de 10 cm), semi-mature[571] (feuille à feuille ou coupé à 3 cm pour une repousse) ou mature (feuille à feuille ou coupé à 3 cm). Une des particularités de la récolte du pak-choï est qu'il est parfois récolté entier en coupant au ras du sol lorsqu'il possède une demi-douzaine de feuilles de 10 centimètres : on parle de *bébé pak-choï*. En conditions optimales, la vitesse de croissance est phénoménale, on peut récolter les bébés pak-choï au bout de cinq semaines après le semis et dix semaines pour une plante mature ; cela peut prendre deux fois plus de temps, s'il fait plus frais. Le pak-choï peut être conservé une dizaine de jours au réfrigérateur ou séché pour une consommation d'hiver.

---

[571] Pour le pak-choï, la différence entre les stades bébés-feuilles et semi-mature est subtile...

Maseko et al. (2017) permettent de préciser d'autres éléments de la culture du pak-choï. Pour éviter le stress hydrique, il vaut mieux irriguer assez souvent (trois fois par semaine, plutôt qu'une seule). Les recommandations pour la fertilisation azotée sont assez variées dans la littérature, de 50 à 200 N (kg/ha). On visera 120 N (kg/ha), une proposition intermédiaire de Yoshizawa[572] et al. (1981). van Averbeke et al. (2007b) proposent d'y adjoindre 40 P (kg/ha) et 80 K (kg/ha). Le désherbage doit être mené entre la deuxième et la septième semaine après le semis, en deux ou trois fois (Gupta et al., 2017).

Les ravageurs classiques sont les altises, la mouche de la racine du chou (*Delia radicum*), le puceron cendré du chou (*Brevicoryne brassicae*) et les gastéropodes. Diverses maladies sont possibles, comme le mildiou des choux (*Hyaloperonospora brassicae*).

Il existe des variétés de pak-choï à pétiole blanc, très présentes en France, et d'autres à pétiole vert clair, ce dernier étant généralement préféré par les immigrés asiatiques. Le limbe des feuilles passe, selon les cultivars, par différentes nuances de vert à pourpre. On trouve également des cultivars nains, d'autres de culture rapide (40 jours) ou lente (80 jours). Les variétés à semences reproductibles côtoient les hybrides F1.

Tat-soï

Le tat-soï (*Brassica rapa* var. *narinosa*) ressemble au pak-choï avec des feuilles vert foncé, des pétioles plus petits et un port prostré. Il présente une excellente résistance au froid et est considéré meilleur après quelques petites gelées.

Choy-sum

Le choy-sum (*Brassica rapa* var. *parachinensis*) ressemble également au pak-choï. Il peut être cultivé rapidement (40 jours) et à de plus fortes densités, car la plante est moins importante. L'objectif est de

---

[572] Que malheureusement, je n'arrive pas à me procurer : Yoshizawa, T., Hua Ma, C., & Roan, Y.C. (1981). Management of summer Chinese cabbage in Taiwan. In N.S. Talker and T.D. Griggs (Eds.), *Proc. 1st Int. Symp. on Chinese Cabbage*. 31 March-5 April 1980, Tsukuba. Asian Vegetable Research and Development Center Shanhua, Taiwan. 55-60.

consommer la hampe florale, dès lors la montaison facile en jours longs est recherchée ! Il ne se conserve que très peu de temps.

Pe-tsaï

Le pe-tsaï (*Brassica rapa* var. *pekinensis*) est le « chou chinois du nord ». Haut de 20 à 60 centimètres, il ressemble un peu à la chicorée 'Pain de Sucre'. Il n'a pas de pétiole, mais des nervures blanches très larges. C'est un chou pommé[573], en forme de cylindre, soit trapu, soit allongé. Il peut être consommé en crudité, coupé en lanières comme dans le coleslaw, ou bien cuit, mais fort peu de temps. Il existe aussi la possibilité d'une lactofermentation, comme dans le fameux *kimchi* coréen.

Les températures de germination du pe-tsaï sont de 5 °C (minimale), 35 °C (optimale) et 43 °C (maximale), selon McCormick et al. (*op. cit.*). Il vaut toutefois mieux passer la barre des 20 °C pour éviter la vernalisation. En conditions optimales, la germination est extrêmement rapide.

L'article de Balvoll (2015) permet de faire un point sur les risques de montaison du pe-tsaï. Dans la première phase, celle de la stimulation, il faut du froid, comme pour la plupart des plantes bisannuelles. Cependant, pour cette espèce, la température maximale de vernalisation est très haute (21-24 °C !) et il n'y a pas de phase juvénile où elle pourrait être « épargnée ». Cette tendance baisse heureusement avec la montée en température. Il existe des cultivars plus résistants (à partir de 14 °C). Dix à quinze jours à 5 °C sont suffisants pour stimuler la plupart des cultivars. Il semble également que la dévernalisation, par l'apparition de hautes températures, soit plus faible que pour d'autres bisannuelles. Il y a moins de risque de montaison si la longueur du jour est de 10 heures que lorsqu'elle est plus longue. La deuxième phase, dite de différenciation, jusqu'à l'apparition du primordium de l'inflorescence, dure de 10 à 30 jours et est plus courte si la période froide a été prolongée. De hautes températures dans cette deuxième phase l'accélèrent. La troisième phase est celle de l'élongation de la hampe florale. Les fortes

[573] Avec quelques exceptions, aux feuilles plus « lâches ».

températures et les jours longs accélèrent ce processus. Une déficience en azote au moment de la formation de la « pomme » augmente également le risque de montaison. En gros, la clé du succès est de ne pas avoir de froid pendant la production des plants (14-21 jours) et pas de fortes conditions de vernalisation dans les 7-14 jours après la transplantation... Créons donc notre planification en conséquence.

La transplantation (mais pas à racine nue) fonctionne très bien, en utilisant des contenants assez grands (godet 7×7), avec un espacement de 30-40 cm pour récolter des plantes matures. En cas de semis direct, on contrôlera les mauvaises herbes pendant cinq semaines.

La température optimale pour la croissance est de 18 °C à 22 °C, mais pour pommer elle passe à 14-16 °C, et pour un développement complet à 10-12 °C. L'intensité de la lumière joue également un rôle dans la pommaison. Le pe-tsaï ne pousse plus en deçà de 5 °C, mais est relativement rustique (RHS=H5), bien que globalement plus sensible aux températures que le pak-choï. En fait, la fenêtre de tir est assez réduite[574] : entre la nécessité d'une température supérieure à 20 °C, pour éviter la vernalisation, dans les premières semaines, et la nécessité d'éviter de trop fortes températures à la formation de la pomme, mais de ne pas tomber non plus en jours courts ou en températures trop basses à ce moment. Le semis se déroule donc généralement entre juillet et août. Il est possible de planter plus tardivement, mais on récoltera alors la plante semi-mature sans qu'elle ait pommé (et ce n'est pas comme cela qu'elle est la meilleure...). Il est également envisageable d'utiliser le pe-tsaï en bébés-feuilles, même au printemps, car sa croissance initiale est remarquable.

Par rapport aux choux pommés classiques, la croissance du pe-tsaï est très rapide. Il atteint quatre feuilles au bout de 15 à 20 jours, la croissance principale se produisant 40-45 jours après le semis et la formation de la pomme ayant lieu entre 40 et 50 jours. Au final, entre 65 et 100 jours, la plante possède de 50 à 60 feuilles. Le pe-tsaï peut se conserver longuement au réfrigérateur.

Le besoin de fertilisation du pe-tsaï se monte, d'après Maynard et Hochmuth (2006, Table 4.35), à 170 N / 90 P_2O_5 / 90 K_2O (kg/ha). Il

[574] Ce qui suggère d'essayer une succession de semis pour diminuer les risques.

n'est pas bon d'exagérer l'azote, car la concentration en nitrates de la plante suit. Comme pour le navet, l'irrigation est un point sensible, car le système racinaire du pe-tsaï est peu profond et sa tolérance au stress hydrique limitée ; ajouter à cela que les brassicacées ne sont pas mycorhizées... Certains professionnels irriguent deux ou trois fois par jour, par petites quantités, pour éviter aussi les maladies. En tant que jardinier amateur, on se contentera d'irriguer beaucoup et très régulièrement en début de culture, où la chaleur est généralement très présente (en juillet-août, 120 % EVT par journée), pas mal au milieu, et à nouveau, beaucoup au moment de la croissance forte, si les précipitations tardent en fin d'été.

Le pe-tsaï peut souffrir du puceron cendré du chou, de l'altise, de la mouche du chou, de la piéride du chou (d'où le filet anti-insectes) et des escargots et limaces. Quant aux maladies, on peut craindre la pourriture du pied, la rouille blanche, le mildiou duveteux.

Les cultivars sont souvent des hybrides F1, pouvant plus ou moins résister à la montaison. Le limbe des feuilles est généralement vert clair, mais il existe des versions pourpres.

Mizuna et mibuna

Le mizuna et le mibuna (*Brassica rapa* var. *nipposinica*) sont des plantes formant, à maturité, une large rosette, avec de nombreuses feuilles étroites et à pétioles fins. Les feuilles du Mizuna sont disséquées, il fait un peu penser à la roquette, alors que celles du mibuna sont simples. Il existe des cultivars aux feuilles rouges de mizuna.

Il est généralement reconnu que les feuilles sont meilleures sur les jeunes plants. Après une coupe, les plants mettent de deux à trois semaines pour repousser, il est donc possible de faire des séries de trois plantations à une semaine d'intervalle, en répétant les séries tous les deux mois. Notons que ces plantes sont assez compétitives vis-à-vis des mauvaises herbes, mais la technique des recoupes fait que des espaces se libèrent, ce qui laisse la place aux adventices (Shuler et al., 2006).

Komatsuna

Le komatsuna (*Brassica rapa* var. *perviridis*) ressemble à la bette à couper. Mal connu en France, c'est incontestablement l'une des verdures asiatiques les plus rapides et les plus productives.

Les particularités des verdures asiatiques

Le Tableau 24 permet une comparaison des diverses variétés, afin de pouvoir adapter à ces différents cas le mode général de culture du navet. Soulignons toutefois qu'il existe probablement des cultivars bien différents au sein de chaque variété (surtout en Asie !) et que certains cultivars ne peuvent précisément être attribués à une variété particulière[575].

En ce qui concerne la rusticité, il s'agit d'une échelle de valeurs, sachant que les plantules sont reconnues comme étant globalement plus résistantes que les plantes à maturité (Palme, 2021).

Pour tenter d'éviter les problèmes de montaison prématurée au printemps, il faut choisir des variétés adaptées, plutôt faire les semis à l'intérieur et user de protections thermiques, mais sans garantie. En été, il faut également choisir les variétés adaptées, irriguer régulièrement, et fournir un ombrage et un paillage selon la taille de la plante.

En ce qui concerne les espacements conseillés, ils sont relatifs à la taille de la plante à maturité. Il s'agit de propositions moyennes, car pour le pak-choï par exemple, existent des variétés naines. Pour récolter des plantes semi-matures, on ne prendra que la moitié de ces espacements, et pour des cultures de type mesclun, les espacements peuvent être de type 1 cm × 10 cm.

En ce qui concerne le stade de maturité visé pour la récolte, on distinguera le stade bébés feuilles (BF qui peut consister en des micro-pousses, soit une récolte lorsque la plantule possède deux vraies feuilles [Caracciolo et al, 2020], ou en des éléments de mesclun, soit des feuilles de 10 cm environ 35 jours) ; le stade semi-mature (SM, qui peut conduire à couper la plante au ras du sol pour des bébés pak-choï, à récolter des feuilles ou à couper à trois centimètres l'ensemble en visant la repousse) ; le stade mature (M, récolte feuille à feuille ou en coupant à 3 cm) ; ou le stade avec une hampe florale (HF, qui est l'objectif pour le choy-sum, mais plutôt un pis-aller en cas de montaison prématurée pour les autres variétés).

---

[575] Il semble ainsi que ce soit le cas de Bekana qui est parfois attribué à la variété botanique *chinensis* et parfois à *nipposinica*.

Tableau 24 : Particularités des différentes verdures asiatiques.

Variétés	Rusticité	Vernalisation	Stress de chaleur	Risque de montaison	Espacement	Stade de maturité
Pak-choï	Bonne (H5)	OUI	OUI	OUI	20–25	BF, B*, M, HF
Tat-soï	Excellente	?			15–20	BF, SM, M
Choy-sum	Culture de jours longs				10–15	HF
Pe-tsaï	Bonne (H5)	OUI	OUI	OUI	30–40	SM, M , HF
Mizuna	Très bonne		TOLERANT	PLUS ou MOINS	20	BF, SM
Mibuna	Excellente		OUI		20	BF, SM
Komatsuna	Excellente			PLUS ou MOINS	25–30	BF, SM, M

B*=bébé pak-choï

Du côté de chez Stéphane : Ma façon de voir les choses sur ces verdures asiatiques d'hiver, c'est... d'en mettre le plus possible. Elles résistent très bien au froid et fournissent, par conséquent, des apports essentiels en vitamines et en minéraux de provenance locale, pas si courants en cette saison. D'autre part, même si tout n'est pas récolté, ce sont en quelque sorte des engrais verts qui protègent le sol, le travaillent, le font vivre avec ses habitants, et piègent ses nutriments que l'on pourra redonner au sol au printemps. D'ailleurs, les parties qui ne sont pas remises en culture donnent l'occasion d'une très belle (et utile pour la biodiversité) floraison jaune, dès les premiers beaux jours. Le seul ennui de cette armada de navets est que cela empêche la rotation sur cette famille.

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). FAO irrigation and drainage paper No. 56. Crop evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements). *Food and Agriculture Organisation of the United Nations, Rome*, *300*.

Andreucci, M. P., Moot, D. J., Black, A. D., & Sedcole, R. (2016). A comparison of cardinal temperatures estimated by linear and nonlinear models for germination and bulb growth of forage brassicas. *European Journal of Agronomy*, *81*, 52-63.

Balvoll, G. (1995). Production of Chinese cabbage in Norway: Problems and possibilities. *Journal of Vegetable Crop Production*, *1*(1), 3-18.

Bierhuizen, J. F., & Wagenvoort, W. A. (1974). Some aspects of seed germination in vegetables. 1. The determination and application

of heat sums and minimum temperature for germination. *Scientia Horticulturae*, *2*(3), 213-219.

Borrelli, K., Koenig, R. T., Jaeckel, B. M., & Miles, C. A. (2013). Yield of leafy greens in high tunnel winter production in the northwest United States. *HortScience*, *48*(2), 183-188.

Caracciolo, F., El-Nakhel, C., Raimondo, M., Kyriacou, M. C., Cembalo, L., De Pascale, S., & Rouphael, Y. (2020). Sensory attributes and consumer acceptability of 12 microgreens species. *Agronomy*, *10*(7), 1043.

Chacko, S. R., Raj, S. K., & Krishnasree, R. K. (2021). Integrated weed management in vegetables: A review. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, *10*(1), 2694-2700.

Grahn, C. M., Benedict, C., Thornton, T., & Miles, C. (2015). Production of baby-leaf salad greens in the spring and fall seasons of northwest Washington. *HortScience*, *50*(10), 1467-1471.

Gupta, R.K., Khurana, D.S., & Singh, H. (2017). Chinese cabbage in M.K. Rana (Ed.) *Vegetable Crops Science* (p. 299-310). CRC Press.

Hong, J., & Gruda, N. S. (2020). The potential of introduction of Asian vegetables in Europe. *Horticulturae*, *6*(3), 38.

Maseko, I., Beletse, Y. G., Nogemane, N., du Plooy, C. P., Musimwa, T. R., & Mabhaudhi, T. (2017). Productivity of non-heading Chinese cabbage (Brassica rapa subsp. chinensis) under different agronomic management factors. *South African Journal of Plant and Soil*, *34*(4), 275-282.

Maynard, D. N., & Hochmuth, G. J. (2006). *Knott's handbook for vegetable growers*. John Wiley & Sons.

Palme, W. (2021). *Le potager au cœur de l'hiver*. Tana éditions, Paris.

Pitrat, M., & Foury, C. (2003). *Histoires de légumes*. QUAE éditions.

Rowe, B. A., & Neilsen, J. E. (2010). Effects of irrigating forage turnips, Brassica rapa var. rapa, during different periods of vegetative growth. 1. Turnip yields, yield components and growth rates. *Crop and Pasture Science*, *61*(11), 885-891. (je ne dispose que du résumé).

Salmon, R. W., & Dumbleton, A. J. (2006, January). The effect of seed treatment and depth of sowing on forage brassica crop

establishment in no-tillage situations. In *Proceedings of the New Zealand Grassland Association* (p. 211-214).

Shuler, K. D., Nie, S. J., Shuler, D. V., & Shuler, P. A. N. (2006, December). Growing and marketing mizuna and bekana at local green markets in southeast Florida. In *Proceedings of the Florida State Horticultural Society* (Vol. 119, p. 297-302).

Sim, H. S., Jo, W. J., Lee, H. J., Moon, Y. H., Woo, U. J., Jung, S. B., ... & Kim, S. K. (2021). Determination of optimal growing degree days and cultivars of kimchi cabbage for growth and yield during spring cultivation under shading conditions. *Horticultural Science and Technology*, *39*(6), 714-725.

Simonne, E. H., Smittle, D. A., & Mills, H. A. (1993). An irrigation scheduling model for turnip greens. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, *118*(6), 726-730.

Smittle, D. A., Dickens, W. L., Stansell, J. R., & Simonne, E. (1992). Irrigation Regimes Affect Leaf Yield and Water Turnip Use by Mustard. *HortScience*, *27*(4), 308-310.

Takahama, M., Kawagishi, K., Sugawara, A., Araki, K., Munekata, S., Nicola, S., & Araki, H. (2019). Classification and screening of baby-leaf vegetables on the basis of their yield, external appearance and internal quality. *The Horticulture Journal*, *88*(3), 387-400.

Theurl, M. C., Hörtenhuber, S. J., Lindenthal, T., & Palme, W. (2017). Unheated soil-grown winter vegetables in Austria: Greenhouse gas emissions and socio-economic factors of diffusion potential. *Journal of Cleaner Production*, *151*, 134-144.

Toxopeus, H., & Baas, J. (2004) Brassica rapa. In K.V. Peter (Ed.), *Underutilized and Underexploited Horticultural Crops*: Vol. 04 (p. 146-151). New India Publishing.

Van Averbeke, W., Juma, K. A., & Tshikalange, T. E. (2007). Yield response of African leafy vegetables to nitrogen, phosphorus and potassium: The case of Brassica rapa L. subsp. chinensis and Solanum retroflexum Dun. *Water SA*, *33*(3), 355-362.

Vogl-Lukasser, B., Vogl, C. R., & Reiner, H. (2007). The turnip (Brassica rapa L. subsp. rapa) in Eastern Tyrol (Lienz district; Austria). *Ethnobotany Research and Applications*, *5*, 305-317.

Wiebe, H. J. (1990). Vernalization of vegetable crops-a review. In *VI Symposium on the Timing of Field Production of Vegetables 267* (p. 323-328).

Zhang, H., Schonhof, I., Krumbein, A., Gutezeit, B., Li, L., Stützel, H., & Schreiner, M. (2008). Water supply and growing season influence glucosinolate concentration and composition in turnip root (Brassica rapa ssp. rapifera L.). *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, *171*(2), 255-265.

15.5 Radis (asiatique)

L'objet de cette section est la culture des radis asiatiques. Nous essaierons, dans un premier temps, de les replacer au sein de l'espèce en général, où ils côtoient les petits radis et les radis d'hiver bien connus en France, mais aussi de comprendre les différences majeures entre groupes de radis du Japon, de Chine et de Corée, et de l'Asie du Sud-Est. Si le radis est une petite culture intercalaire en France, il est, dans les pays d'Asie, d'une grande importance, cuisiné de façons fort diverses, et de dimensions plus impressionnantes. Dans un second temps, nous préciserons des éléments de culture, ce qui n'est pas simple, car les différences entre ces groupes font que donner des valeurs générales pour les temps de culture, les espacements, la fertilisation... n'est tout bonnement pas possible. D'autre part, la diversité à l'intérieur de certains de ces groupes est également élevée, et on peut y dénicher des cultivars adaptés à pratiquement tous les contextes.

15.5.1 Encore un peu de taxonomie

Raphanus sativus est une plante cultivée d'une grande diversité morphologique et dont différents organes sont consommés : la « racine »[576], le fruit qui est une silique, voire les feuilles[577] et les micro-pousses[578], ce qui a conduit à la distinction de plusieurs variétés botaniques. Le radis s'avère également d'une grande diversité

[576] En fait, le tubercule comprend la racine et l'hypocotyle.

[577] Il existe des cultivars uniquement destinés à la consommation des feuilles.

[578] La plantule avec ses deux cotylédons.

génétique et l'identification de son ou de ses ancêtres sauvages est débattue, ainsi que l'histoire de sa dispersion géographique. Une analyse récente (Kobayashi et al., 2020) distingue quatre groupes génétiques de radis, groupes qui s'avèrent en relation avec la variété et la géographie.

Primo, un groupe occidental correspondant à la variété *sativus*, le petit radis rouge (mais aussi parfois blanc, bicolore, jaune ou violet), à cycle de croissance très court, de quatre à cinq semaines ; et à la variété *niger*, le radis d'hiver. Ce sont deux variétés au demeurant assez bien distinguées dans l'analyse de Lü et al. (2008). La variété *niger* va avoir un mode de culture proche des radis asiatiques que nous allons voir par la suite. Ce radis est traditionnellement noir en France, à l'exception du 'Violet de Gournay'), mais blanc ou rouge dans les pays germaniques, comme l'Allemagne, l'Autriche ou... l'Alsace ;-) Là, il y est souvent consommé cru avec de la bière, et si vous êtes en manque d'idées pour la fête des pères, il existe des petits appareils absolument inutiles, permettant de créer des spirales de radis...

Secundo, le radis serpent, un groupe du sud et sud-est asiatique correspondant à la variété *caudatus* dont on consomme les siliques fraîches, et que nous ne considérerons pas dans la suite de cet exposé.

Tertio, un groupe du Japon correspondant à la variété *hortensis*, et plus précisément, *longipinnatus* qui sont des radis blancs, à chair blanche, de grande taille. Ils sont de forme cylindrique, parfois très allongée (le Daïkon), et dans ce cas, sont plutôt destinés aux terres légères ou cultivés en billons. D'autres cultivars ont la particularité de pratiquement pousser au-dessus du sol (pour ce qui est du tubercule, par exemple, le Shogoin), ce qui est intéressant pour les terres lourdes. Il existe également des variétés d'hiver, dont le tubercule est bien caché sous terre, et qui ont un feuillage prostré protecteur. Même si le radis est naturellement une plante de climats frais, la sélection japonaise a produit des cultivars pouvant, sans trop de montaison, être récoltés en été. Ces radis du Japon, au goût plus doux, sont parfois confondus avec des navets, lorsqu'ils sont de petite taille. On trouve, pour finir, une variante cultivée pour ses feuilles (Bisai).

Quarto, la variété *hortensis*, et plus particulièrement, *sinensis*, issue de Chine et de Corée, avec des radis qui sont plus petits que les radis japonais, et sont ronds ou cylindriques. Ils peuvent être subdivisés en

trois types. Le type vert à chair verte ou blanche ('Misato Green', 'Green Meat') est plus petit, a un cycle de culture court de deux mois et est semé en août-septembre. Le type rouge à chair blanche ('Misato red', et le mieux connu en France depuis le 19e siècle 'Radis d'Hiver de Chine') est intermédiaire. Le type joli cœur[579] est le plus imposant, il a une culture longue de trois mois nécessitant de la chaleur et est donc semé plutôt en juillet. Sous une enveloppe généralement blanchâtre, ces radis présentent une chair spectaculairement rose ou rouge ('Red Meat', 'Misato Pink','F1 Mantanghong').

15.5.2 Culture des groupes asiatiques de radis

Les températures cardinales de germination données par McCornick et al. (2014) semblent proches pour le radis asiatique et le radis classique[580] : la minimale est de 3.3 °C (versus 1.5 °C), l'optimale de 29.7 °C (versus 28.7 °C) et la maximale de 41.3 °C (versus 41.6 °C). La profondeur de semis conseillée est de 1 à 2 centimètres (PMG=10 g), particulièrement en saison froide, mais peut aller jusqu'à 5 centimètres à partir de 15 °C (Wagenvoort & Birhuizen, 1977). Le semis direct est de règle, bien qu'en jardinage, la règle n°1 soit qu'il n'y ait pas de règles[581]... Selon la longueur du radis et le fait qu'il pousse en terre ou largement hors de terre, la profondeur du travail du sol devra être adaptée, ou des billons pourront être réalisés. Ceci dit, le Daïkon est parfois employé comme engrais vert, avec l'objectif de décompacter le sol : il a donc une bonne capacité de pénétration. L'espacement va dépendre de la dimension du radis et peut aller de 10 à 30 centimètres sur le rang[582]. On peut opter pour un semis régulier sur la ligne à double ou triple densité ou bien réaliser des mini-poquets de deux graines en usant, dès le départ, du bon espacement. Le radis filant

---

[579] Ma traduction de l'anglais *Beauty Heart*.

[580] Je ne peux préciser les variétés qui sont des hybrides dont les références sont Hybrid RR Radish N34514 et Hybrid Radish No 108 3.75-4.0

[581] Pour preuve, la transplantation est parfois utilisée pour ce type de radis à forte valeur ajoutée, la particularité est d'avoir une durée très courte en contenant pour que la racine ne soit pas trop contrainte.

[582] On voit ici la différence avec la variété *sativus*, où l'espacement peut descendre à 2.5 cm.

facilement, l'opération d'éclaircissage est très importante, et doit être menée rapidement ; les jeunes pousses prélevées peuvent relever le goût d'une salade.

Les températures de croissance vont de 5 °C à 25 °C, avec une plage optimale à 15-18 °C ; à l'exception du type chinois joli cœur qui est, comme nous l'avons dit, plus exigeant en chaleur, et des radis sélectionnés pour une récolte d'été, qui peuvent la supporter et limiter le risque de montaison[583]. Pour les autres cultivars, Suzuki (1978) indique qu'au-delà de 25 °C, et particulièrement pour les jeunes plantules, la croissance des feuilles prend le pas sur la croissance de la « racine ». Il convient donc, lors du semis d'été, d'ombrer les plantules pour limiter ce problème. À l'inverse, le radis japonais peut tolérer -4 °C (Dixon & Lui, 2020), mais Palme (2021) annonce, pour les radis d'hiver européens, une résistance à -12 °C sous abri[584] ! Bref, la saison de semis de la plupart des cultivars est l'été pour une récolte d'automne ou d'hiver.

La fertilisation est l'objet de conseils très diversifiés, en partie liés à la dimension bien différente des « racines » à produire. Pour des radis de 15 et 20 cm et un diamètre de 3 cm, Tripathi et al. (2017) suggèrent[585] 90 N / 60 P_2O_5 / 60 K_2O (kg/ha). Hedge (1987) monte lui à 120 N, Wan & Kang (2005) à 180 N et Pervez et al. (2004) à 200 N. Cette augmentation a tendance à avantager le feuillage par rapport à la racine. À nouveau, nous ne sommes plus avec des « petits radis », la fertilité du sol est un facteur limitant.

En ce qui concerne l'irrigation, le radis ne tolère ni la sécheresse, ni l'hydromorphie. Soulignons qu'en tant que brassicacée, le radis n'est pas mycorhizé, aussi possède-t-il moins de facilité pour accéder à l'eau.

---

[583] D'après Wiebe (1990) pour ce qui est de la variété *niger*, il y a risque de montaison s'il y a vernalisation, même au stade émergent, pour des températures jusqu'à 15 °C (mais surtout vers 5-8 °C), renforcée par les jours longs ; la montaison est aussi favorisée par de fortes températures.

[584] En plein champ, des problèmes d'humidité peuvent être préjudiciables.

[585] Là encore, les choses ne sont pas très claires, et je peux commettre une confusion entre les unités P et P_2O_5, et entre les unités K et K_2O... De plus, je ne suis pas entièrement leurs conclusions... les données me semblant indiquer que 90 N est préférable à 120 N (kg/ha).

Hedge (1987) préconise de garder le sol humide (-20 à -40 kPa) ; ce qui est confirmé par Wan et Kang (2005), sur le radis chinois de type 'Mantanghong', qui ont déterminé qu'une irrigation tous les trois jours, avec une moyenne de 7.5 mm donne les meilleurs résultats en termes de production de racines de qualité (à réguler évidemment en fonction des précipitations et de l'évapotranspiration). Il convient surtout d'être vigilant sur l'humidité du sol en début de culture (qui est généralement en été) et lors de la tubérisation, mais moins pour la croissance intermédiaire. Le radis est un compétiteur assez efficace, et pourtant Harris et al. (2015) proposent une période critique de désherbage s'étalant de 7 à 38 jours après l'émergence, afin d'éviter une perte qui pourrait se monter à 80 %.

Le voile anti-insectes est vraiment conseillé pour les radis d'automne et d'hiver, car il est semé en pleine saison des altises. La mouche du chou peut également causer quelques soucis. Le mildiou est parfois un inconvénient et les cultures couvertes doivent être régulièrement aérées et arrosées avec circonspection.

La récolte du radis se fait, selon les types, de 60 à 90 jours après le semis ; toutefois, il est toujours possible de récolter avant maturité des radis plus jeunes qui sont souvent d'excellente qualité. Ces dates de maturité correspondent à des conditions optimales et elles peuvent être doublées voire triplées dans les cas de semis décalés (Gray & Steckel, 1986). Si les radis sont menés à maturité, il faut prendre conscience du fait qu'ils peuvent être très gros, et qu'on n'en consomme qu'un ou deux par repas : une fois de plus, ce ne sont pas nos « petits radis », dès lors, il faut prévoir de semer des quantités raisonnables au départ, ou apprendre à ses voisins à les apprécier. Pour le Daïkon, il peut être assez délicat d'enlever du sol la grande racine sans l'abîmer.

La bonne nouvelle, c'est ne peut pas complètement rater les radis ! S'ils n'ont pas bien tubérisés, il reste la solution d'utiliser leurs feuilles pour réaliser, par exemple, une soupe délicieuse. Le tubercule peut être consommé cru, en tranches ou râpé, lactofermenté en kimchi comme en Corée, ou cuit comme on le ferait avec un navet. On peut aussi râper le Daïkon, puis le faire sécher pour le conserver ; il est plus tard réhydraté.

Le radis est une plante annuelle ou bisannuelle. L'inflorescence est un racème dont les fleurs sont complètes et protogynes. Il est largement

allogame et pollinisé par divers insectes. Le fruit est une silique contenant de deux à huit graines (Singh, 2021).

Dixon, M., & Liu, G. (2020). Daikon Radish Cultivation Guide for Florida: HS1370, 9/2020. *EDIS*, *2020*(5).

Gray, D., & Steckel, J. R. (1986). A relationship between sowing date and harvest date for radish (Raphanus sativus). *Journal of Horticultural Science*, *61*(3), 349-352.

Harris, K. D., Geretharan, T., Dilsath, M. S. A., Srikrishnah, S., & Nishanthi, S. (2015). Critical period of weed control in radish (Raphinus sativus L.). *AGRIEAST*, *10*(10), 6-10.

Hegde, D. M. (1987). Effect of soil matric potential, method of irrigation and nitrogen fertilization on yield, quality, nutrient uptake and water use of radish (Raphanus sativus L.). *Irrigation Science*, *8*, 13-22.

Kang, Y., & Wan, S. (2005). Effect of soil water potential on radish (Raphanus sativus L.) growth and water use under drip irrigation. *Scientia Horticulturae*, *106*(3), 275-292.

McCormick, J. I., Goodger, R. A., & Chynoweth, R. J. (2014). Cardinal temperatures and vernalisation requirements for a selection of vegetables for seed production. *Agronomy New Zealand*, *44*, 71-83.

Palme, W. (2021) *Un potager au cœur de l'hiver*. Tana éditions., Paris.

Pervez, M. A., Ayub, C. M., Saleem, B. A., Virk, N. A., & Mahmood, N. A. S. I. R. (2004). Effect of nitrogen levels and spacing on growth and yield of radish (Raphanus sativus L.). *International Journal of Agriculture & Biology, 6*(3), 504-506.

Singh, B. K. (2021). Radish (Raphanus sativus L.): Breeding for higher yield, better quality and wider adaptability. In J.M. Al-Khayri, S.M. Jain and D.V. Johnson (Eds.), *Advances in Plant Breeding Strategies: Vegetable Crops: Volume 8: Bulbs, Roots and Tubers* (p. 275-304). Springer, Cham.

Suzuki, S. (1978). Growth of radishes as influenced by the high temperatures above the optimum range. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science*, *47*(3), 375-381.

Tripathi, A. K., Ram, R. B., Rout, S., Kumar, A., & Patra, S. S. (2017). Effect of Nitrogen Levels and Spacing on Growth and

Yield of Radish (Raphanus sativus L.) Cv. Kashi Sweta. *International Pure Applied Bioscience*, *5*(4), 1951-1960.

Wiebe, H. J. (1990). Vernalization of vegetable crops-a review. In *VI Symposium on the Timing of Field Production of Vegetables 267* (p. 323-328).

16 Légumes d'été

Avec le changement climatique, juillet est devenu un mois plus ambivalent pour le jardinage, mais ensuite, c'est le *coming août* !

16.1 Amaranthe(s)

Le genre *Amaranthus* qui appartient à la famille des amaranthacées comprend environ soixante espèces. Dix-sept sont cultivées pour leurs feuilles[586] (et leur tige) qui sont généralement consommées cuites, et trois pour leurs graines. Les amaranthes sont parfois simplement utilisées comme plantes ornementales, car à différents stades, elles produisent des effets esthétiques spectaculaires que j'appellerai *woua*maranthes et que je décrirai. Enfin, certaines sont des mauvaises herbes redoutées, car elles ont développé des résistances aux herbicides.

16.1.1 Taxonomie des amaranthes cultivées

La taxonomie du genre est compliquée. D'une part, les espèces se ressemblent beaucoup, sont cosmopolites et ont donné lieu à des synonymes botaniques. D'autre part, parmi les amaranthes à graines, existent encore de véritables ambiguïtés, même pour les spécialistes.

Pour essayer de s'y retrouver[587], on distinguera par la suite :

- les amaranthes à feuilles, qui sont l'objet de cette note de lecture : *A. blitum* (dite épinard-blette, syn. *A. lividus*), *A. tricolo*r (amaranthe tricolore, syn. *A. tristis*), *A. viridis* (dite amaranthe verte), *A. dubius*, voire *A. thunbergii* et *A. spinosus* ;
- les amaranthes à graines, pseudo-céréales que nous ne considérerons pas dans le cadre d'un potager : *A. hypochondriacus* (syn. *A. frumentaceus*) et *A. caudatus*

[586] Toutes les amaranthes ont des feuilles comestibles, particulièrement les jeunes feuilles, mais de goût plus ou moins agréable.

[587] Cette classification n'est peut-être pas définitive, et il existe également des hybrides bien connus...

(dite amaranthe queue-de-renard, également employée comme plante ornementale, syn. *A. edulis*) ;

- une espèce mixte et très importante : *A. cruentus* (syn. *A. paniculatus*), souvent confondue avec *A. hybridus* ; cette dernière est considérée comme étant à l'origine des amaranthes à graines.

Les amaranthes sont des plantes annuelles, herbacées, érigées et plus ou moins ramifiées. Les feuilles, de formes diverses, peuvent aller du vert au rouge. Les inflorescences sont imposantes chez les amaranthes à graines. La variabilité génétique est importante dans le genre et au sein des espèces.

Les amaranthes sont, même dans les feuilles, riches en protéines de bonne qualité, en minéraux (calcium, fer) et en vitamines A et C. En revanche, elles peuvent accumuler des nitrates, surtout dans les tiges, et de l'acide oxalique, à un niveau similaire aux épinards ; la cuisson, en particulier dans une grande quantité d'eau, limitant ces deux inconvénients.

De façon générale, les amaranthes présentent un grand intérêt et sont connues de très longue date, car elles ont une forte résistance à la chaleur et à la sécheresse, s'adaptent à des sols différents, et même difficiles, ont une croissance rapide et font montre d'une forte valeur nutritive. Elles sont, de plus, assez compétitives par rapport aux mauvaises herbes et résistent bien aux maladies et aux ravageurs. Elles sont, en résumé, assez faciles à cultiver et sont appelées le légume de l'homme pauvre (*poor man's vegetable*). Elles sont énormément cultivées en Afrique et en Inde, mais moins en Europe.

Dans un premier temps, la culture des amaranthes sera présentée de manière générale, puis dans un second temps, des particularités intéressantes de certaines espèces seront évoquées.

16.1.2 Généralités sur la culture des amaranthes

Les températures cardinales de germination pour *A. cruentus* sont de 10 °C (minimale) et de 40 °C (maximale), l'optimum se situant à 30 °C, selon Motsa et al. (2015). Thomas et al. (2006) confirment cette température optimale (voire même l'étendent à 35 °C pour *A. viridis*), ainsi que la maximale, mais trouvent une minimale à 20 °C. Des

températures alternes, par exemple 30/20 °C (jour/nuit) ou 35/20 °C, semblent encore plus intéressantes, ce qui est important pour des semis à l'intérieur. L'effet de la lumière sur la germination est complexe ; il diffère peut-être d'une espèce à l'autre et selon la température. La graine des amaranthes est petite (PMG=0.2-1 g) et ne doit donc pas être semée trop profondément : 0.5-1 cm étant recommandé. En saison chaude, semer directement à la surface du sol permet l'accès à des températures plus élevées et plus fluctuantes (et à la lumière qui semble intéressante pour les hautes températures) mais un contact avec le sol doit être garanti pour une imbibition correcte. Plombons, donc !

Les amaranthes sont des plantes des climats chauds, dont les températures de croissance doivent être supérieures à 25 °C et qui peuvent supporter jusqu'à 40 °C. Au-dessous de 15 °C, la croissance s'arrête ; et au-dessous de 10 °C, des dommages peuvent survenir ; elles ne sont naturellement pas résistantes au gel. (RHS=H2). Par leur mode de photosynthèse en C4, elles tolèrent des seuils élevés de radiations solaires et de températures, on les installera, par conséquent, en situation pleinement ensoleillée. Elles sont efficientes dans l'utilisation de l'eau et sont tolérantes à la sécheresse, toutefois, leur système racinaire est faible. Une irrigation est indispensable au stade de la germination et au stade de plantule, et permet par la suite d'augmenter nettement la production et la qualité gustative des feuilles, et de retarder la floraison.

La plante monte en effet rapidement à graines et peut fleurir quatre à huit semaines après le semis. La montaison prématurée est un véritable problème pour l'amaranthe à feuilles, car elle stoppe la croissance des feuilles et les rend moins consommables. Les sécheresses, les hautes températures, les jours courts (photopériodisme pour les longueurs de jour inférieures à 12 heures) et le manque d'azote en sont les principaux facteurs. Les pousses doivent ainsi être régulièrement pincées afin de retarder la floraison.

L'amaranthe offre des cultures rapides et importantes, mais elle consomme beaucoup de minéraux. Pour la fertilisation sur les sols pauvres, sont recommandés du fumier 2-2.5 kg/m^2 à la préparation du sol, accompagné de 75-125 N / 15-25 P / 150-250 K (kg/ha ; Grubben & Janssen, 2004) ; l'azote gagne à être réparti en plusieurs fois.

L'amaranthe répond bien à la fertilisation azotée, la production augmentant linéairement de 0 à 200 N, mais il ne faut pas avoir la main trop lourde, car les nitrates s'accumulent dans la plante : au final, 80 N sont suggérés. La plante répond également bien à la fertilisation organique qui peut monter parfois jusqu'à 5 kg/m^2. En ce qui concerne le désherbage, l'amaranthe est une plante assez compétitive et l'opération n'est indispensable que dans le cas d'un semis direct.

Les problèmes les plus classiques pour l'amaranthe sont la fonte des semis indirects, des maladies dues à l'humidité (cependant assez rares, en été, sous nos climats) et les insectes herbivores.

Il existe trois types d'itinéraire technique. Primo, le semis direct, pour lequel le sol doit être vraiment réchauffé (attendre peut-être juin ?) et très bien affiné. Ce semis peut se faire soit à la volée, soit en lignes séparées de 20-30 cm, pour faciliter les opérations de désherbage ; dans les deux cas, à une densité de 1-5 g/m^2 de graines. Vu la taille de la graine, on peut mélanger, dans une proportion de 1:10, avec du sable, pour obtenir une bonne uniformité d'implantation. En s'assurant bien de l'humidité du sol pendant deux semaines, la récolte peut avoir lieu au bout de 35 jours et se fait par la cueillette complète de la plante. Cette première technique demande moins de travail, mais plus de graines, un travail obligatoire de désherbage pour, finalement, une récolte plus faible.

Secundo, le semis en pépinière (2-10 g/m^2, ce qui peut donner 1 000-1 500 plantules !), les plantules de 15 cm avec cinq-six feuilles sont repiquées, à racines nues, au bout de trois-quatre semaines, généralement à un espacement de 10-20×20-30 (cm), qui dépend de la méthode de récolte (unique ou répétée), ayant lieu trois semaines après la plantation. Pour une récolte unique, et bien que la récolte soit plus importante avec 200 plants par mètre carré, une densité de 100 plants par mètre carré donne une récolte, à peine moindre, et un plus petit travail de plantation.

Tertio, le semis indirect, dans des plaques à l'intérieur, permet d'anticiper la fin des gelées. Les plantules peuvent être plantées au bout de trois à quatre semaines, avec les espacements précédents, et les mêmes techniques de récolte, unique ou répétée.

La récolte peut être unique, à 15 cm de hauteur, soit en « arrachant » aussi les racines, soit en coupant au ras du sol. La récolte

peut également être répétée, en coupant à 15-20 cm de haut, et en prenant soin de laisser au moins deux feuilles pour que la plante puisse repartir : le but étant de recueillir des pousses de 10-15 cm de longueur. Il est également possible, à partir de 15 cm, de pincer toutes les semaines, pour encourager la ramification et ramasser alors plutôt des feuilles. On ne cueille que les jeunes feuilles : les plus anciennes étant amères. Dans ces derniers cas, il faut absolument supprimer les fleurs, ce qui peut contribuer à doubler la production de feuilles.

Les feuilles et les jeunes pousses peuvent se conservent au froid ; ou il est possible de cueillir la plante avec sa racine à 15 cm et de tremper la racine dans l'eau, ce qui permet une bonne semaine de conservation à température ambiante. Il est toujours intéressant, au moment de servir une salade, de couper une partie du bouquet d'amaranthes décorant la table, pour l'incorporer à la salade, sous les yeux ébahis des invités (premier effet *woua*maranthe).

Les fleurs des amaranthes sont unisexuées et la plupart des espèces sont monoïques. Les amaranthes ne produisent pas de nectar, et par conséquent, intéressent peu les insectes. Elles sont pollinisées par le vent ou la gravité : les amaranthes à feuilles sont plutôt autopollinisées, alors que les amaranthes à graines sont plutôt en pollinisation croisée. Les graines sont nombreuses. On peut très facilement produire ses graines, en laissant des porte-graines de la même variété, mais de toute façon, la plante a tendance à se ressemer : on retrouve l'année suivante des sortes de nuages rouges dans son potager ou sa pelouse, qui font un deuxième effet *woua*maranthe, assez proche de l'idée du « jardin en mouvement » de Gilles Clément.

16.1.3 Particularités spécifiques de la culture des amaranthes

Passons maintenant aux espèces, l'essentiel de ce qui suit est tiré d'une série d'articles du remarquable ouvrage collectif édité par Grubben et Denton (2004).

A. blitum peut atteindre un mètre de haut et est moins productive que d'autres espèces, comme *A. cruentus* ou *A. dubius*. En revanche, elle est plus tolérante à la sécheresse et est résistante aux maladies et aux ravageurs. Ses graines sont plus grosses (PMG=1 g). Notons qu'elle est souvent confondue avec *A. viridis*. En ce qui concerne la

sélection, elle a surtout portée sur les amaranthes à graines et les amaranthes à feuilles sont le parent pauvre. J'ai pu obtenir, chez les semenciers français : 'Red Garnet' qui est effectivement de culture simple, avec des jeunes pousses d'une belle couleur pourpre.

A. cruentus est de beaucoup plus grande taille, de l'ordre de deux mètres. C'est la seule amaranthe qui soit à la fois considérée comme pseudo-céréale et légume-feuille : il existe d'ailleurs des cultivars pour chacune de ces destinations. C'est celle dont on trouve le plus facilement des cultivars en France et j'ai pu tester : 'Bolivia 153' (très productive) et 'Early Splendor' (d'un rose magnifique à maturité). Elle est l'amaranthe la plus productive en tant que légume-feuille et celle croissant le plus rapidement. Son inflorescence est nettement plus importante, voire spectaculaire, à tête d'éléphant (troisième effet *woua*maranthe). Ses graines sont plus petites (PMG=0.3-0.4 g). Elle résiste mieux au froid que *A. tricolor*.

Figure 130 : Effet *woua*maranthe : la tête d'éléphant.

A. tricolor (PMG=0.35-0.85 g) peut atteindre 1.25 mètre. Sa transplantation à racine nue n'est pas recommandée, contrairement à *A. cruentus* ou *A. dubius*, car elle est assez fragile. Elle croît aussi moins vite que ses deux espèces et le désherbage est vivement conseillé. Elle résiste modérément à la sécheresse pour une amaranthe. Elle est assez sensible aux maladies fongiques et doit être plus espacée. Elle se prête moins aux cueillettes multiples. Cela fait quand même quelques inconvénients... mais d'une part, elle est parfois consommée crue en

salade, car elle est plus tendre que les autres amaranthes, et d'autre part, ses feuilles sont magnifiques. Le cultivar le plus connu est probablement 'Tampala', mais j'ai pu essayer : 'Splendens Perfecta' dont les feuilles jaune et rouge font un effet spectaculaire dans une salade (quatrième effet *woua*maranthe) !

A. dubius est une plante pouvant monter à 1,5 mètre. Elle est de goût un peu plus neutre. C'est la seule amaranthe tétraploïde. Ses graines sont de très petite taille (PMG=0.15-0.25 g). Elle semble moins résistante à la sécheresse et mériter une irrigation plus fréquente, ce qui se combine bien avec le fait qu'elle est moins sensible aux problèmes fongiques (fonte des semis, en particulier). Elle est adaptée à un climat chaud et humide, rare en Europe. Je n'ai pu trouver de cultivars chez les semenciers français.

Achigan-Dako, E. G., Sogbohossou, O. E., & Maundu, P. (2014). Current knowledge on Amaranthus spp.: research avenues for improved nutritional value and yield in leafy amaranths in sub-Saharan Africa. *Euphytica*, *197*(3), 303-317.

Ebert, A. W., Wu, T. H., & Wang, S. T. (2011). Vegetable amaranth (Amaranthus L.). *AVRDC publication*, (11-754), 9.

Emeka Igbokwe, P., & Hollins; S. (2000). Response of Vegetable Amaranth to Plant Spacing, *Journal of Vegetable Crop Production, 6*(2), 75-85

Grubben, G.J.H., & Janssen, P.G.M. (2004). Amaranthus. In G.J.H. Grubben and O.A. Denton (Eds.), Plant Resources of Tropical Africa 2. Vegetables (p. 63-89). PROTA Foundation, Wageningen, Netherlands / Backhuys Publishers, Leiden, Netherlands / CTA, Wageningen, Netherlands.

Motsa, M. M., Slabbert, M. M., Van Averbeke, W., & Morey, L. (2015). Effect of light and temperature on seed germination of selected African leafy vegetables. *South African Journal of Botany*, *99*, 29-35.

Oladiran, J. A., & Mumford, P. M. (1985). The stimulation of seed germination by temperature and light in agronomic Amaranthus species. *Biochemie und Physiologie der Pflanzen*, *180*(1), 45-54.

Peter, K. V. (2004). *Underutilized and Underexploited Horticultural Crops*: Vol. 04. New India Publishing.

Thomas, W. E., Burke, I. C., Spears, J. F., & Wilcut, J. W. (2006). Influence of environmental factors on slender amaranth (Amaranthus viridis) germination. *Weed Science*, *54*(2), 316-320.
Van den Heever, E. & Venter S.L. (2008). Amaranths. In K.V. Peter (Ed.), *Underutilized and Underexploited Horticultural Crops*: Vol. 04 (p. 61-92). New India Publishing.

16.2 Baselle

La baselle (*Basella alba*) est une liane succulente, pérenne, de la famille des basellacées, cultivée comme annuelle sous nos climats. Les feuilles se consomment comme des épinards... de Malabar (l'autre nom, plus exotique, de la baselle) et peuvent les remplacer en été. C'est une plante tropicale et trop mignonne, qui peut simplement être utilisée comme ornementale. Ses graines sont employées pour faire de l'huile végétale.

La plage optimale pour les températures de germination est de 18-23 °C, mais même dans ces conditions, l'émergence prend de deux à trois semaines, voire jusqu'à un mois ; il est possible de scarifier précautionneusement la graine ou de la tremper pendant 24 heures pour hâter le processus. La transplantation est intéressante, car la plante est non seulement longue à germer, mais il faut absolument lui éviter les gelées. Il vaut mieux semer trois graines par godet, à 1-1.5 cm de profondeur (PMG=35-40 g), et éclaircir ensuite pour obtenir une seule plantule. La plantation peut avoir lieu au stade cinq vraies feuilles.

Un fort ensoleillement est nécessaire[588] à la baselle, qui possède une photosynthèse facultative de type CAM, ainsi qu'une bonne humidité, vu son origine. Une température de 32 °C est optimale pour sa croissance, qui ralentit au-dessous de 26 °C. Elle n'est évidemment pas du tout rustique (RHS = 1c).

Le sol pour l'accueillir doit être riche et humide. En termes de fertilisation, Verma et al. (2021) proposent de 2 à 2.5 kg/m^2 de fumier

[588] Mais elle est parfois cultivée à mi-ombre ce qui occasionne des feuilles plus grandes.

bien décomposé, puis 60 N[589] (kg/ha). La baselle répond bien à la fertilisation azotée, aussi un supplément de 50 N peut être fourni en plusieurs applications (ceci dit, dans les conditions indiennes, la période de culture de la baselle est longue). Un espacement de 50 cm sur le rang et 100 cm entre les rangs est usuel, mais dans une version annuelle, plus courte, un espacement de 25 cm paraît plus raisonnable, voire même, si la cueillette est unique, consistant en une jeune pousse de 20-25 cm, un espacement de 15 cm est suffisant. L'irrigation doit être régulière afin de maximiser la production, en quantité, mais aussi en qualité, et afin de prévenir la floraison qui rend les feuilles amères. De toute façon, il s'agit d'une plante de jours courts, qui fleurira au-dessous de 13 heures de jour (Varalakshmi, 2007). Un paillage est conseillé pour conserver l'humidité du sol en été. Le travail de désherbage est important, sinon la perte de production peut s'élever à 80 % ! Une période critique de 10 à 40 jours après la transplantation me semble adéquate[590] d'après les données de Punzalan et de la Cruz (1981) : un désherbage à 10, 25 et 40 jours après la transplantation, donc[591]. Il est également indispensable de tuteurer la plante à partir d'une certaine taille. Et là, on peut jouer sur l'esthétique, en utilisant des tuteurs de formes diverses (tipi, arc, cercle, très grand nain de jardin...) ou même des tournesols. Il existe des variétés locales prostrées et d'autres volubiles (Reddy et al., 2014).

Plusieurs maladies fongiques sont connues (*Cercospora spp.*, *Alternaria spp* et *Colletotrichum spp.*) qui conduisent à préconiser les précautions habituelles (rotations, espacements raisonnables et irrigation par le bas). Plusieurs insectes peuvent également s'attaquer aux feuilles ; le détail est disponible dans Deshmukh et Gaikwad (2013).

Les jeunes pousses et les jeunes feuilles sont les plus intéressantes à récolter ; c'est possible 30-45 jours après la plantation. On peut

---

[589] Mais aussi 60 P / 40 K (kg/ha), bien que la confusion reste possible avec 60 P_2O_5 / 40 K_2O (kg/ha)...

[590] Ce ne sont pas exactement leurs conclusions, ma lecture de leur table 3 est un peu différente.

[591] Attention, en cas de semis direct, comme la levée de la plante est lente, il faut sans doute prévoir un désherbage supplémentaire.

également récolter l'extrémité apicale, pour encourager la plante à ramifier. La conservation est courte, même à température basse et bonne humidité.

Les fleurs sont hermaphrodites. La plante est plutôt autogame, mais la pollinisation croisée est possible, du fait de différents pollinisateurs (Bolaji et al., 2022). Les graines peuvent être facilement conservées pendant quatre ans.

Il existe trois variétés : l'une à tige verte, l'autre à tige rouge (*Basella alba* var. *rubra*) et la troisième, plus rare, à feuilles en forme de cœur (*Basella alba* var *cordifolia*) ; mais il n'existe pas encore de véritables cultivars.

Acikgoz, F. E., & Adiloglu, S. (2018). A review on a new exotic vegetable for Turkey: Malabar Spinach (Basella alba L. or Basella rubra L.). *Journal of Horticulture*, *5*, 239.

Bolaji, A. O., Oladejo, A. S., & Adeniran, O. I. (2022). Reproductive biology of green-stemmed and red-stemmed Basella alba. *Botanica Lithuanica*, *28*(1).[592]

Chaurasiya, A., Pal, R. K., Verma, P. K., Katiyar, A., & Kumar, N. (2021). An updated review on Malabar spinach (Basella alba and Basella rubra) and their importance. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry, 10*(2), 1201-1207.

Deshmukh, S. A., & Gaikwad, D. K. (2013). A Review of the package of practices, insects and non-insect pests of Basella alba L. *Journal of Crop Science and Technology, 3*, 1-3.

Ernst, M. (2017). Malabar Spinach. CCD-CP-130. Lexington, KY: Center for Crop Diversification, University of Kentucky College of Agriculture, Food and Environment. Available: http://www.uky.edu/ccd/sites/www.uky.edu.ccd/files/malabar.pdf

Punzalan, F. L., & de la Cruz, E. L. (1981). Effect of duration of weed competition and weed control in sugarcane (Saccharum officinarum L.). *Philippine Journal of Weed Science, 8*, 15-18.

[592] Je ne dispose que du résumé.

Reddy, M. T., Begum, H., Sunil, N., Rao, P. S., Sivaraj, N., & Kumar, S. (2014). Preliminary characterization and evaluation of landraces of Indian spinach (Basella spp. L.) for agro-economic and quality traits. *Plant Breeding and Biotechnology*, *2*(1), 48-63.

Varalakshmi, B. (2007). Basella 16. In K.V. Peter (Ed.), *Underutilized and Underexploited Horticultural Crops, 1* (p. 247-254. New India Publishing Agency.

Verma, A.K. Samadia, D.K. Singh, D (2021) Underexploited leafy perennials. In B. Singh and K.V. Peter (Eds.), *Greens, Sprouts and Edible Flowers* (p. 219-231). Brillion Publishing.

16.3 Dolique

Le dolique (*Vigna unguiculata*) est une plante herbacée, annuelle, de la famille des fabacées. Elle fait partie d'un ensemble d'espèces que l'on rapproche sous le terme de « haricots » et que nous allons, dans un premier temps, rapidement décrire. Dans un deuxième temps, nous discuterons de façon générale de la culture du dolique, afin d'en distinguer, dans un dernier temps, trois formes : le niébé, le haricot à l'œil noir et le haricot kilomètre ; les deux dernières étant plus intéressantes pour la culture en climat tempéré.

16.3.1 La faim des haricots

Outre les pois (*Pisum sativum*), les fèves (*Vicia faba*) et les sojas (*Glycine max*), plusieurs autres espèces de la famille des légumineuses sont cultivées pour leurs fruits (gousses) ou leurs graines. Leur contenu important en protéines en fait le complément naturel des céréales. En outre, ce sont des plantes améliorantes, d'une part, du fait de leurs qualités en tant que plantes fixatrices d'azote, et d'autre part, pour la faible proportion qui en est prélevée, ce qui conduit à des résidus intéressants. Toutefois, beaucoup de ces haricots sont d'origine tropicale, et leur acclimatation est plus ou moins possible en France métropolitaine, même dans un contexte de réchauffement climatique. Trouver des semences (clairement identifiées...) constitue une autre gageure.

Dans le genre *Phaseolus*, nous retrouvons le haricot commun (*P. vulgaris*), avec ses nombreuses déclinaisons (nain, ramant, mangetout, beurre...) qui est, lui, bien adapté à nos climats (l'été !) ; mais aussi le moins connu haricot d'Espagne (*P. coccineus*), très décoratif. Il existe d'autres espèces qu'on destinera aux climats les plus chauds, comme le haricot de Lima (*P. lunatus*) et le haricot tépari (*P. acutifolius*).

Dans le genre *Vigna*, celui du dolique, on va surtout retrouver le haricot adzuki (*Vigna angularis*), extrêmement utilisé dans la cuisine japonaise, y compris pour des desserts, et qui est cultivable en France ; et le « vrai » haricot mungo (*V. radiata*) qui, en Europe, est souvent simplement récolté comme micro-pousse, sous le nom de « germes de soja. » (Rien n'est simple...) Enfin, plus exotiques, on peut considérer le haricot urd (*V. mungo*, le « faux » haricot mungo), le haricot mat (*V. aconitifolia*) et le haricot riz (*V. umbellata*).

Pour terminer, et dans l'ordre alphabétique, on peut ajouter le guar (*Cyanopsis tetragonolobus*, employé ici comme émulsifiant), le lablab (*Lablab purpureus*) et le pois carré (*Psophocarpus tetragonolobus*).

16.3.2 Culture du dolique

Tout se consomme dans le dolique : les jeunes pousses, les feuilles, les gousses immatures, les graines fraîches ou sèches, et même, dans certaines régions d'Afrique, les racines. Il présente de bonnes qualités nutritionnelles, avec des taux intéressants de vitamines, d'antioxydants et de fibres. Les grains secs contiennent plus de 20 % de protéines et sont la proie des végétariens. Le dolique est également employé comme fourrage (d'où son nom de « pois à vaches ») ou comme engrais vert.

C'est une plante originaire d'Afrique, la plupart des cultivars ne sont pas très adaptés aux climats tempérés. Les températures de croissance idéales sont de 25 à 35 °C. Les températures de nuit ne doivent pas être au-dessous de 15 °C. On réservera sa culture à la moitié sud de la France métropolitaine, avec une exposition en plein soleil. Il présente une très grande tolérance au stress de température et de sécheresse, ce qui peut en faire une légumineuse intéressante pour contrer le réchauffement climatique. Malgré tout, il y a des limites, et

au-delà de 35 °C, la floraison et la fructification peuvent devenir problématiques.

Les températures cardinales de germination sont bien entendu élevées : de 8 à 11 °C (minimale), de 35 °C (optimale) et de 43 °C (maximale), c'est par conséquent un semis direct qui attendra le mois de juin. La graine étant grosse (PMG=150-300 g), la profondeur de semis va de 3 à 4 cm. Le dolique est doté d'une forte racine pivot, lui servant, entre autres, à aller « chercher l'eau et les nutriments » dans des conditions difficiles, la transplantation n'est peut-être pas le mode d'implantation à privilégier. L'espacement va fortement varier, selon la forme de la plante et ce que l'on va en récolter. Pour les formes érigées de dolique, il peut aller de 10 cm à 50 cm. En revanche, pour les formes prostrées, il peut s'étendre jusqu'à 75 cm. Si on ne souhaite cueillir que des jeunes pousses ou que des feuilles de façon répétée (en les coupant à 10 cm du sol), 25 plantes par m^2 sont utilisées. Dès qu'une récolte de graines est visée, il va falloir diminuer la densité pour que la plante puisse finir son cycle sans être gênée dans sa croissance par ses voisines.

En tant que fabacée, le dolique vit en symbiose avec des bactéries, *Sinorhizobium fredii* et plusieurs *Bradyrhizobium*, qui lui permettent de fixer l'azote, et donc de pousser en sol peu fertile[593]. Les apports conseillés sont, par conséquent, faibles, un éventuel engrais azoté coup de fouet à l'implantation, de l'ordre de 20-40 N (kg/ha), voire au moment de la floraison. Le dolique répond peu au potassium et au phosphore, 30 kg/ha suffisent pour chacun. Dans les sols français, plus riches que les sols africains où il est cultivé, il ne devrait pas y avoir de problèmes de ce côté.

Si le dolique supporte le stress hydrique, sans doute aidé par sa forte racine pivot, il répond de façon très nette à l'irrigation. (La sécheresse réduit la fixation de l'azote.) L'humidité est évidemment nécessaire à la germination ; comme pour le haricot vert, il vaut mieux la limiter ensuite jusqu'à l'émergence, puis l'assurer jusqu'au bon établissement de la plante.

---

[593] Si elles ne sont pas présentes dans le sol, une inoculation est possible.

Le dolique est un faible compétiteur par rapport aux mauvaises herbes, surtout en début de culture, où sa croissance est lente. La perte pour des grains peut s'élever à 80 %, si on ne fait rien ! Mais des mesures préventives (faux semis...) ne suffisent pas, et d'autres désherbages seront nécessaires, avec une période critique s'étendant de 15 à 45 jours après le semis. Notons que ce désherbage est parfois couplé à un buttage.

Il existe de nombreuses maladies et ravageurs du dolique. En Europe, on échappera heureusement aux singes (contrairement au Soudan, voir Ngalamu et al., 2015).

Après l'émergence des deux cotylédons, les deux premières vraies feuilles sont simples et opposées, puis les suivantes sont alternes et trifoliées. En se souvenant que les fabacées s'appelaient auparavant papilionacées, cela donne une idée de la jolie forme des fleurs, regroupées en inflorescence, et dont la couleur va du blanc au pourpre. La reproduction est autogame, car la fleur est cléistogame. Les quelques croisements sont dus à une pollinisation par des insectes de grande taille (au maximum 40 %). La gousse fait de 8 à 30 cm, mais est beaucoup plus longue pour le haricot kilomètre. Elle contient de 8 à 30 graines.

Les gousses sont récoltées lorsqu'elles sont immatures, soit deux semaines après la floraison. Pour les grains secs, il faut que les deux tiers de la gousse soient jaunes et secs. Même si on le récolte pour ses gousses ou ses graines, il est possible de prélever 10-20 % des feuilles, pour les consommer comme des épinards, sans préjudice. Les feuilles ne peuvent être conservées plus de deux jours ; les jeunes pousses un peu plus, en les plongeant dans une bassine d'eau ; les graines fraîches une semaine au réfrigérateur ; et les gousses de haricots kilomètres jusqu'à quatre semaines. Un petit *détail de ménagère* : les grains secs du dolique se cuisinent plus rapidement que ceux des autres légumineuses.

16.3.3 Variétés de doliques

Le dolique a été domestiqué en Afrique, il y a très longtemps (vers 1500-2000 avant J.-C.), peut-être en deux centres différents. Il est resté une légumineuse très importante dans une agriculture de subsistance.

Cette longue durée et ce grand espace de culture expliquent que les variations intraspécifiques soient importantes. Plusieurs systèmes de cultigroupes ont été proposés pour y mettre un semblant d'ordre, nous nous baserons ici sur celui de Pasquet et al. (1997).

Le niébé (*V. unguiculata* var. *Unguiculata*) est la forme commune répandue en Afrique. La plante est érigée ou prostrée, déterminée ou pas, avec des variantes adaptées aux climats tropicaux arides ou humides. Elle s'acclimatera difficilement aux conditions françaises métropolitaines.

Le haricot à l'œil noir (*V. unguiculata* var. *Melanophtalma*) est également une plante érigée ou prostrée, mais photosensible. C'est le haricot qui était cultivé depuis l'Antiquité en Europe, avant l'arrivée du haricot du Nouveau Monde. Le plus connu est celui dont le grain est blanc avec une tache noire sur le hile et est, pour cela, nommé le « blackeyed pea » (oui, d'où le nom du groupe de musique). Il reste largement cultivé aux États-Unis, jusqu'à 45° de latitude avec succès (soit Lyon en France), avec des variantes comme le « pinkeyed pea », le « cream pea » et le « crowder pea » aux graines très serrées. On peut le dénicher chez certains semenciers français.

Après un détour par l'Asie du Sud-Est, le haricot kilomètre (*V. unguiculata* var. *Sesquipedalis*) est une version grimpante, nécessitant de bons tuteurs. Il est cultivé pour ses gousses à la longueur spectaculaire. Il est, lui aussi, adaptable aux climats tempérés secs, mais nécessite un arrosage plus suivi. C'est celui dont les semences sont le plus facilement disponibles en France.

Restent également le catjang (*V. unguiculata* var. *Biflora*), essentiellement développé en Inde, et le cultigroupe *Textilis* qui n'est pas utilisé pour l'alimentation.

Craufurd, P. Q., Summerfield, R. J., Ellis, R. H., & Roberts, E. H. (1997). Photoperiod, temperature, and the growth and development of cowpea. *Advances in Cowpea Research*, 75-86.

Ehlers, J. D., & Hall, A. E. (1997). Cowpea (Vigna unguiculata L. walp.). *Field Crops Research*, *53*(1-3), 187-204.

Elowad, H. O., & Hall, A. E. (1987). Influences of early and late nitrogen fertilization on yield and nitrogen fixation of cowpea

under well-watered and dry field conditions. *Field Crops Research*, *15*(3-4), 229-244.

Geetha, V., & Varughese, K. (2006). Response of vegetable cowpea to nitrogen and potassium under varying methods of irrigation. *Journal of Tropical Agriculture*, *39*(2), 111-113.

Lazaridi, E., & Bebeli, P. J. (2023). Cowpea constraints and breeding in Europe. *Plants*, *12*(6), 1339.

Madamba, R., & Grubben, G.J.H. (2004). Vigna unguiculata. In G.J.H. Grubben and O.A. Denton (Eds.), *Plant Resources of Tropical Africa 2. Vegetables* (p. 365-367). PROTA Foundation, Wageningen, Netherlands / Backhuys Publishers, Leiden, Netherlands / CTA, Wageningen, Netherlands.

Ngalamu, T., Odra, J., & Tongun, N. (2015). *Cowpea production handbook*. IFS/AGRA.

Nkaa, F., Nwokeocha, O. W., & Ihuoma, O. (2014). Effect of phosphorus fertilizer on growth and yield of cowpea (Vigna unguiculata). *IOSR Journal of Pharmacy and Biological Sciences*, *9*(5), 74-82.

Pasquet, R. S., Echikh, N., Gepts, P., & Baudoin, J. P. (1997). La domestication du niébé, Vigna unguiculata (L.) Walp. *Gestion des ressources génétiques des plantes en Afrique des savanes, 24–28 février 1997, Bamako (M ali)*, 261-270.

Som, M. G., & Hazra, P. (1993). Cowpea: Vigna unguiculata (L.) Walp. In G. Kalloo and B.O. Bergh (Eds.), *Genetic improvement of vegetable crops* (p. 339-354). Pergamon.

Yadav, T., Nisha, K. C., Chopra, N. K., Yadav, M. R., Kumar, R., Rathore, D. K., ... & Singh, M. (2017). Weed management in cowpea-A review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, *6*(2), 1373-1385.

16.4 Ficoïde glaciale

La ficoïde glaciale (*Mesembryanthemum Crystallinum*) est une plante herbacée, prostrée, annuelle sous nos climats, de la famille des aizoacées. Plante succulente, elle est recouverte de vésicules emplies d'eau, qui lui donnent un aspect « glacé », très décoratif, d'où elle tire

son nom. Les jeunes pousses et les jeunes feuilles, au goût iodé, sont consommées.

Cette plante est une vedette scientifique, car utilisée comme modèle pour étudier le passage de la photosynthèse C3 à la photosynthèse CAM, et pour sa remarquable tolérance au stress salin : pour des milieux difficiles, elle soulève beaucoup d'intérêt agronomique.

On suivra, richelieusement, les températures cardinales de germination qui sont de 8 °C pour la minimale, de 36 °C pour la maximale et de 26 °C pour l'optimale (Cha et al., 2016). Cette germination (sortie de la radicule, pas la levée) a lieu en deux ou trois jours, les graines les plus grosses germant avant les autres. La graine est petite (PMG=0.15-3 g) et ne doit être pas (ou alors peu) enterrée au semis.

La croissance de la plante suit alors cinq phases. La phase du semis à la plantule, formée de deux cotylédons discrets, dure de sept à dix jours. La phase juvénile, assez lente, est déterminée et voit l'apparition de sept paires opposées de feuilles primaires, assez grandes : une par semaine. La phase mature, plus explosive, est indéterminée et commence par l'arrêt de la croissance de la tige primaire et l'apparition de tiges, surtout à partir des aisselles des feuilles primaires 2, 3 et 4, et de feuilles secondaires plus petites. C'est dans cette phase que la plante passe d'une photosynthèse de type C3 à une photosynthèse de type CAM et est donc capable de bien résister aux fortes températures et au stress hydrique. Les feuilles primaires disparaissent alors, et il suit une phase de floraison (elle est essentiellement autopollinisée), puis une phase de fructification avec l'apparition de capsules dotées de plusieurs graines. Le cycle de vie complet est de quatre à cinq mois.

C'est une plante originaire du désert et non-résistante aux basses températures, à installer après les derniers gels donc ; sa température de croissance s'étale de 12 °C à 30 °C. Elle demande une exposition ensoleillée qu'elle peut exploiter grâce à son type de photosynthèse. Elle résiste fort bien au stress hydrique dans sa phase mature, mais pour une bonne croissance lors de la phase juvénile, l'arrosage doit être régulier. Elle croît mieux avec un niveau de salinité modéré dans son irrigation, ce qu'on va éviter au jardin ; cela peut cependant être utilisé pour une culture en pot (ou en hydroponie). La ficoïde glaciale peut être cultivée sur sols pauvres, mais elle répond bien à la fertilisation.

Sa croissance et son étalement peuvent être importants[594], on choisira donc un espacement en conséquence.

Il est probablement judicieux de semer la ficoïde glaciale à l'intérieur, vers le 15 avril, pour la protéger du froid, puis de la planter au bout d'un mois et de l'arroser ensuite régulièrement, pendant un mois supplémentaire : elle sera bien en place, au moment des fortes chaleurs d'été, dans sa phase mature. Je n'ai pu trouver aucune information concernant son désherbage ou des problèmes éventuels (prédateurs et maladies).

On ne récolte pas les feuilles primaires, pour ne pas épuiser la plante dans sa phase juvénile, mais plutôt les jeunes pousses tendres dans sa phase mature, lorsque de nombreuses ramifications se sont développées. La ficoïde glaciale ne se conserve pas bien, deux ou trois jours seulement, en conditions froides et humides.

Pour l'heure, il n'existe pas de cultivars, on utilise l'espèce type.

Adams, P., Nelson, D. E., Yamada, S., Chmara, W., Jensen, R. G., Bohnert, H. J., & Griffiths, H. (1998). Growth and development of Mesembryanthemum crystallinum (Aizoaceae). *The New Phytologist*, *138*(2), 171-190.

Atzori, G. (2021). The Potential of Edible Halophytes as New Crops in Saline Agriculture: The Ice Plant (Mesembryanthemum crystallinum L.) Case Study. In K. Negacz, P. Vellinga, E. Barrett-Lennard, R. Choukr-Allah and T. Elzenga (Eds.), *Future of Sustainable Agriculture in Saline Environments* (p. 443-460). CRC Press.

Bohnert, H. J., & Cushman, J. C. (2000). The Ice Plant Cometh: Lessons in Abiotic StressTolerance. *Journal of Plant Growth Regulation*, *19*(3), 334-346.

Cha, M. K., Park, K. S., & Cho, Y. Y. (2016). Estimation of cardinal temperatures for germination of seeds from the common ice plant using bilinear, parabolic, and beta distribution models. *Horticultural Science and Technology, 34*(2), 236-241.

[594] Les tiges peuvent faire un mètre et le poids de la plante 20 kilos, en situation idéale...

Herppich, W. B., Huyskens-Keil, S., & Schreiner, M. (2012). Effects of saline irrigation on growth, physiology and quality of Mesembryanthemum crystallinum L., a rare vegetable crop. *Journal of Applied Botany and Food Quality*, *82*(1), 47-54.

16.5 Maïs

Avec le maïs (*Zea mays*), nous entrons dans une autre dimension : c'est, en effet, l'une des trois plus grandes cultures alimentaires mondiales. Au point de vue de la recherche, le nombre d'articles qui lui sont consacrés dans les plus grandes revues scientifiques est impressionnant (Yuan & Sun, 2020) ; on connaît, par conséquent, très bien cette plante et sa culture. C'est une « plante modèle », sur laquelle ont été découverts les transposons, et une des premières plantes cultivées dont le génome a été entièrement séquencé. Le maïs a été domestiqué, il y a dix mille ans, et fut divinisé par les civilisations anciennes d'Amérique Centrale, lieu où une grande partie de la cuisine est, aujourd'hui encore, basée sur son utilisation. *Maïs que nada !* Pourtant, c'est une production peu courante dans les potagers français, pour des raisons culturelles, et peut-être de disponibilité d'espace.

Le maïs est une plante annuelle, monocotylédone, herbacée, pouvant s'élever de 1.5 à 3 mètres (voire jusqu'à 9 mètres dans certaines conditions !), de la famille des poacées. Dans un potager, il est possible de cultiver trois groupes de maïs : le maïs doux qui se différencie du maïs grain par son goût plus sucré, le maïs pop-corn et le bébé-maïs, dont on consomme l'épi complet.

Toutefois, pour saisir les ressemblances et différences de pratique culturale entre ces trois groupes, il est bon de commencer par décrire la morphologie et la croissance de ce végétal. Tous les maïs suivent les mêmes étapes de développement (Ciampitti et al., 2016), le nombre de feuilles peut cependant varier, et surtout, le temps entre chaque étape, selon le cultivar et l'environnement. Du côté de la croissance souterraine, une racine primaire commence à se développer, suivie par des racines de surface. Ce sont ces dernières qui iront chercher les nutriments et l'eau, ce qui explique que le maïs a besoin d'humidité et de nutriments dans la couche supérieure du sol. Plus tard, il y a apparition de racines aériennes qui servent plutôt à assurer l'ancrage

de la plante et à lui éviter la « verse », ce qui n'est pas toujours possible en zone ventée[595].

Du côté de la croissance aérienne, des feuilles alternes apparaissent successivement, avec une gaine enserrant la tige. On décrit le développement végétatif du maïs par des stades qui correspondent au nombre de feuilles. On distingue classiquement : le stade émergent (VE), le stade où l'on voit (le collet de) la première (petite) feuille (V1), la deuxième feuille (V2), etc. Au stade V6 se produit la dégénérescence de la première feuille et une accélération de la croissance, qui demande donc la présence de nutriments. Au stade V10, on assiste aux débuts de la formation des épis, à l'aisselle des feuilles du centre de la tige, et de l'inflorescence mâle, au sommet de la tige principale ; la demande en eau va alors croître jusqu'à la reproduction. Le stade végétatif cesse avec Vn (souvent $16 \leq n \leq 22$, selon les cultivars), puis VT qui est le moment de l'apparition de l'ensemble de la panicule de fleurs mâles (tassel). Le stade de reproduction comprend alors R1 (apparition des inflorescences femelles, plus précisément de leurs stigmates appelés soies). Il y a une soie par grain, ce qui explique, si la pollinisation se passe mal, que l'épi ne contienne qu'une partie des grains développés. Une fois les soies pollinisées, les épis vont se remplir, les grains vont grossir pour atteindre le stade R2 (le grain est blanc) et R3 (stade laiteux, le grain est devenu jaune). Ce stade passé, le sucre va se convertir en amidon et le grain va perdre en humidité, jusqu'à donner des grains matures en R6. Notons enfin, qu'il peut apparaître des tiges secondaires à la base de la plante (tallage), qu'on conseille de ne pas retirer, même si elles ne seront probablement pas productives, car l'intérêt de leur suppression n'est pas établi.

Pour donner des repères temporels grossiers sur la croissance de la plante (Rubatzky & Yamaguchi, 2012) : autour de cinquante jours, les feuilles arrêtent pratiquement de pousser ; rapidement, cinq jours plus tard, la panicule de fleurs mâles est complètement sortie ; dix jours plus tard, c'est au tour des soies, ce qui coïncide avec l'arrêt de croissance de la tige ; vers le quatre-vingt cinquième jour, arrive le stade laiteux R3 ; la maturité des grains demande 115 jours.

---

[595] Prévoir donc une protection...

Cependant, le nombre de jours n'est pas forcément le bon indicateur, car la température joue énormément sur la croissance : c'est pourquoi la méthode des degrés-jours (GDD) est souvent préférée. La température de base est de 10 °C et la température plafond de 30 °C pour le maïs. Toutefois, dans un potager, sa mise au point[596] n'est pas réaliste.

Passons, à présent, à la composition du grain de maïs, il contient des glucides, principalement des sucres lents (amidon), mais aussi des sucres rapides qui donnent le goût sucré, des protéines, des lipides, des fibres alimentaires, des minéraux (notamment du potassium) et quelques vitamines (bêta-carotène ou provitamine A). C'est une céréale sans gluten, mais il est consommé comme un légume au potager. Le maïs doux provient d'une mutation génétique naturelle qui limite la transformation des sucres en amidon. Il faut, toutefois, pour obtenir la meilleure qualité possible, le cueillir à un stade particulier de maturation des grains (stade laiteux R3), sans attendre la maturation complète. Le maïs pop-corn a un grain qui contient beaucoup d'amidon très dur. Il comporte souvent plus d'épis, parfois en couleurs, qui sont plus petits. On doit laisser le grain atteindre la maturité complète en R6 pour baisser son taux d'humidité, et dès lors, pouvoir réussir l'explosion à la cuisson. Son cycle de production est le plus long. Dans le bébé-maïs, on mange l'ensemble de l'épi avec la rafle, généralement après l'avoir bouilli à l'eau. On le cueille plus tôt, avant la pollinisation, vers le stade R1. Il s'agit donc d'un cycle de production très court.

Les températures cardinales de germination sont de 9 °C pour la minimale, de 42 °C pour la maximale et de 35 °C pour l'optimale (avec un plateau sur 31-37 °C), selon Andrade et al. (2018). La profondeur de semis varie de 3 à 5 cm, mais elle est un paramètre secondaire, par rapport à la température du sol (Alessi et Power, 1971) ; et il est possible d'aller plus profondément, si le sol est sec, pour trouver de l'humidité. Le semis direct est le plus souvent employé, mais il est intéressant de réaliser des plants, particulièrement à petite échelle dans

[596] En fait, la méthode doit être réglée selon le cultivar et le contexte, sans quoi elle n'est pas plus précise que la technique des jours ou tout simplement l'observation directe des stades de développement.

un jardin potager. Di Benedetto et Rattin (2008) soulignent que les transplants ont un taux d'émergence incomparable, que cette émergence est uniforme et que l'espacement sera choisi, conduisant donc à un établissement équilibré des plantes. (Sachant que le prix des graines hybrides est élevé et qu'il vaut mieux ne pas gâcher...) Sans parler du gain de temps d'occupation du terrain, du fait qu'il faut profiter d'une saison chaude, un peu courte parfois, et de l'avance prise sur les mauvaises herbes ! Même si le maïs n'est pas une plante qui se transplante très bien (en tout cas, pas à racines nues), on obtient un bon résultat en évitant les restrictions de racines. Pour ce faire, Céccoli et al. (2014) suggèrent d'employer des contenants assez grands (40 voire même 120 cm^3), de ne pas garder les transplants trop longtemps (entre deux et trois semaines) et de les planter serrés à 25-30 cm d'écart.

Le maïs est une culture de saison chaude, ses températures de croissance s'étendent de 10 à 35 °C, mais sont optimales entre 15 et 25 °C (Maynard & Hochmuth, 2006). Au-dessous de 5 °C, il peut y avoir des dommages, néanmoins, un léger froid n'est pas trop grave au stade de plantule. Ensuite, la chaleur est, en revanche, indispensable à une bonne croissance. Le maïs est une plante C4 qui a besoin de beaucoup de lumière, ce qui explique que les plants devront être relativement espacés, pour ne pas diminuer la production. L'espacement est classiquement de 20–30×75–105 (cm), il est possible de réduire un peu pour des plantations semées précocement, qui germent moins bien du fait de la fraîcheur du sol. En ce qui concerne l'implantation, elle ne doit pas se faire sur une seule longue ligne, mais sur plusieurs lignes parallèles (plus courtes), pour des raisons de bonne pollinisation, qui s'effectue par le vent. Une pollinisation manuelle est également assez simple et doit se réaliser le matin, au moment où le pollen est relâché. Il est aussi possible de planter en quinconce, et pour atteindre la densité moyenne[597], on arrive à un intra-rang de 45 cm. Pour ne pas perdre trop d'espace au sol, il est courant d'associer la culture avec des cucurbitacées, voire des haricots grimpants, comme dans la *milpa*. En revanche, il ne faut pas mélanger les groupes de

[597] En résolvant $75\times(20+30)/2= \sqrt{3}/2\times x^2$.

maïs, car le gène « sucré » est récessif et un croisement avec un autre type lui ferait perdre cette qualité. Il est possible de réaliser des successions pour éviter ces inconvénients, en employant transplants et variétés à cycle court (bébé-maïs) pour rester en saison chaude.

Il faut vraiment une bonne fertilité pour le maïs, avec de l'ordre de 135–155 N / 45–135 P_2O_5 / 45–135 K_2O (kg/ha ; Table 4.37, Maynard & Hochmuth, 2006). L'azote est particulièrement nécessaire dans une période de croissance rapide (entre le stade V10 et le stade R1 de l'apparition des soies) ; la fertilisation fractionnée s'opère souvent au stade V6. Bien que l'immobilisation soit importante, une grande quantité des résidus peut être rendue au sol après la culture : l'exportation est donc raisonnable.

En ce qui concerne l'irrigation, la culture du maïs est réputée gourmande, ce qui est vrai et faux. Faux, parce que le maïs consomme moins que d'autres céréales, du fait qu'il s'agit d'une plante C4, donc plus efficace dans l'utilisation de l'eau. Vrai, car cette demande se passe en plein été, au moment où le climat impose plus de transpiration aux végétaux et où la réserve utile est la plus basse : ce qui nécessite d'irriguer. Il faut surtout arroser après la sortie des soies, pour une bonne pollinisation[598], et continuer pour une bonne production des épis.

Les plants de maïs étant espacés et la fertilisation importante, ceci laisse donc un boulevard aux mauvaises herbes. Tursun et al. (2016) citent des pertes de récolte de l'ordre de 38-65 % sans désherbage ; et dépassent même ces seuils dans leur propre étude ! Ils proposent une période critique[599] : pour le maïs doux, s'étalant de 22 JAE[600] (190GDD ; stade V2) à 59 JAE (620GDD ; stade V10) ; et pour le maïs pop-corn, s'étalant de 13 JAE (100GDD ; stade VE-V1) à 57 JAE (645GDD ; stade V10). Williams (2006) obtient des résultats un peu étranges, mais la conclusion que l'on peut tirer de son travail est de soigner encore plus le désherbage pour les plantations précoces (mai) que pour les plantations plus tardives (juin), lorsque le maïs, plante

---

[598] Qui est difficile avec des températures élevées (35 °C).

[599] J'ai réalisé une moyenne de leurs deux années de tests.

[600] Jours après émergence.

C4, devient nettement plus compétitif. On peut donc partir sur deux ou trois désherbages, le deuxième pouvant être combiné, avec profit, à un buttage (Nath et al., 2020). Attention, dans ces opérations, car les racines du maïs sont vraiment en surface. Pour le bébé-maïs, Soon et Gupta (2017) annoncent un désherbage 15 jours après le semis, suivi 10 jours plus tard d'un désherbage couplé avec un buttage, et éventuellement de suppressions ponctuelles par la suite, si c'est nécessaire. Pour le bébé-maïs, on peut également enlever l'inflorescence mâle, pour éviter la pollinisation.

Les ravageurs du maïs sont innombrables, on se contentera de citer la chrysomèle du maïs (*Diabrotica virgifera*), la pyrale du maïs (*Ostrinia nubilalis*), le taupin (*Agriotes lineatus*) et la noctuelle du maïs (*Sesamia vuetaria*). Du côté des maladies, on a également l'embarras du choix et on relèvera les nécroses racinaires (*Pythiums*, *Fusariums*...), l'helminthosporiose, le charbon commun (*Ustilago maydis*), la rouille du maïs (*Puccinia sorghi*)...

Chaque plante produit un gros épi pour le maïs doux, voire deux. La récolte se fait de 17 à 24 jours après l'émergence des soies. Pour cueillir les épis, on les penche vers le bas, tout en donnant un petit tour sur le côté et en tirant : un petit coup de main qui permet de ne pas abîmer la tige. Le maïs doux ne dure guère, et pour garder le maximum de sucres, la respiration de l'épi récolté doit être limitée. On ôte l'enveloppe de l'épi (les spathes), la température doit être basse (0 °C) et le taux d'humidité élevé. On ne peut garder l'épi de maïs doux que 2-3 jours au réfrigérateur sans perte de qualité. Pour le bébé-maïs, on cueille donc à l'émergence des soies ou juste quelques jours après. L'épi doit faire 5-10 cm de long pour 1.5 cm de diamètre. On récolte avec un sécateur, afin de ne pas abîmer l'épi, de préférence le matin, pour éviter la chaleur. Il vaut mieux le plonger tout de suite dans l'eau très froide pour en baisser la température, enlever les spathes, puis le mettre au réfrigérateur. Le maïs pop-corn est récolté à maturité (pour perdre un peu d'eau), on enlève les spathes et on le fait sécher trois semaines, sinon il restera trop d'eau dans le grain et il ne pourra exploser à la cuisson.

Les cultivars de maïs sont très nombreux, il en existe de spécifiques pour le maïs doux[601] et même super-doux, le maïs pop-corn et le bébé-maïs. On trouve différentes couleurs de grains. Il existe également des cultivars précoces, de saison et tardifs ; et d'autres à maturité rapide ou plus lente. Il est important de savoir qu'il y a des cultivars de jours longs qui conviennent à nos régions tempérées (on veut des épis en été) et des cultivars de jours courts, qui n'arriveront probablement pas à maturité, mais en revanche, feront une végétation impressionnante. Enfin, certains possèdent différentes résistances aux maladies. Bien qu'il existe des variétés-populations, les graines hybrides sont un peu la règle dans le domaine du maïs qui bénéficie d'un fort effet d'hétérosis. Le maïs serait l'occasion d'une discussion intelligente et pacifiée sur les OGM[602]. Je plaisante.

Pour rappel, la plante est monoïque et protandre, ce qui encourage la pollinisation croisée (95 %) qui a lieu par le vent, le matin (moment de production du pollen). Si on souhaite produire ses propres graines, il faut, d'une part, qu'elles soient de variétés-populations, et d'autre part, qu'il n'y ait surtout pas de pollinisation croisée avec des cultivars de groupes différents (pop-corn, doux, bébé ou grain) pouvant lui faire perdre ses caractéristiques ; on évitera plus simplement le croisement avec un autre cultivar. Le grain est en fait un caryopse, c'est-à-dire un fruit à une seule graine.

Alessi, J., & Power, J. F. (1971). Corn emergence in relation to soil temperature and seeding depth 1. *Agronomy Journal*, *63*(5), 717-719.

Andrade, J. A., Cadima, J., & Abreu, F. M. (2018). Modeling germination rate and cardinal temperatures of seven mediterranean crops. *Journal of Crop Improvement*, *32*(6), 878-902.

[601] D'après Di Benedetto et Rattle (2008), les hybrides avec gène su1 sont plus adaptés pour des climats à printemps froid et humide que ceux avec se1 ou sh2.

[602] Par exemple, lire Gewin (2003) qui est en accès libre.

Di Benedetto, A., & Rattin, J. (2008). Transplant in sweet maize: A tool for improving productivity. *The Americas Journal of Plant Science and Biotechnology*, *2*(2), 96-108.

Céccoli, G., Ortega, L. I., Gariglio, N. F., Favaro, J. C., & Bouzo, C. A. (2014). *Sweet corn (Zea mays L.) growth and yield are influenced by establishment methods*. South African National Biodiversity Institute.

Ciampitti, I., Elmore, R., Lauer, J. (2016) Corn Growth and Development. Kansas State University Agricultural Experiment Station and Cooperative Extension Service. http://www.bookstore.ksre.ksu.edu/pubs/MF3305.pdf

Gewin, V. (2003). Genetically modified corn—environmental benefits and risks. *PLoS Biology*, *1*(1), e8.

Maynard, D. N., & Hochmuth, G. J. (2006). *Knott's handbook for vegetable growers*. John Wiley & Sons.

Nath, A., Malik, N., Singh, V. K., Shukla, A., & Chandra, R. (2020). Effect of different tillage and earthing up practices on growth and productivity of maize crop (Zea mays L.) in Tarai region of Uttarakhand. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, *9*(5), 2561-2565.

Rangarajan, A., Ingall, B., Orfanedes, M., & Wolfe, D. (2002). In-row spacing and cultivar affects ear yield and quality of early-planted sweet corn. *HortTechnology*, *12*(3), 410-415.

Rubatzky, V. E., & Yamaguchi, M. (2012). *World vegetables: principles, production, and nutritive values*. Springer Science & Business Media.

Scott, M.P., & Emery, M. (2016). Maize: Overview. In C. Wrigley, H. Corke, K. Seetharaman and J. Faubion (Eds.), *Encyclopedia of Food Grains* (Second Edition, p. 99-104). Academic Press.

Sood, S., & Gupta, N. (2017). Baby corn. In M.K. Rana (Ed.), *Vegetable crop science*. (p. 625-636). CRC Press.

Tursun, N., -Datta, A., Sakinmaz, M. S., Kantarci, Z., Knezevic, S. Z., & Chauhan, B. S. (2016). The critical period for weed control in three corn (Zea mays L.) types. *Crop Protection*, *90*, 59-65.

Williams, M. M. (2006). Planting date influences critical period of weed control in sweet corn. *Weed Science*, *54*(5), 928-933.

Yuan, B., & Sun, J. (2020). Mapping the scientific research on maize or corn: a bibliometric analysis of top papers during 2008-2018. *Maydica*, *65*(2).

16.6 Patate douce

La patate douce (*ipomoea batatas*) est une plante herbacée, coureuse, pérenne en climat chaud, mais cultivée comme annuelle. Appartenant à la famille des convolvulacées, peu présente au potager, c'est une bonne candidate pour allonger une rotation. Les tentatives d'établissement de variétés botaniques ont échoué à la vue de sa diversité : la forme et la couleur des feuilles varient ; la racine de réserve varie aussi, en ce qui concerne sa forme, la couleur de sa peau, de sa chair et son contenu en amidon ou en sucres.

Ramenée en Europe, sans droits de douane, par Christophe Colomb, lors de son premier voyage, elle est d'origine tropicale et subtropicale, essentiellement cultivée entre l'équateur et la latitude 40°, ce qui semble exclure la France métropolitaine. Dans un contexte de changement climatique (Sawicka et al., 2021), avec divers aménagements, elle pourrait cependant devenir une culture de référence, au moins pour la partie sud de l'Hexagone.

La racine de réserve – une portion renflée de la racine – se consomme de multiples façons (purée, frites, gratin...) et mérite une meilleure intégration dans la cuisine française. En effet, comme le montre Drewnowski (2013), il s'agit d'un aliment aux qualités nutritives exceptionnelles, en tout cas 50 % plus nutritif que la pomme de terre. Elle ne contient pas de gluten et peut être consommée raisonnablement par les diabétiques.

16.6.1 Multiplication de la patate douce

On prendra soin de partir d'un cultivar adapté à la culture en zone tempérée. La multiplication de la patate douce est, en pratique, végétative. Elle peut se faire, premièrement, en plantant directement les racines de réserve, mais George et al. (2012), dans une revue de littérature sur ce sujet, rappellent que la production est généralement moindre et de moins bonne qualité, sauf à choisir des cultivars très particuliers et en employant des techniques assez complexes (pré-

germination, bonne taille des morceaux employés, arrosage optimisé, etc.).

Deuxièmement, dans les pays tropicaux, où la culture se pratique toute l'année, il suffit alors de couper les extrémités des tiges et de les planter directement, méthode qui n'est pas envisageable sous nos latitudes métropolitaines.

Troisièmement, les organes de réserve sont mis à germer[603], et les tiges en résultant vont être employées comme des boutures : c'est la méthode de référence. La procédure comprend, selon les cas, une ou deux étapes. On doit, dans une première étape, faire germer la racine de réserve qui ne connaît pas de dormance, soit en la plongeant, en partie, dans l'eau, soit dans un substrat humide. Au bout d'un ou deux mois, des racines et des tiges apparaissent. On prélève ces dernières. Il est alors possible, soit de planter directement ces boutures, soit d'entrer dans une seconde étape, qui consiste à faire apparaître des racines sur ces boutures en utilisant, à nouveau, soit de l'eau, soit un contenant rempli de terreau (en enterrant un ou deux nœuds). Cette étape, qui prend encore un à deux mois, permettra un meilleur établissement au champ (Ozturk, 2021).

Il y a quand même plusieurs difficultés. La première est qu'il faut assurer une température proche de 28-30 °C, la durée des deux étapes précédentes en est réduite d'autant. La deuxième est qu'il faut également une luminosité importante. Sans compter que l'humidité est essentielle, tout au long du processus. Cette opération de multiplication est donc difficile à mettre en œuvre pour un amateur[604] et on peut se contenter d'aller acheter ses plants en jardinerie[605].

---

[603] On écarte les techniques qui permettent *in-vitro* de développer des tiges à partir de méristèmes.

[604] Voir à ce sujet les tutoriels qui ne manquent pas sur des plates-formes de vidéos, avec des astuces diverses pour réunir des conditions favorables. On peut commencer par André Abrahami, qui y consacre plusieurs vidéos : https://www.youtube.com/@AndreAbrahami

Pour avoir une idée de ce que font les professionnels, on peut lire Islam et al. (2006) qui produisent des plants en 15 jours à partir d'un seul nœud, mais dans des environnements complètement contrôlés.

[605] Ce qui peut aussi éliminer d'autres problèmes, comme celui de la transmission des virus par l'opération de bouturage ou la présence d'anti-germinatif...

Il y a d'autres subtilités dans l'opération. Il faut trouver un compromis entre le nombre de nœuds sur une bouture et le nombre de boutures. Plus la bouture possède de nœuds, dont une partie seront enterrés, plus le succès est au rendez-vous... mais moins nous avons de boutures. Un nombre assez classique est de sélectionner trois nœuds et d'en enterrer un. Sur une tige, les boutures prises à la base semblent moins bien se développer, celles situées au centre sont les meilleures et celles du haut de la tige doivent se voir retirer le bourgeon apical pour en diminuer la dominance, permettre une ramification et un enracinement plus aisés (NetsaiŁ et al., 2019). Lorsque la bouture est plantée, que ce soit lors de la seconde étape ou dans le champ, il faut le faire verticalement et dans le sens « normal », c'est-à-dire en ne plantant pas les nœuds du bas vers le haut (Belehu & Hammes, 2004).

16.6.2 Culture de la patate douce

La patate douce est d'abord la « patate chaude ». La température idéale pour la croissance des feuilles s'étale de 20 à 30 °C, avec un optimum autour de 25 °C. Au-delà de 38 °C, elle devient problématique. Elle s'arrête au-dessous de 15 °C, elle peut subir des dommages à moins de 10 °C et elle est, bien entendu, gélive. Conséquemment, on attendra mai pour les implanter (voire, on utilisera des mini-tunnels ou une serre pour augmenter la température). Trois étapes se distinguent dans la croissance de la patate douce : primo, après la plantation, et durant trois semaines, une forte croissance des racines, et plus modérée des feuilles et tiges ; secundo, une forte croissance des feuilles et des tiges, jusqu'à deux mois après la plantation, avec initiation des racines de réserve (au bout d'un mois) ; et tertio, l'élargissement des organes de réserve, les racines et les feuilles ralentissant leur croissance. Le cycle complet de la patate douce est de quatre à six mois. Ce sont les jours courts et les températures un peu plus basses qui permettent le renflement de la racine, et dans les pays tropicaux, la floraison.

On visera deux à trois plants par mètre carré. Les sols les plus adéquats sont ceux qui ne sont pas trop lourds et bien drainés ; le drainage est parfois amélioré par une culture en billons. La patate douce s'en sort bien, même en sols pas très fertiles, d'ailleurs les sols

très riches entraînent des racines de réserve énormes, et parfois, craquées. En ce qui concerne la fertilisation, il vaut mieux ne pas trop forcer sur l'azote, pour éviter une croissance foliaire excessive, au détriment des organes de réserve : la principale exigence étant celle du potassium. Ali et al. (2009) conseillent 64 N / 45 P / 77 K (kg/ha).

Il ne faut pas confondre la patate douce et la « patate douche ». Si elle demande une irrigation régulière durant le premier mois (80 % de la capacité au champ), elle est ensuite plus tolérante à la sécheresse, particulièrement pendant le quatrième et le cinquième mois. Toutefois, en évitant absolument l'hydromorphie, une irrigation régulière (25-30 mm chaque semaine, selon les précipitations) améliorera la productivité.

La plante est couvrante et ne demande qu'un désherbage à ses débuts. Trois semaines après la plantation, les tiges se développent rapidement et c'est le bon moment pour effectuer ce désherbage. Une solution intéressante est de planter la patate douce sur bâche. Cela permet à la fois de monter en chaleur, de limiter l'évaporation et de supprimer le désherbage ; cela évite également l'enracinement aux nœuds, qui est parfois suspecté de distraire des nutriments de la racine principale. Une pratique qui reste à évaluer scientifiquement est celle qui consiste à déplacer les tiges au début de la croissance, afin d'éviter cet enracinement aux nœuds.

La patate douce ne manque ni de ravageurs, ni de maladies. À ce sujet, je renvoie le lecteur non-dépressif à l'article de Johnson et Gurr (2016).

On récolte, avant les premiers gels, de l'ordre de cinq à dix racines par plant. Un peu avant, le feuillage est parfois retiré pour que la peau de la patate douce s'épaississe. Il faut d'ailleurs être précautionneux en sortant les patates du sol : il est facile de les abîmer. Maintenant, est-ce que la patate douce dure ? Pas tellement, il n'est pas forcément simple de stocker longuement les patates douces, car il faut combiner une température de 13-16 °C avec une forte humidité relative (85-90 %).

Il existe de nombreux cultivars de patate douce, qui sont en fait des clones. Il y a enfin des cultivars plus ou moins adaptés aux zones tempérées.

16.6.3 Récolte duale de la patate douce

Jusqu'ici, nous nous sommes concentrés sur la consommation de la racine de réserve de la patate douce. Or, ses jeunes feuilles et ses pousses se consomment également, en salade, en soupe... On l'utilise parfois comme fourrage. Une dernière motivation peut être de ne pas se laisser envahir trop de surface (et d'utiliser cette biomasse, bien sûr !).

La question est de savoir quelle est la conséquence du prélèvement des pousses sur la production des racines de réserve. En théorie, deux phénomènes jouent dans un tel prélèvement. D'une part, en ôtant des feuilles, on réduit la photosynthèse, ce qui, ultimement, réduit l'alimentation des racines de réserve. D'autre part, la taille supprime la dominance apicale, permet la ramification de la plante et peut-être plus de biomasse foliaire.

Il est difficile de trancher simplement cette question, mais ce qui semble clair, c'est que la taille ne peut que marginalement augmenter la productivité des racines de réserve ; elle peut surtout la faire grandement chuter, si elle est pratiquée trop tôt, de façon trop importante ou trop répétée. Un compromis intéressant semble avoir été trouvé par Netsail et al. (2019) en prélevant, à 50 jours après la plantation, de l'ordre de 25 % des tiges et feuilles. On conserve alors la productivité des racines de réserve, tout en obtenant une récolte de biomasse foliaire plus importante au total (en pouvant, en même temps, en consommer une partie).

Ali, M. R., Costa, D. J., Abedin, M. J., Sayed, M. A., & Basak, N. C. (2009). Effect of fertilizer and variety on the yield of sweet potato. *Bangladesh Journal of Agricultural Research, 34*(3), 473-480.

Aniekwe, N. L. (2014). Influence of pinching back on the growth and yield parameters of sweet potato varieties in Southeastern Nigeria. *Journal of Animal and Plant Sciences*, *20*(3), 3194-3201.

Belehu, T., & Hammes, P. S. (2004). Effect of temperature, soil moisture content and type of cutting on establishment of sweet potato cuttings. *South African Journal of Plant and Soil*, *21*(2), 85-89.

Dahniya, M. T., Hahn, S. K., & Oputa, C. O. (1985). Effect of shoot removal on shoot and root yields of sweet potato. *Experimental Agriculture*, *21*(2), 183-186.

Drewnowski, A. (2013). New metrics of affordable nutrition: which vegetables provide most nutrients for least cost?. *Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics*, *113*(9), 1182-1187.

George, N. A., Pecota, K. V., Bowen, B. D., Schultheis, J. R., & Yencho, G. C. (2011). Root piece planting in sweetpotato—A synthesis of previous research and directions for the future. *HortTechnology*, *21*(6), 703-711.

Islam, A. S., Kubota, C., Takagaki, M., & Kozai, T. (2006). Effects of ages of plug transplants and planting depths on the growth and yield of sweetpotato. *Scientia Horticulturae*, *108*(2), 121-126.

Johnson, A. C., & Gurr, G. M. (2016). Invertebrate pests and diseases of sweetpotato (Ipomoea batatas): a review and identification of research priorities for smallholder production. *Annals of Applied Biology*, *168*(3), 291-320.

Kotecha, P. M., & Kadam, S. S. (1998). Sweet potato. In D.K. Salunke and S.S. Kadam (Eds.), *Handbook of Vegetable and Technology* (p. 71-98). New-York, Taylor & Francis.

Lebot, V. (2010). Sweet Potato. In J. Bradshaw (Ed.) *Root and Tuber Crops. Handbook of Plant Breeding*, vol 7 (p. 97-125). Springer, New York, NY.

NetsaiŁ, N., Moses, M., & Tuarira, M. (2019). Effect of cutting position and vine pruning level on yield of Sweet Potato (Ipomoea Batatas L.). *Journal of Aridland Agriculture*, *5*, 1-5.

Ozturk, G. (2021). Field performances of different seedling types used in sweet potato [Ipomea batatas (L.) Lam] growing. *Turkish Journal of Field Crops*, *26*(1), 54-59.

Rubatzky, V. E., & Yamaguchi, M. (2012). *World vegetables: principles, production, and nutritive values*. Springer Science & Business Media (pp. 130-146).

Sawicka, B., Krochmal-Marczak, B., Otekunrin, O. A., & Skiba, D. (2021). Sweet potato (Ipomoea batatas L.[Lam]) as an alternative to climate change in Europe. In *International Conference on Emerging Technology and Interdisciplinary Sciences* (p. 196-204).

Valenzuela, H., Fukuda, S., & Arakaki, A. (1994). *Sweetpotato production guides for Hawai'i* (College of Tropical Agriculture and Human Resources, Université of Hawai'i.

16.7 Pourpier

Le pourpier (*Portulaca oleracea*) est souvent considéré comme une mauvaise herbe, et une partie importante de la recherche est consacrée à son contrôle. Mais il est également une plante alimentaire intéressante, car il contient beaucoup d'oméga-3, de potassium et diverses vitamines. Les feuilles et les jeunes pousses sont consommées dans des salades d'été, typiques du régime crétois.

C'est une plante annuelle, succulente, semi-prostrée, de la famille des portulacacées. La sous-espèce cultivée (*Portulaca oleracea* subsp. *sativa*) se caractérise par un port plus vertical, ainsi que des feuilles et des graines de plus grande taille.

La graine germe mal dans l'obscurité[606] ; ceci couplé à sa petite taille (PMG=0.4 g), fait qu'elle germe au mieux à la surface du sol, et quasiment plus, à partir de 0.5 cm de profondeur. Les températures cardinales de germination (Rahimi[607] & Kafi, 2010) seraient pour la minimale de 5 °C (ce qui semble très étonnant, sachant que Wagenvoort et Bierhuizen, 1977, donnent 11 °C) et pour la maximale de 50 °C. La plage optimale pour le pourcentage de germination est de 10-40 °C. Les auteurs donnent 35 °C comme température optimale pour la vitesse de germination, mais elle est comparable dans la zone des 20 à 40 °C. Pour un semis indirect, on peut noter qu'elle semble mieux germer à une température alternée qu'à une température constante (30/20 °C pour Baskin & Baskin, 1988). Un stockage d'un an au sec améliore la germination, mais la plante, qui se ressème très facilement, est capable de plusieurs générations en une même année. La germination est rapide, cinq jours à une température du sol de 20 °C et trois jours à 25 °C d'après les équations de Wagenvoort et Bierhuizen (1977).

---

[606] Et la graine de l'année absolument pas.

[607] Je n'ai pu disposer que du résumé de cet article.

C'est une plante C4/CAM (Sage et al., 2007), de saison chaude, à installer au soleil, car à mi-ombre, sa production est considérablement réduite. Sa température de croissance optimale est de 18-32 °C et sa zone de tolérance est de 7-36 °C. Le cycle de vie est de deux à quatre mois et elle disparaît aux premiers froids. Elle est résistante à la sécheresse, mais l'irrigation est nécessaire pour garder la tendreté de ses feuilles. Elle est adaptable à tous les sols, même pauvres. Elle répond toutefois bien à la fertilisation, mais il convient d'être raisonnable, en effet, le pourpier a tendance à bio-accumuler : une fertilisation azotée excessive peut, par conséquent, conduire à une accumulation de nitrates, mais également de son contenu en acide oxalique, déjà conséquent. C'est pourquoi Santos et al. (2014) conseillent d'utiliser 60 N (kg/ha) qui constitue un bon compromis, permettant une production importante, mais dont la composition ne présente pas de risque pour la consommation humaine.

La concurrence des mauvaises herbes ne semble pas être un véritable problème pour le pourpier, qui est souvent considéré lui-même comme une mauvaise herbe. On peut choisir de l'implanter dans une version à haute densité, par un semis à la volée, sur un sol bien affiné, ce qui lui permet alors d'étouffer la concurrence. On le cueille en une seule fois dans ce cas, en jeune pousse, à 15-20 cm, voire micro-pousse, en le renouvelant régulièrement. Il est également possible d'opter pour un espacement plus grand et de pincer le pourpier pour le pousser à se ramifier et à retarder sa floraison. Dans ce cas, un semis indirect évite le maintien, toujours difficile en été, de l'humidité du sol et permet de gagner les mauvaises herbes de vitesse à l'implantation. Globalement, le pourpier est une plante peu exigeante, assez facile à cultiver en été et nutritive, c'est pourquoi elle est considérée par les agronomes comme une plante sous-exploitée.

Le pourpier est probablement assez à l'abri des problèmes ; on en extrait d'ailleurs des composants employés dans la lutte biologique. En fait, le problème est souvent posé différemment : on cherche des pathogènes pouvant permettre de le contrôler biologiquement en tant que mauvaise herbe...

Le pourpier est récolté en micro-pousse, en jeune pousse ou en jeune rameau, ou fastidieusement, feuille à feuille. Attention, toutefois, il est

l'une des plantes qui se conservent le plus mal à l'état frais (Sicari et al., 2018).

Les cultivars disponibles sont peu nombreux, essentiellement 'Pourpier Doré' (à larges feuilles) et 'Pourpier Vert' (grand vert). Il existe aussi un cultivar 'Gruner Red' à tige plus rouge, plutôt destiné aux micro-pousses.

Le pourpier fleurit rapidement, un mois à un mois et demi après la levée. Les fleurs sont hermaphrodites et ne produisent pas de nectar, intéressant donc peu les insectes. Les fleurs sont généralement auto-pollinisées ou alors la pollinisation croisée (5 %) est effectuée par le vent. Le fruit est une capsule renfermant de nombreuses graines. Les graines maturent en deux semaines. Une seule plante peut produire 10 000 graines. Il n'est, par conséquent, pas difficile de produire ses propres graines ; la seule difficulté consistant à les récupérer... vu leur petitesse !

Baskin, J. M., & Baskin, C. C. (1988). Role of temperature in regulating the timing of germination in Portulaca oleracea. *Canadian Journal of Botany*, *66*(3), 563-567.

Chauhan, B. S., & Johnson, D. E. (2009). Seed germination ecology of Portulaca oleracea L.: an important weed of rice and upland crops. *Annals of Applied Biology*, *155*(1), 61-69.

Mitich, L. W. (1997). Common purslane (Portulaca oleracea). *Weed Technology*, *11*(2), 394-397.

Miyanishi, K., & Cavers, P. B. (1980). The biology of Canadian weeds.: 40.Portulaca oleracea L. *Canadian Journal of Plant Science*, *60*(3), 953-963.

Rahimi, Z., & Kafi, M. (2010). Estimating cardinal temperatures and effect of different levels of temperature on germination indices of Purslane (Portulaca oleracea L.). *Iranian Plant Protection Research, 24*(1), 80-86

Sage, R. F., Sage, T. L., Pearcy, R. W., & Borsch, T. (2007). The taxonomic distribution of C4 photosynthesis in Amaranthaceae sensu stricto. *American Journal of Botany*, *94*(12), 1992-2003.

Santos, R. V., Machado, R. M. A., Alves-Pereira, I., & Ferreira, R. M. A. (2014). The influence of nitrogen fertilization on growth, yield, nitrate and oxalic acid concentration in purslane (Portulaca

oleracea). In *VI Balkan Symposium on Vegetables and Potatoes 1142* (p. 299-304).

Sicari, V., Loizzo, M. R., Tundis, R., Mincione, A., & Pellicano, T. M. (2018). Portulaca oleracea L.(Purslane) extracts display antioxidant and hypoglycaemic effects. *Journal of Applied Botany and Food Quality*, *91*(1), 39-46.

Srivastava, R., Srivastava, V., & Singh, A. (2021). Multipurpose benefits of an underexplored species purslane (Portulaca oleracea L.): A critical review. *Environmental Management, 72*(2), 309-320.

Wagenvoort, W. A., & Bierhuizen, J. F. (1977). Some aspects of seed germination in vegetables. II. The effect of temperature fluctuation, depth of sowing, seed size and cultivar, on heat sum and minimum temperature for germination. *Scientia Horticulturae*, *6*(4), 259-270.

16.8 Soja

Le soja (*Glycine max* (L.) Merr.) est une plante annuelle, herbacée, érigée jusqu'à 70-150 cm, de la famille des fabacées. Il s'agit d'une culture majeure pour la consommation animale. En ce qui concerne l'animal humain, nous allons distinguer le soja-grain et le soja vert. Le premier, qui constitue l'essentiel de la production, est consommé comme légume sec, mais le plus souvent, est sujet à de multiples transformations (huile, tofu, lait, sauce, etc.). Le second (*edamame* en japonais), objet de cet article, est consommé immature[608]. Il existe des cultivars spécifiques pour le soja vert, avec une taille de grain plus importante, une texture plus tendre et un goût plus agréable ; il est également plus digeste et plus simple à cuire que le soja-grain. Le soja contient énormément de protéines et un répertoire complet d'acides aminés qui devraient lui donner une place de choix dans tout régime végétarien.

[608] Après une courte cuisson des cosses, bouillies à l'eau ou à la vapeur (avec pas mal de sel, généralement) et bien d'autres techniques de préparation. La cosse, bien que comestible, est trop fibreuse, et ce sont les grains qui sont en définitive mangés. Toutefois, il existe quelques cultivars de type « mangetout ».

Les températures cardinales de germination sont assez comparables à celles du haricot vert : de 6-7 °C pour la minimale (mais compter plutôt 10 °C), de 30-35 °C pour l'optimale, et supérieure à 40 °C pour la maximale (Littlejohns & Tanner, 1976 ; Covell et al., 1986). La profondeur de semis va de 1 à 3 cm.

Pour le semis direct, on attendra la fin des derniers gels et un sol chaud. (« À la Saint Glagla, ne sème pas ton soja. ») Ce sera donc « en moyenne » à la mi-mai, pour une récolte en août : le cycle du soja vert étant plus long que celui du haricot vert, de 85 à 115 jours (Maynard & Hochmuth, 2006).

Il est également possible de réaliser des semis indirects (Kobobun, 1991), en débutant soit en pépinière, soit en contenants ; toutefois, le repiquage à racine nue est souvent décevant, et les plants en contenants reprennent nettement mieux. On plante, en général, deux à trois semaines après l'émergence (et après les derniers gels !).

Wiggans (1939) dit que l'on doit se rapprocher d'une plantation uniforme (même largeur inter-rang et intra-rang), et que la densité optimale dépend du cultivar et de la région de production. Il cite ainsi une densité optimale de 65 pl/m^2 (12.5 cm×12.5 cm) dans ses expériences, avec une variété qui est peu ramifiante. Étudiant une variété très ramifiante, Enyi (1973) arrive à un optimum de 7.5 pl/m^2 (15×90 ou 35×35 en uniforme). Kobohun (1991) indique qu'il faut prendre également en compte la saison de culture[609] et conseille 5-10 pl/m^2 en plein champ en saison normale, mais qui peut monter à 25-30 pl/m^2 (20×20) en culture forcée sous serre. Pour un espacement inter-rangs fixé à 45 cm, Keisham et al. (2021) observent, sur plusieurs cultivars, qu'il n'est pas nécessaire de descendre au-dessous de 15 cm (soit 15 pl/m^2). Notons enfin que certains cultivars sont grimpants et nécessitent un tuteurage, ce qui a des implications sur l'espacement.

Le soja est un légume de saison chaude, qui n'apprécie pas les températures inférieures à 10 °C. Les températures élevées (>30 °C) voient la photorespiration entrer en concurrence avec la photosynthèse, et ne sont pas l'optimum, qui est plutôt vers 25 °C. Mais seules des

[609] Une information surtout intéressante dans le sud de la France, qui a une longue saison chaude.

températures très élevées (>40 °C, peu courantes encore en France) nuisent à la floraison, donc à la production de grains, mais également à leur qualité.

La fertilisation azotée est un problème complexe. En effet, le soja pousse, en théorie, en symbiose avec des bactéries fixatrices (*Bradyrhizobium japonicum* et *B. elkanii*) mais peut aussi se reposer sur l'azote disponible dans le sol et sur une fertilisation supplémentaire. Dans quelle mesure jouer sur ces trois sources ? Vu la quantité de protéines dans ses grains, mais aussi dans ses feuilles, sans parler des racines voire nodosités, l'immobilisation d'azote pour du soja très productif est considérable : 400 N, voire 500 N (kg/ha). L'azote disponible dans le sol doit donc être complété, soit par une fertilisation, soit par une inoculation de bactéries fixatrices (Salvagiotti et al., 2008) ; cette solution semble la plus durable et la plus économique selon les auteurs. Sachant que les bactéries fixatrices ne sont pas présentes en Europe, mais qu'il est possible d'inoculer *Bradyrhizobium japonicum* en enrobant les semences, ce qui permet alors d'obtenir une certaine autonomie de la plante de ce côté[610], relative toutefois, car cette seule source d'azote ne répond peut-être pas à ses besoins très importants. Une petite fertilisation supplémentaire permet parfois[611] d'augmenter la production. Une remarque en tous cas, bien qu'étant une fabacée, le soja ne va pas contribuer à l'apport d'azote dans le sol pour les cultures suivantes. Devi et al. (2012) indiquent que le soja répond à la fertilisation phosphatée[612], en tout cas jusqu'à 80 P_2O_5 (kg/ha) ; que celle-ci joue non seulement son rôle habituel dans la croissance de la plante, mais augmente également, corrélativement, la fixation d'azote. Enfin, il y a aussi une réponse à la fertilisation en potassium (Pettigrew, 2008). La fertilisation « classique » indiquée par

---

[610] Sachant qu'une fois l'inoculation faite, les bactéries resteront présentes dans ce sol pendant quelques années, et qu'une nouvelle inoculation aura peu d'effets (De Bruyn et al., 2010).

[611] Mais pas toujours, car la fertilisation peut avoir un effet antagoniste sur la fixation d'azote !

[612] Fertilisation classique, mais aussi par inoculation de bactéries permettant de le rendre disponible, une méthode plus durable et également plus économique que d'aller le tirer des mines de phosphate...

Kokobun (1991) est de 40-100 N / 80-100 P / 80-120 K (kg/ha), mais Hung et al. (1991) sont sur une proposition un peu plus basse (60 N / 40-80 P / 60 K), et surtout, suggèrent qu'une inoculation avec 20 N suffisent.

L'irrigation du soja doit être particulièrement soignée à la période de floraison, jusqu'à et pendant la fructification.

Le soja en semis direct doit être maintenu désherbé pendant un mois (Burnside, 1979) ou plus précisément en semaines 2, 3, 4 et 5. Keramati et al. (2008) indiquent une période critique légèrement plus tardive et étalée de 25 jours (stade V2, voire plus loin) à 65 jours (stade R1). Thakur et Lakpale (2014) proposent de pincer la tige principale au stade six feuilles, et éventuellement, les tiges latérales 15 jours plus tard, afin de faire ramifier le plant et d'augmenter sa production.

Le soja peut souffrir d'un certain nombre de maladies (virus de la mosaïque du soja, graine pourprée du soja, mildiou sur soja) qui sont minimisées en employant des graines saines et des cultivars résistants, et en évitant une densité et une fertilisation trop élevées. Plusieurs insectes peuvent également limiter la production, en particulier la pyrale du haricot (*Etiella zinckenella*).

Le modèle de croissance du soja proposé par Fehr et Caviness (1977) commence par le stade végétatif et par l'émergence (VE), suivi du développement des cotylédons (VC). Les deux premières feuilles opposées qui apparaissent sont simples (V1) et sont ensuite suivies de feuilles alternes trifoliées (V2, V3...Vn). Le stade de reproduction passe par l'ouverture de la première fleur (R1, R2 correspondant à une floraison « complète »), par le début de l'apparition des cosses (R3, R4 toutes les cosses sont apparues), par le début de l'apparition des grains (R5) ; le stade R6 est celui où tous les grains sont présents, mais verts, c'est le stade de récolte du soja vert. Les stades R7 et R8 sont ceux de la maturité des grains, donc de la récolte du soja-grain ou de semences pour la saison suivante. Il y a cependant de petites subtilités, car le stade végétatif et le stade reproductif peuvent, plus ou moins, se superposer selon le type de détermination du cultivar ; ils peuvent, en effet, être à croissance déterminée, indéterminée, voire intermédiaire.

Le bon moment de récolte est donc le stade R6, lorsque les cosses sont remplies et sont de couleur verte[613]. Cette période est courte et la qualité des grains se détériore rapidement. L'opération de cueillette des cosses a généralement lieu le matin. On peut les plonger dans l'eau froide avant de les conserver au réfrigérateur, pour une période maximum de 15 jours (Sadashiva & Bharathkumar, 2017).

La floraison et la maturité des grains sont influencées par la photopériode, il convient de choisir des cultivars qui correspondent à nos latitudes. La fleur est cléistogame et la fécondation peut avoir lieu un jour avant l'anthèse. Par conséquent, le soja est largement autogame : le niveau de croisement étant inférieur à 1 %.

Les cultivars sont innombrables, différant en photopériode, nains ou grimpants, déterminés ou pas ; plusieurs couleurs de cosses et de grains existent et diverses résistances aux maladies sont possibles.

> Du côté de chez Stéphane : Ma façon de tenir compte des températures de germination avec les semis directs est la suivante. D'une part, je ne me base pas forcément sur la température minimale (car alors la vitesse de germination est extrêmement lente et je n'y gagne pas forcément au final, sachant qu'une mauvaise surprise est alors plus probable), mais un peu au-dessus, en l'espèce, pour le soja, ce serait 10 °C. Ce qui compte est la température du sol, j'utilise donc un thermomètre de sol et je prends une mesure à une faible profondeur, tôt le matin, lorsque la température est la plus basse, et en début d'après-midi, où elle est la plus haute : je calcule la moyenne des deux. Lorsque cette moyenne dépasse les 10 °C (disons... trois jours de suite), je peux y aller. Bien entendu, il est possible de forcer un peu en disposant, quelques temps avant, une bâche transparente sur le sol, qui augmente sa chaleur le jour et la conserve

[613] Fehr et Caviness (1977) donnent les moyennes de durée des stades : après l'apparition de la première feuille (R1), on passe aux stades suivants, en moyenne, en 3, 10, 9, 9 et 15 jours, ce qui nous amène au stade R6 de la récolte, une cinquantaine de jours plus tard.

mieux la nuit : je garde le même seuil en gagnant ainsi du temps.

Burnside, O. C. (1979). Soybean (Glycine max) growth as affected by weed removal, cultivar, and row spacing. *Weed Science*, *27*(5), 562-565.

Burton, J. W. (1997). Soyabean (Glycine max (L.) Merr.). *Field Crops Research*, *53*(1-3), 171-186.

Covell, S., Ellis, R. H., Roberts, E. H., & Summerfield, R. J. (1986). The influence of temperature on seed germination rate in grain legumes: I. A comparison of chickpea, lentil, soyabean and cowpea at constant temperatures. *Journal of Experimental Botany*, *37*(5), 705-715.

De Bruin, J. L., Pedersen, P., Conley, S. P., Gaska, J. M., Naeve, S. L., Kurle, J. E., ... & Abendroth, L. J. (2010). Probability of yield response to inoculants in fields with a history of soybean. *Crop Science*, *50*(1), 265-272.

Devi, K. N., Singh, L. N. K., Devi, T. S., Devi, H. N., Singh, T. B., Singh, K. K., & Singh, W. M. (2012). Response of soybean [Glycine max (L.) Merrill] to sources and levels of phosphorus. *Journal of Agricultural Science*, *4*(6), 44. Enyi, B. A. C. (1973). Effect of plant population on growth and yield of soya bean (Glycine max). *The Journal of Agricultural Science*, *81*(1), 131-138.

Fehr, W. R., & Caviness, C. E. (1977). *Stages of soybean development* (Vol. 80, p. 11). Ames: Iowa State University of Science and Technology.

Hung, A. T., Cheng, J. H., Ma, C. H., & Kobayashi, H. (1991). Effect of Fertilizer Management and Rhizobia Inoculation on Yield and Quality of Vegetable Soybean. In *Proceedings of Vegetable Soybean–Research Needs for Production and Quality Improvement Workshop. Asian Vegetable Research and Development Center, Shanhua, Tainan, Taiwan* (p. 73-84).

Keisham, M., Zimik, L., Laishram, B., Sharma, S., Hajarimayum, P. S. K., Yambem, S., & Newmai, Z. K. (2021). Effect of varieties and spacing on growth and yield of Soya bean [Glycine max (L.)

Merrill] in Bishnupur district of Manipur. *The Pharma Innovation Journal, 10*(1), 262-267.

Keramati, S., Pirdashti, H., Esmaili, M. A., Abbasian, A., & Habibi, M. (2008). The Critical Period of Weed Control in Soybean (Glycine max (L.) Merr.). *Pakistan Journal of Biological Sciences*, *11*(3), 463-467.

Kokobun, M. (1991, April). Cultural practices and cropping systems for vegetable soybean in Japan. In *Proceedings of Vegetable Soybean–Research Needs for Production and Quality Improvement Workshop. Asian Vegetable Research and Development Center, Shanhua, Tainan, Taiwan* (p. 53-60).

Littlejohns, D. A., & Tanner, J. W. (1976). Preliminary studies on the cold tolerance of soybean seedlings. *Canadian Journal of Plant Science*, *56*(2), 371-375.

Maynard, D. N., & Hochmuth, G. J. (2006). *Knott's handbook for vegetable growers*. John Wiley & Sons.

Pettigrew, W. T. (2008). Potassium influences on yield and quality production for maize, wheat, soybean and cotton. *Physiologia Plantarum*, *133*(4), 670-681.

Sadashiva, A.T., & BharathkumarM.V. (2017) Soybean. In M.K. Rana (Ed.), *Vegetable crop science* (p. 775-782). CRC Press.

Salvagiotti, F., Cassman, K. G., Specht, J. E., Walters, D. T., Weiss, A., & Dobermann, A. (2008). Nitrogen uptake, fixation and response to fertilizer N in soybeans: A review. *Field Crops Research*, *108*(1), 1-13.

Thakur, S., & Lakpale, R. (2014). Impact of nipping on soybean (Glycine max) plant architecture, nodulation and yield. *Indian Journal of Agronomy*, *59*(3), 477-480. (je ne dispose que du résumé)

Wang, Z. Q., Senga, E. F. B., & Wang, D. Y. (2005). Vegetable soy bean (Glycine max (L.) Merrill) from production to processing. *Outlook on Agriculture*, *34*(3), 167-172.

Wiggans, R. G. (1939). Influence of space and arrangement on the production of soybean plants. *Journal of the American Society of Agronomy*. (Je n'ai pu disposer que du résumé)

16.9 Tétragone

La tétragone cornue ou épinard de Nouvelle-Zélande (*Tetragonia tetragonioides*) est une plante herbacée, fortement ramifiée et prostrée. Elle appartient à la famille des aizoacées. Elle est cultivée comme annuelle, mais est pérenne si le climat le permet. Les feuilles succulentes se consomment comme celles des épinards, ainsi que la tige (plus précisément les jeunes pousses).

La « graine » de la tétragone est, en fait, un fruit dur qui contient plusieurs graines (2-8), dont deux germent en moyenne (Kays, 1975). Le problème de sa germination est largement reconnu, depuis la première moitié du vingtième siècle. Elle est lente, de l'ordre de deux à trois semaines (et jusqu'à trois mois !) et erratique d'un lot à l'autre ; et même à l'intérieur du même lot... C'est le standard de germination commercial le plus bas (40 %) dans Maynard et Hochmuth (2006). De nombreuses suggestions ont été faites pour l'améliorer, mais les résultats apparaissent assez incohérents, sans doute, à cause de la variabilité génétique de l'espèce. Je vais ici m'appuyer sur les travaux de Heit (1941), qui m'apparaissent assez complets. Primo, il semble qu'un passage préalable au froid soit inutile. Secundo, une température assez élevée est nécessaire : dans un bulletin d'information du ministère de l'Agriculture américain, Banadyga (1977) indique que les températures cardinales de germination pourraient être de 15 °C pour la minimale et 38 °C pour la maximale, la plage optimale s'étendant de 20 °C à 35 °C. Tertio, un trempage de 24 heures est suggéré dans de nombreux articles, mais seul, il semble peu efficace, sauf si le substrat utilisé ensuite est « assez sec ». Quarto, le trempage peut aussi être suivi d'une scarification de l'apex, soit avec un scalpel, soit avec un papier ponce. Quinto, une approche plus simple consiste à utiliser un poquet de trois graines, dès lors, en se basant sur le standard de germination, on monte à $1-(1-0.4)^3$ ~ 80 %, ce qui devient satisfaisant, mais ne résout pas le problème de la vitesse de germination. La profondeur de semis peut aller de 1 à 4 cm, mais doit plutôt rester de l'ordre de 1.5 cm.

Il s'agit d'une plante de climat chaud, elle tolère les hautes températures (étant C3/CAM, d'après Bohley et al., 2015) et les jours longs (sans monter à graines comme l'épinard !). Elle est de plus un

peu rustique (RHS=H3). Elle sera installée, après les derniers gels, à une exposition ensoleillée. La plante est halophyte, même si l'irrigation permet d'augmenter la production (Bekmirzaev et al., 2019), ainsi que sa qualité. Elle peut se contenter d'un sol assez pauvre, cependant Grubben (2004) propose une fertilisation de 100 N / 25 P_2O_5 / 150 K_2O (kg/ha) afin d'obtenir une production plus importante et des feuilles plus tendres. La tétragone semble peu sujette aux maladies et aux ravageurs (les limaces, peut-être, à l'installation).

Il y a deux stratégies principales pour l'implantation de la tétragone. La plus classique repose sur un semis à l'intérieur, un bon mois avant l'installation. Trois graines sont semées par contenant et seul le plant le plus vigoureux est conservé. Au stade 5-6 feuilles, le plant est installé avec un espacement assez grand (de 30 à 75 cm, selon l'étalement visé). La tétragone est assez efficace pour couvrir le sol et elle souffre peu de la compétition des mauvaises herbes, Roskruge (2011) propose un simple faux-semis avant la transplantation. On récolte régulièrement des pousses de 10-15 cm, qui conduisent la tétragone à se ramifier, ou plus laborieusement des feuilles. Ceci explique que Grubben (2004) considère que la tétragone, outre ses problèmes de germination, ait du mal à faire une percée commerciale, puisque sa production est faible et le travail de cueillette important. Elle est donc essentiellement restée une culture d'amateurs. La seconde stratégie proposée par Kays (1975) vise à résoudre ces deux derniers problèmes. Il choisit un semis direct serré à 2.5 cm sur des rangs espacés de 20 cm, et une récolte en une seule fois des jeunes pousses à 30 jours (récolte 50 % supérieure à 40 jours, ce qui semble valoir le coup d'attendre...). Cette seconde stratégie demande *a minima* de passer les dernières gelées[614], et peut-être un désherbage intermédiaire non évoqué par l'auteur.

Les pousses ou les feuilles peuvent se conserver deux à trois semaines à 1-2 °C et avec une bonne humidité, sinon elles sont à consommer dans la journée.

Les fleurs de la tétragone sont unisexuées ou hermaphrodites, et la plante est essentiellement autogame. Il peut donc être intéressant de

[614] À mon avis, il faut plus encore un sol très réchauffé et humide (en s'aidant éventuellement d'une bâche transparente).

produire soi-même ses graines : d'une part, pour sélectionner en une ou deux générations des plants performants (lignées pures) du point de vue de la germination ; d'autre part, si on souhaite appliquer la stratégie de semis direct serré, il faut un bon nombre de graines, or, le PMG est de 70-100 g, un paquet acheté n'en contient donc pas forcément beaucoup...

L'espèce type est cultivée ; le seul cultivar semble être 'Maori', pour l'heure pratiquement introuvable. La plante a peu fait l'objet d'efforts de sélection, alors qu'il s'agit là d'une des pistes principales pour résoudre ses problèmes de germination.

Banadyga, A. A. (1977). Greens or "Potherbs"-Chard, Collards, Kale, Mustard, Spinach, New Zealand Spinach. *Agricultural Information Bulletin-US Dept. of Agriculture*, *409*, 163-170.

Bekmirzaev, G., Beltrao, J., & Ouddane, B. (2019). Effect of irrigation water regimes on yield of Tetragonia tetragonioides. *Agriculture*, *9*(1), 22.

Bohley, K., Joos, O., Hartmann, H., Sage, R., Liede-Schumann, S., & Kadereit, G. (2015). Phylogeny of Sesuvioideae (Aizoaceae)–Biogeography, leaf anatomy and the evolution of C4 photosynthesis. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, *17*(2), 116-130.

Grubben G.J.H (2004) Tetragonia tetragonoides. In G.H.J Grubben and O.A. Denton (Eds.), *Plant resources of tropical Africa 2. Vegetables* (p. 527-529). PROTA Foundation, Wageningen, Netherlands / Backhuys Publishers, Leiden, Netherlands / CTA, Wageningen, Netherlands.

Heit, C. E., & Munn, M. T. (1941). New Zealand spinach germination studies. In *Proceedings of the Association of Official Seed Analysts* (p. 90-95). The Association of Official Seed Analysts.

Johnson, C. E. (1963). Good tests of New-Zealand spinach. In *Proceedings of the Association of Official Seed Analysts* (Vol. 53, p. 51-54). Association of Official Seed Analysts.

Justice, O. L. (1947). Observations on the germination of New Zealand spinach seed. In *Proceedings of the Association of Official Seed Analysts* (p. 120-127). Association of Official Seed Analysts.

Kalengamaliro, C. A. (2011). *A comparison of pre-soaking and pre-washing as methods of increasing beet (Beta vulgaris) and New Zealand spinach (Tetragonia tetragonioides) seed germination: a thesis presented in partial fulfilment of the requirements for the degree of Master of AgriScience in Seed Science and Technology at Massey University, Palmerston North, New Zealand* (Doctoral dissertation, Massey University).

Kays, S. J. (1975). Production of New Zealand spinach (Tetragonia expansa, Murr.) at high plant densities. *Journal of Horticultural Science*, *50*(2), 135-141.

Maynard, D. N., & Hochmuth, G. J. (2006). *Knott's handbook for vegetable growers*. John Wiley & Sons.

Roskruge, N. (2011). The commercialisation of kōkihi or New Zealand spinach (Tetragonia tetragonioides) in New Zealand. *Agronomy New Zealand, 41*, 149-156.

17 Légumes d'hiver

Qu'en dit la neige ? « Après moi la luge... mais pas la fin des récoltes ! »

17.1 Chicorées amères italiennes

Le genre *Cichorium*, qui appartient à la famille des astéracées, se divise, pour ce qui est du potager, en *Cichorium endivia* (les chicorées frisés et scaroles) et en *Cichorium intybus*. C'est de cette seconde espèce dont il sera ici question, que nous appellerons chicorée amère, et plus particulièrement, de ses versions italiennes. Il faut savoir que pour prononcer le « chi » de Chicorée en italien, il faut écrire « ci » (cicoria). Comme dans « fascisme » d'ailleurs, une autre innovation italienne.

17.1.1 Taxonomie des chicorées amères

Au sein de l'espèce des chicorées amères, on distingue une première sous-espèce sauvage (*C. intybus* subsp. *Glabratum*) et une seconde sous-espèce (*C. intybus* subsp. *intybus*) qui est aussi présente à l'état sauvage et objet de cueillettes, mais également, ce qui nous intéresse ici, présente sous des formes cultivées. Dans ces formes cultivées, deux variétés botaniques sont distinguées, qui correspondent à la partie consommée : la feuille (var. *foliosum*) ou la racine (var. *sativum*). Parmi les chicorées cultivées pour leur racine, il y a des versions pour produire des substituts du café ou de l'inuline industriellement.

C'est au sein de *Cichorium intybus* var. f*oliosum* que nous allons enfin pouvoir discriminer quatre groupes. Le groupe 'witloof', ce qu'on appelle endive en France, est d'origine bruxelloise : il demande un mode de culture très particulier et nous ne le considérerons pas dans cet article. Le deuxième groupe 'Pain de Sucre' est assez homogène, avec des plantes qui ressemblent à des choux chinois (pe-tsaï) ; il est consommé cru en France, mais aussi cuit à l'étranger (sauté, en gratin, etc.). Le troisième groupe 'Catalogna', ressemblant à de gros pissenlits très amers, est plutôt consommé cuit, mais une version particulière, la *puntarelle*, dite également chicorée-asperge, présente des pousses

internes qui peuvent se consommer crues et sont caractéristiques de la cuisine romaine. Le quatrième groupe 'Radicchio' est le plus diversifié, avec des cultivars plus ou moins pommés, à cœur généralement rouge. Cette couleur n'apparaît qu'en fin de culture, pas de panique si cela tarde à venir ! Les feuilles, aux couleurs vives et au goût puissant, sont souvent mélangées à celles d'autres salades. Les 'Radicchio' sont classés en plusieurs sous-ensembles : le premier est « de Trévise », le plus ancien, subissant souvent un forçage après récolte, mais les nouvelles versions peuvent être directement consommées ; le sous-ensemble « de Castelfranco », également ancien, avec des feuilles magnifiquement bigarrées et qui est reconnu pour sa qualité gustative ; les autres sous-ensembles de Radicchio sont plus récents, dont « de Chioggia », le seul permettant une culture toute l'année ; et « de Vérone ». Un cinquième sous-ensemble est parfois constitué des chicorées amères « à couper », et peut être dénommé 'Grumolo', eu égard au cultivar le plus connu. (Mais il y a également 'Zuccherina di trieste', 'Spadona'...)

Au final, on voit que le groupe des chicorées amères possède une très grande variabilité phénotypique et génétique, ce qui promet encore de nombreuses évolutions.

17.1.2 Culture des chicorées amères

La culture de la chicorée amère est souvent assimilée à celle de la laitue, mais sur un cycle plus long de 2.5 à 4.5 mois. Néanmoins, comme nous allons le voir, il y a quand même des différences assez nettes.

Vahabinia et al. (2019) donnent des renseignements intéressants sur sa germination. Les températures cardinales sont de 3 °C (minimale), de 25-30 °C (optimale) et de 40-45 °C (maximale). Mieux vaut mettre la graine à 1.5 cm de profondeur qu'à la surface ; la chicorée amère n'est pas sensible à la lumière. L'humidité est importante pour toute germination, mais la chicorée n'est pas la plus exigeante, ce qui est rassurant pour les semis directs en été. Elle peut germer et émerger jusqu'à ψ=-0.6 MPa, mais il vaut mieux ne pas descendre au-dessous de ψ=-0.3 MPa (pour rappel, ψ=-1.5 MPa est le point de flétrissement permanent), sinon la vitesse d'émergence est notablement ralentie et la croissance de la plante moins importante.

La chicorée amère est une plante bisannuelle qui demande une vernalisation. Celle-ci peut avoir lieu à tous les stades et implique de grands risques de montaison prématurée, par la suite, en jours longs (risques aggravés par des températures supérieures à 32 °C) ; la transplantation précoce semble aussi jouer un rôle. Les semis de printemps sont donc à déconseiller, sauf pour quelques cultivars du sous-ensemble « de Chioggia », et dans un tel cas, un environnement protégé est indispensable[615]. Il sera plus avisé d'attendre les mois de juin, et surtout de juillet et d'août.

La transplantation (30-40 jours après le semis) est la méthode la plus courante pour la chicorée amère[616] chez les professionnels, voire même, après un semis initial en pépinière, avec un repiquage intermédiaire à racine nue ; ce sont surtout les chicorées à couper qui sont semées directement. Il est assez compliqué de donner des espacements type, car entre une imposante 'Pain de Sucre' (mais parfois cultivée pour ses jeunes pousses...) et une chicorée à couper... Globalement, ce sont de grandes salades qui, en hiver et automne humides, gagnent à être bien aérées, on visera *a minima* une trentaine de centimètres d'écart.

Les températures de croissance de la chicorée amère seraient de 7 °C (minimale), 13-25 °C (optimale) et 30 °C (maximale). Elle est rustique (RHS=H5), plus rustique que les scaroles ou frisées et la laitue ; les groupes 'Pain de Sucre' ou 'Grumolo' le sont particulièrement, les autres bénéficieront d'une petite protection en hiver. En ce qui concerne la fertilisation azotée, elle varie, selon les auteurs, de 100 à 180 N (kg/ha). Pour Biesiada et Kołota (2010), 150 N sans

---

[615] Pour limiter la montaison, d'après Gianquinto et Pimpini (1989), il faut, 15 jours avant le semis, que les semences soient à 0 °C (traitement au froid), ce qui augmente la vitesse de germination, puis une fois le semis effectué, il faut garder pendant 10 jours la température supérieure à 20 °C. On peut ensuite réduire, petit à petit, la température jusqu'à la plantation.

[616] Toutefois, c'est une plante ayant une très forte racine pivot, un semis direct en été dans un sol, bien réchauffé donc, avec une irrigation raisonnable (voir les réflexions au-dessus sur l'irrigation et l'émergence), semble pourtant très jouable. En outre, le semis direct produit des chicorées avec beaucoup plus de matière sèche (+50 %, d'après Francke & Majkowska-Gadomska, 2008).

fractionnement est un bon compromis, au-delà se produit une accumulation de nitrates dans la plante, sans gain de récolte appréciable. Une irrigation régulière est conseillée pour une meilleure productivité, Moosavi (2012) propose une irrigation dès que l'évaporation dépasse 60 mm en bac[617] ; et Bortolini et Tolomio (2019), pour le groupe Radicchio, conseillent d'irriguer tous les deux jours. La période critique de désherbage, pour des chicorées, va du cinquième jour au quinzième jour après la transplantation[618]. Les maladies les plus classiques sont la nécrose marginale et l'oïdium de la salade (*Erysiphe cichoracearum*).

On peut blanchir certaines chicorées amères (de Castelfranco ou de Treviso ou de Verona) mais ce n'est pas une pratique aussi habituelle que pour les frisées et les scaroles. Une fois les feuilles récoltées[619], il faut souvent les faire tremper dans l'eau froide, pour enlever de l'amertume, mais c'est moins vrai en hiver, après quelques gelées. Notons que, l'âge venant, il semble que l'être humain s'habitue à ce goût, comme l'explique le roman « Le vieil homme et l'amère ».

Pour qui souhaite produire ses graines, sur la tige florale, on peut voir plusieurs groupes de deux à quatre inflorescences qui portent des fleurs bleues, hermaphrodites. L'autopollinisation est possible, mais la chicorée amère a un système d'auto-incompatibilité qui la rend complètement allogame. On risque, par conséquent, de nombreuses surprises : il faut avoir conscience que, non seulement toutes les variétés de chicorées amères cultivées peuvent se croiser entre elles, mais aussi avec la version sauvage ; sans compter, de façon plus surprenante, que l'hybridation est possible avec l'autre espèce de chicorée (frisée et scarole). Pour en finir sur la reproduction, les cultivars sont encore souvent des variétés-population, mais de plus en

---

[617] Donc, à peu près, la moitié en évapotraspiration, soit 4-6 jours en période chaude ; beaucoup moins s'il s'agit de plantules !

[618] En semis direct, mais je ne suis pas certain, car je n'arrive pas à me procurer la référence, (Mehta, H. M., Chavda, J. R. E. and Patel, J. R. 1995. Effect of methods of sowing and weed management on yield of chicory (*C. intybus*). Indian J. Agron. 40:147-149) : il semble conseillé de désherber aux jours 30 et 60.

[619] On enlève les feuilles extérieures des Radicchio, elles sont... très amères, et c'est le cœur qui est rouge.

plus, apparaissent des variétés synthétiques et hybrides F1 avec un assez fort effet d'hétérosis. Petuzé et al. (2016) montrent, en outre, qu'il y a des interactions nettes entre les cultivars et l'environnement, il sera donc bon de tester différents cultivars dans son propre contexte.

Barcaccia, G., Ghedina, A., & Lucchin, M. (2016). Current advances in genomics and breeding of leaf chicory (Cichorium intybus L.). *Agriculture*, *6*(4), 50.

Biesiada, A., & Kołota, E. (2010). The effect of nitrogen fertilization on yielding and chemical composition of radicchio chicory for autumn–harvest cultivation. *Acta Scientiarum Polonorum Hortorum Cultus*, *9*(4), 85-91.

Bortolini, L., & Tolomio, M. (2019). Influence of irrigation frequency on radicchio (Cichorium Intybus L.) yield. *Water*, *11*(12), 2473.

Francke, A., & Majkowska-Gadomska, J. (2008). Effect of planting date and method on the chemical composition of radicchio heads. *Journal of Elementology*, *13*(2), 199-204.

Gianquinto, G., & Pimpini, F. (1989). The influence of temperature on growth, bolting and yield of chicory cv. Rosso di Chioggia (Cichorium intybus L.). *Journal of Horticultural Science*, *64*(6), 687-695.

de Goes Maciel, C. D., Cavalieri, S. D., Poletine, J. P., Velini, E. D., Marin, M. W., Neto, A. M. O., & Guerra, N. (2014). Periods of weed interference in chicory cultivars development in indirect sowing system. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, *12*(2), 1296-1299.

Moosavi, S. G. R. (2012). Effects of irrigation and nitrogen (N) fertilization levels on yield, morphological traits and water use efficiency of chicory (Cichorium intybus L.). *Journal of Medicinal Plants Research*, *6*(31), 4647-4652.

Pertuzé, R., Bravo, R., & Silva, P. (2016). Radicchio (Cichorium intybus L.) variety selection for the Chilean central area. *Scientia Horticulturae*, *198*, 197-206.

Suhonen, I. (1991). Growth, bolting and yield quality of "radicchio rosso". *Scientia horticulturae*, *46*(1-2), 25-31.

Vahabinia, F., Pirdashti, H., & Bakhshandeh, E. (2019). Environmental factors' effect on seed germination and seedling

growth of chicory (Cichorium intybus L.) as an important medicinal plant. *Acta Physiologiae Plantarum*, *41*, 1-13.

Zarghani, H., Mijani, S., Nasrabadi, S. E., Ghias-Abadi, M., Khorramdel, S., & Azimi, R. (2014). Temperature effects on the seed germination of some perennial and annual species of Asteraceae family. *Plant Breeding and Seed Science*, *69*, 3-14.

Žnidarčič, D., Osvald, J., & Trdan, S. (2004). Plant characteristics for distinction of red chicory (Cichorium intybus L. var. silvestre Bisch.) cultivars grown in central Slovenia. *Acta Agriculturae Slovenica*, *83*, 251-260.

17.2 Claytone de Cuba

La claytone de Cuba (*Claytonia perforliata*) est une plante herbacée, annuelle, de la famille des montiacées. Elle se consomme essentiellement en salade, avec des feuilles un peu mucilagineuses, et éventuellement, avec une petite fleur insérée dans la feuille du plus bel effet.

C'est une adventice d'Amérique du Nord, parfois cultivée par les jardiniers amateurs, mais très rarement par des maraîchers professionnels (pour une exception, lire Theurl et al., 2021). Elle est pourtant très adaptée à la culture hivernale, comme l'indique son autre nom vernaculaire : pourpier d'hiver.

Les références dans la littérature scientifique sont exceptionnelles en agronomie : le seul article entièrement consacré à la culture de la claytone de Cuba provient d'un ouvrage collectif, que je trouve assez inégal, et surtout, ne citant pas ses sources (Rana & Yadav, 2017) ; aussi, ai-je préféré ne pas m'appuyer dessus. L'ouvrage de Palme (2021) qui met à la portée de chacun plusieurs années d'essais dans sa station agronomique autrichienne, me semble, en revanche, très fiable. J'en conseille vivement la lecture, pour obtenir quelques clés sur cette culture, comme sur nombre d'autres.

Palme W. (2021) *Le potager au cœur de l'hiver*. Tana éditions, Paris.

Rana, M.K., & Yadav, N. (2017) Miner's lettuce. In M.K. Rana (Ed.), *Vegetable crop science* (p. 839-847). CRC Press.

Theurl, M. C., Hörtenhuber, S. J., Lindenthal, T., & Palme, W. (2017). Unheated soil-grown winter vegetables in Austria: Greenhouse gas emissions and socio-economic factors of diffusion potential. *Journal of Cleaner Production*, *151*, 134-144.

17.3 Cresson d'hiver

Le cresson d'hiver (*Barbarea vulgaris*) est une plante herbacée de la famille des Brassicacées. Le nom vernaculaire de cresson est porté par d'autres espèces : le cresson de jardin (*Barbarea verna*), très proche du précédent, mais comme l'indique l'épithète, plutôt adapté à une culture de printemps ; le cresson alénois (*Lepidium sativum*), dont il sera question dans le chapitre suivant ; et le cresson de fontaine (*Nasturtium officinale*), dont la culture est très technique.

Le cresson d'hiver est d'abord considéré dans la littérature scientifique comme une mauvaise herbe, particulièrement problématique pour les cultures fourragères. Cependant, c'est également une plante comestible indigène, qui peut être utilisée « à notre avantage ».

Il est, en effet, employé dans le management des ravageurs. Dans ce cadre, deux techniques de manipulation des habitats sont intéressantes : les *cultures pièges* et les *cultures visant au contrôle biologique*. Les cultures pièges servent à « attirer, divertir, intercepter et ou retenir les insectes ciblés » (Shelton & Badenes-Perez, 2006). Les plantes choisies doivent être particulièrement attractives, au point de détourner le ravageur de la culture principale. Elles peuvent, de plus, être létales, en éliminant le ravageur, et c'est justement le cas du cresson d'hiver qui attire la teigne du chou (*Plutella xylostella*) et l'altise des crucifères (*Phyllotreta nemorum)* et élimine leurs larves[620] grâce à ses saponines. En termes d'implantation, les cultures pièges peuvent être placées au périmètre de la culture principale, mais aussi, temporellement, un peu avant (ou après). Il est souvent judicieux de combiner plusieurs plantes aux caractéristiques complémentaires,

[620] Le cresson alénois est encore plus attractif, mais n'a pas les composants pour ensuite éliminer les larves.

chacune spécifiquement destinée à la gestion d'un ravageur particulier. Parallèlement, dans la technique de culture visant au contrôle biologique, l'idée est d'attirer les ennemis naturels du ravageur ciblé, en leur offrant une source de nourriture (plantes mellifères) ou un habitat (pour se reproduire). Le cresson d'hiver, lors de sa floraison, joue aussi ce rôle[621] en attirant certains parasites des insectes ciblés (Badenes-Pérez, 2019). En outre, sa fleur jaune – on le surnomme la roquette jaune – est à mon avis du plus bel effet... Les résultats de ces deux techniques de manipulation des habitats restent toutefois limités. Le succès dépend de la proportion que couvrent ces cultures par rapport à la culture principale. Il convient, pour le cresson, d'employer de 5 % à 10 % de la surface. Cela présente l'inconvénient de mobiliser de l'espace, mais aussi n'est pas simple à mettre en place, réclame pas mal de connaissances et peut représenter un coût important par rapport à d'autres techniques. Sans parler du fait que cela dépend également du type d'insecte, de son stade de maturité et de sa mobilité. D'où la nécessité d'employer simultanément des rotations, des techniques mécaniques (labour), physiques (filets), du contrôle biologique, de choisir des cultures résistantes, et en dernier lieu, de se tourner vers des pesticides (chimiques ou biologiques). Ceci dit, ces objectifs de gestion des ravageurs peuvent parfois être couplés avec la production d'une culture valorisée. Or, le cresson d'hiver étant aussi une plante comestible, la surface utilisée n'est, de toute façon, pas perdue (Badenes-Pérez, 2011).

En tant que plante comestible, le cresson d'hiver se consomme généralement cru, et les essais avec des panélistes montrent qu'il gagne à être employé en mesclun, car son goût est piquant et fort[622]. C'est cohérent avec sa technique de récolte, qui se fait feuille à feuille, de façon répétée. Il s'agit d'une plante pérenne, dont le cycle de vie mérite d'être rapidement décrit. Il peut émerger pendant toute la saison de croissance et ne va pas monter à graines la première année. Il réclame, en effet, une vernalisation obligatoire, mais qui doit se produire à partir

---

[621] Et attire également d'autres insectes pollinisateurs !

[622] Mais en se souvenant de son surnom de roquette jaune, de nombreux autres emplois s'avèrent possibles en cuisine.

d'un certain âge[623]. La plantule développe une rosette de feuilles composées qui résistent parfaitement à l'hiver (sauf si la plantule est très jeune). La deuxième année, dès que les températures s'élèvent vers le mois d'avril, une ou plusieurs tiges florales poussent, portant des inflorescences. À ce moment, les feuilles de la rosette disparaissent et seules des feuilles de forme simple persistent sur les tiges florales. Si ces dernières sont éliminées trop tôt, d'autres les remplacent. En revanche, à partir d'une « certaine » maturité des graines (ou à la maturité complète), leur suppression conduit à la pousse de nouvelles rosettes. Le cresson d'hiver est surtout allogame, pollinisé par des hyménoptères. Le fruit est une silique, pouvant contenir 20 graines (PMG=0.6 g). La plante peut alors, en théorie, passer ce nouvel hiver et recommencer un cycle, mais elle est généralement victime de maladies ou de la compétition.

On pense souvent que la germination (à l'état sauvage) a seulement lieu en fin d'été et début d'automne, mais des expériences montrent, comme nous l'avons précédemment évoqué, qu'elle est possible durant toute la saison de croissance. D'ailleurs, plus le cresson d'hiver est planté tôt, plus sa croissance est importante. Il ne faut pas, en revanche, semer trop tard (octobre), car la survie est alors compromise. Au-dessous de 10 °C, il y a dormance de la graine. Les conditions optimales de germination sont des températures alternes de 25 °C / 15 °C, de l'humidité, bien entendu, et une durée du jour assez longue. Il vaut définitivement mieux ne pas enterrer les graines.

Le cresson d'hiver est très rustique et passe l'hiver sans problème. Le zéro de végétation est bas, vers 5 °C, voire au-dessous. Le plein champ en hiver est donc envisageable, mais un abri froid permet de rendre la culture plus productive. Il peut se contenter d'une fertilisation minimale, avec les restes des cultures d'été. En revanche, on soignera l'irrigation, si la fin de l'été ou le début de l'automne sont chauds, car le cresson d'hiver est plutôt une plante de milieux humides. Sachant qu'il n'est pas très compétitif, surtout par rapport aux graminées (MacDonald & Cavers, 1991), quelques désherbages sont conseillés.

---

[623] Je n'ai pas plus de précisions à offrir que ce « certain âge »...

Il n'existe pas en France de cultivars à proprement parler, on trouve l'espèce type chez les semenciers. Par la suite, le cresson d'hiver se ressème. Largement. On n'oubliera pas le début de cet article : c'est aussi une mauvaise herbe !

Badenes-Pérez, F. R. (2011, June). Simultaneous use of Barbarea vulgaris R. Br.(Brassicaceae) as a trap crop for insect pest management and a salad vegetable. In *II International Symposium on Underutilized Plant Species: Crops for the Future-Beyond Food Security 979* (p. 737-742).

Badenes-Pérez, F. R. (2019). Trap crops and insectary plants in the order Brassicales. *Annals of the Entomological Society of America*, *112*(4), 318-329.

Baskin, J. M., & Baskin, C. C. (1989). Seasonal changes in the germination responses of buried seeds of Barbarea vulgaris. *Canadian Journal of Botany*, *67*(7), 2131-2134.

MacDonald, M. A., & Cavers, P. B. (1991). The biology of Canadian weeds.: 97. Barbarea vulgaris R. Br. *Canadian Journal of Plant Science*, *71*(1), 149-166.

Schreiber, M. M. (1962). Growth, development and perennial nature of yellow rocket. *Weeds*, *10*(2), 91-95.

Shelton, A. M., & Badenes-Perez, F. R. (2006). Concepts and applications of trap cropping in pest management. *Annual Review of Entomology, 51*, 285-308.

17.4 Plantain corne-de-cerf

Le plantain corne-de-cerf (*Plantago coronopus*), plante herbacée de la famille des plantaginacées, porte ce nom du fait de la forme divisée de ses feuilles. Il est souvent considéré comme une mauvaise herbe, mais nous allons voir, dans cet article, plusieurs bonnes raisons pour changer d'opinion. Il s'agit d'une plante sauvage, comestible, qui est, de temps à autre, cultivée par des jardiniers amateurs. Cornara et al. (2022) le décrivent comme l'ingrédient principal d'une salade sauvage, constituée par des moines capucins italiens du XVIIème siècle, salade qui a évolué en *misticanza*, la version italienne du mesclun. Les feuilles peuvent aussi être rapidement blanchies et utilisées, comme de la

roquette, avec des pâtes ou en soupe ; la feuille est croquante, avec un léger goût de noix et de sel. Le plantain peut également être consommé en graines germées[624], en micro-pousses[625] ou en fleurs comestibles (Rouphael et al., 2021).

Les plantes sauvages comestibles semblent « à la mode »[626], mais il convient d'en souligner quelques risques (Benvenuti et al., 2016) : primo, la confusion possible avec des plantes toxiques ; secundo, le fait que des pesticides aient pu récemment être utilisés aux alentours ; tertio, la présence de pollutions diverses du sol ; ou quarto, la souillure par des animaux ; mais surtout, si le nombre de ces modernes chasseurs-cueilleurs venait à augmenter, cela pourrait conduire à la raréfaction de ce type d'espèces : ce qui est un comble pour des amateurs de biodiversité ! D'où l'intérêt de domestiquer certaines de ces plantes, réunissant des qualités particulières.

Petropoulos et al. (2018) soulignent le potentiel, en tant que nourriture fonctionnelle, du plantain corne-de-cerf : d'une part, pour une nutrition saine (bonne source d'amino-acides et de minéraux), et d'autre part, pour ses propriétés médicinales (capacité anti-oxydante). Puccinelli et al. (2021) insistent sur le fait que les plantes sauvages tendent à avoir des qualités nutritives supérieures aux plantes domestiquées, et plus encore sous forme de micro-pousses que de plantes matures[627].

En outre, le plantain constitue une réelle opportunité agronomique dans le bassin méditerranéen, d'où il est issu. Il est ainsi capable de mieux supporter le changement climatique, avec son augmentation des températures et ses précipitations plus erratiques : il a une résistance

---

[624] Que l'on fait pousser en 4 à 10 jours, souvent dans l'obscurité, simplement avec de l'eau et sans substrat.

[625] Que l'on produit en 7 à 28 jours après la germination, en conditions lumineuses et dans un substrat. Elles sont constituées des cotylédons et des deux premières feuilles (pas des racines).

[626] Ce n'est pas une critique : c'est également l'occasion de redécouvrir la culture locale et des traditions culinaires (Baldi et al., 2022).

[627] Il est même possible d'ajouter des éléments, tels que du sélénium, afin de procéder à la « biofortification » de ces micro-pousses et d'obtenir ainsi des alicaments... assez chers.

intéressante à la sécheresse. Dans ces régions, les sols sont assez pauvres et peuvent même avoir un niveau de salinité élevé. Or, le plantain est une plante halophyte, au point qu'elle tolère une irrigation avec l'eau de mer (Koyro, 2006) ! Ce bon potentiel d'adaptation suggère que l'on gagnerait à le domestiquer et à diversifier ainsi l'alimentation humaine. Petropoulos et al. (2018) signalent toutefois que, pour l'heure, la sélection a été pratiquement inexistante et que l'évaluation des populations les plus intéressantes, au point de vue fonctionnel[628] ou agronomique, reste à faire. Les pratiques culturales n'ont pas non plus été véritablement testées, et il reste à procéder à un travail d'information du consommateur et du jardinier.

Passons à présent en revue quelques éléments de l'écologie du plantain, que chacun sera libre de prendre en considération pour créer ses propres itinéraires de culture. Selon Teixeira et al. (2020), la température minimale de germination est de 2 °C et la température optimale de 11.5 °C, ce qui suggère, bien sûr, une culture de saison fraîche. Une forte humidité n'est pas nécessaire à la germination. Benvenuti et al. (2016) insistent sur le fait que la profondeur de semis doit être faible, bien en deçà d'un centimètre, comme pour beaucoup de petites graines (PMG= 0.7 g). Le pourcentage de germination est naturellement[629] assez faible (44 %, à moins d'employer un trempage préalable avec de l'hypochlorite de sodium...). Ces considérations font que le semis direct n'est peut-être pas la meilleure solution. Les auteurs prônent de produire des plants dans des contenants remplis d'un substrat très poreux et sous abri. Il est possible de réunir quelques plantules dans le même contenant et de planter ensuite à une vingtaine de centimètres d'espacement. Si, malgré tout, le semis direct était entrepris, la préparation du lit de semences doit être très soignée et la semence déposée pratiquement à la surface du sol.

---

[628] Il faut, en effet, une fois domestiquées, qu'elles conservent leurs propriétés nutritives, médicinales et organoleptiques par une judicieuse sélection et un mode de culture adéquat (Ceccanti et al., 2020).

[629] Ce qui est plutôt un avantage pour une plante sauvage, car cela lui permet d'étaler son émergence et d'avoir donc plus de chances de rencontrer des conditions favorables. En revanche, pour une culture, le manque d'uniformité du plantain est un problème.

En ce qui concerne la croissance du plantain corne-de-cerf, Dodds (1953) nous donne quelques clés. Son origine méditerranéenne garantit une bonne tolérance aux fortes températures et à des faibles précipitations ; mais de faibles précipitations en début d'automne[630] peuvent avoir un effet important sur la survie des plantules. À surveiller donc. C'est une plante préférant le plein soleil à la mi-ombre. Elle est, en même temps, clairement résistante au gel. Elle pousse fréquemment sur le sable, voire les graviers, et ne semble pas apprécier les sols lourds et saturés d'eau. Elle peut, en revanche, pousser sur un sol assez compacté. La fertilisation nécessaire est probablement minimale.

Dans la nature, les graines germent souvent en septembre. Des tests en laboratoire montrent que septembre et octobre sont les deux meilleurs mois pour la germination. Palme (2021) conseille le plantain comme culture d'hiver, avec un semis début septembre et une plantation fin septembre. Deux fins cotylédons émergent, suivis de deux ou trois feuilles entières ; les feuilles suivantes, également disposées en rosette sur une très courte tige, ont la forme caractéristique de l'espèce. La récolte est possible deux mois après le semis et peut être répétée. Les inflorescences apparaissent souvent en mai-juin. Les fleurs sont hermaphrodites, mais fortement protogynes ; elles sont pollinisées par le vent ; il y a une autogamie partielle. Le nombre de graines par capsule est d'environ cinq.

D'après Benvenuti et al. (2013), il est difficile de trouver même l'espèce type chez les semenciers. Le plantain corne-de-cerf présente une forte variété intraspécifique : avec un cycle de vie qui peut être annuel, bisannuel ou pérenne (Sotek, 2007), et également une diversité dans la forme des feuilles. Bref, sait-on jamais ce sur quoi on va tomber ? Palme (*op. cit.*) conseille, une fois la perle rare dénichée, de produire ses propres graines. Certains semenciers américains commercialisent pourtant les cultivars 'Minutina' ou 'Erba Stella', voire même des populations sous l'appellation de « plante de paysage comestible » (O'Kennon et al., 1998). Un sommet de poésie marketing.

---

[630] La saison conseillée de semis, comme nous le verrons.

Baldi, A., Bruschi, P., Campeggi, S., Egea, T., Rivera, D., Obón, C., & Lenzi, A. (2022). The renaissance of wild food plants: Insights from Tuscany (Italy). *Foods*, *11*(3), 300.

Benvenuti, S., & Pardossi, A. (2016). Germination ecology of nutraceutical herbs for agronomic perspectives. *European Journal of Agronomy*, *76*, 118-129.

Ceccanti, C., Landi, M., Incrocci, L., Pardossi, A., Venturi, F., Taglieri, I., ... & Guidi, L. (2020). Comparison of three domestications and wild-harvested plants for nutraceutical properties and sensory profiles in five wild edible herbs: Is domestication possible?. *Foods*, *9*(8), 1065.

Cornara, L., Ambu, G., Alberto, A., Trombetta, D., & Smeriglio, A. (2022). Characterization of Ingredients Incorporated in the Traditional Mixed-Salad of the Capuchin Monks. *Plants*, *11*(3), 301.

Dodds, J. G. (1953). Plantago coronopus L. *Journal of Ecology*, *41*(2), 467-478.

Koyro, H. W. (2006). Effect of salinity on growth, photosynthesis, water relations and solute composition of the potential cash crop halophyte Plantago coronopus (L.). *Environmental and Experimental Botany*, *56*(2), 136-146.

O'Kennon, R. J., Diggs, G. M., & Hoggard, R. K. (1998). Plantago coronopus (Plantaginaceae) new to Texas. *SIDA, Contributions to Botany*, *18*(1), 356-358.

Petropoulos, S. A., Karkanis, A., Martins, N., & Ferreira, I. C. (2018). Edible halophytes of the Mediterranean basin: Potential candidates for novel food products. *Trends in Food Science & Technology*, *74*, 69-84.

Puccinelli, M., Pezzarossa, B., Pintimalli, L., & Malorgio, F. (2021). Selenium biofortification of three wild species, Rumex acetosa L., Plantago coronopus L., and Portulaca oleracea L., grown as microgreens. *Agronomy*, *11*(6), 1155.

Rouphael, Y., Colla, G., & De Pascale, S. (2021). Sprouts, microgreens and edible flowers as novel functional foods. *Agronomy*, *11*(12), 2568.

Sotek, Z. (2007). Life history of Plantago coronopus L. at the limit of its range. *Ekologia(Bratislava)/Ecology(Bratislava)*, *26*(1), 14-29.

Teixeira, A., Toorop, P. E., & Iannetta, P. P. (2020). Differential Interspecific Adaptation to Abiotic Stress by Plantago Species. *Frontiers in Plant Science*, *11*, 573039.

18Légumes zoubliés

La gamme de ce qui est cultivé change au cours de l'histoire (Hanelt, 1997), à cause de domestications, d'acclimatations et d'améliorations, des nouveautés qui conduisent, par contre-coup, à l'abandon plus ou moins complet de certaines cultures traditionnelles[631].

18.1 Arroche

L'arroche (*Atriplex hortensis*) est une annuelle, herbacée, ramifiée, pouvant atteindre plus de deux mètres. Sans doute originaire d'Asie, elle est cultivée de longue date en Europe et fut un précurseur de l'épinard, car leurs usages alimentaires sont proches. Elle a été largement remplacée par ce dernier et reste essentiellement une plante de jardinier amateur (Carlsson & Hallqvist, 1981), ce qui explique que les articles scientifiques à son sujet ne soient pas très courants et que différentes informations importantes nous manquent. Elle présente pourtant certains intérêts, comme d'avoir un contenu important en protéines et d'être productive (Carlsson & Clarke, 1983).

En ce qui concerne la germination, si les graines sont autoproduites, il faut d'abord retirer l'enveloppe (bractée) protégeant la graine. Ensuite, il vaut mieux choisir les plus grosses graines (Kachout et al., 2016). La profondeur du semis conseillée est de 1 centimètre. L'université Cornell indique une température de germination de 10 à 18 °C et une levée en une à deux semaines, mais je n'ai pu trouver des références publiées à ce sujet.

Il s'agit d'une plante de saison fraîche, mais capable de supporter une large étendue de températures. Elle est, en particulier, beaucoup plus lente à monter en été que l'épinard et peut donc s'y substituer en cette saison. Elle est cependant considérée comme tendre et ne pouvant supporter le gel : une protection s'avère ainsi nécessaire (RHS=H2).

---

[631] Hanelt, P. (1997). Lesser known or forgotten cruciferous vegetables and their history. In *International Symposium Brassica 97, Xth Crucifer Genetics Workshop 459* (pp. 39-46).

Dans ces conditions, l'épinard reste la culture de référence. En confrontant les informations de cinq semenciers français, les dates de semis peuvent s'étaler de mars à août.

Pour ce qui est de l'implantation, une première stratégie (Rubatzky & Yamaguchi, 2012) est de semer directement à trois centimètres d'écart, et de récolter et d'éclaircir en même temps, au stade de jeune pousse (10-20 cm) ; les plants restants sont laissés à 25 cm. Il est également conseillé de couper la tige principale (au maximum à 50 cm) pour encourager la ramification et pour retarder la floraison qui rend les feuilles difficiles à consommer. Il s'agit alors plutôt d'une cueillette feuille à feuille ou bien de rameaux latéraux courts. Un plant bien ramifié peut occuper un espace important, et dans ce cas, un écart de 40-50 cm est nécessaire. Une seconde stratégie consiste à réaliser des semis indirects ; les plants sont parfois installés de façon serrée et cueillis en une seule fois, au bout de 30 jours, lorsqu'ils forment encore une « rosette ».

L'arroche est une plante qui tolère des sols peu fertiles, voire salins, ainsi que la sécheresse, et possède, par conséquent, des intérêts évidents dans des contextes difficiles. Il n'en reste pas moins que, pour une récolte abondante, il convient de fertiliser, de désherber et d'irriguer. Kachout et al. (2011) montrent que, malgré la résistance intéressante de la plante à la sécheresse, la récolte est clairement augmentée par l'irrigation. Rinchen et Singh (2015) indiquent 2.5-3 kg/m^2 de fumier, bien décomposé, pendant la préparation du sol, puis un ajout de 1.5-2.0 kg/m^2 après la première cueillette. Les mêmes auteurs conseillent de désherber tous les 15 jours.

Il s'agit d'une plante monoïque, allogame et anémophile. Dès lors, pour produire ses graines, il convient de conserver plusieurs porte-graines assez regroupés, mais de ne garder qu'un même cultivar, ou de décaler, pour chacun, la période de reproduction. L'arroche se ressème spontanément. Les graines peuvent se conserver cinq ans dans de bonnes conditions ; à température ambiante, leur viabilité est divisée par deux (Kew SID). Il existe deux types de graines dans l'arroche, plus grosses et marron, et plus petites et noires. La dormance est plus faible pour les graines marron (Baskin & Baskin, 2014).

Trois groupes d'arroche peuvent être distingués : la blonde, la verte et la rouge, avec une gamme de cultivars intermédiaires. On peut donc

imaginer d'intéressants jeux de couleurs dans son potager ou son saladier.

Baskin, C. C., & Baskin, J. M. (2014). 8- Variation in seed dormancy and germination within and between individuals and populations of a species. *Seeds: Ecology, Biogeography, and, Evolution of Dormancy and Germination* (p. 277-373). Academic Press.

Carlsson, R., & Clarke, E. M. (1983). Atriplex hortensis L. as a leafy vegetable, and as a leaf protein concentrate plant. *Plant Foods for Human Nutrition*, *33*(2), 127-133.

Carlsson, R., & Hallqvist, C. W. (1981). Atriplex hortensis L.—Revival of a spinach plant. *Acta Agriculturae Scandinavica*, *31*(3), 229-234.

Frankton, C., & Bassett, I. J. (1968). The genus Atriplex (Chenopodiaceae) in Canada. I. Three introduced species: A. heterosperma, A. oblongifolia, and A. hortensis. *Canadian Journal of Botany*, *46*(10), 1309-1313.

Kachout, S. S., Ennajah, A., Mechergui, R., Ben Mansoura, A., Ouerghi, Z., & Bouraoui, N. K. (2016). Effect of seed weight and salinity on the germination of garden orache (Atriplex hortensis L.). *Academia Journal of Agricultural Research*, *4*(7), 404-410.

Kachout, S. S., BenYoussef, S., Ennajah, A., Abidi, S., & Zoghlami, A. (2021). Physiological and morphological traits associated with germinative and reproductive stage of garden orache (A. hortensis L. var. rubra) under water stress. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, *8*(1), 1-16.

Rinchen, T., & Singh, N. (2015). Exploring nutritional potential of Atriplex hortensis. *Indian Horticulture, 60*, 16-17.

Rubatzky, V. E., & Yamaguchi, M. (2012). *World vegetables: principles, production, and nutritive values*. Springer Science & Business Media.

Sai Kachout, S., Ben Mansoura, A., Jaffel Hamza, K., Leclerc, J. C., Rejeb, M. N., & Ouerghi, Z. (2011). Effect of water stress on plant growth in Atriplex hortensis L. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, *86*(2), 101-106.

18.2 Cardon

Le cardon (*Cynara cardunculus* var. *altilis*) appartient à la même espèce que l'artichaut (*C. cardunculus* var. *scolymus*) et ils ont tous deux pour ancêtre probable le cardon sauvage (*C. cardunculus* var. *sylvestris*). Avec 50 à 150 centimètres de hauteur, le cardon est très décoratif, certes, un peu plus petit que l'artichaut, mais il lui ressemble énormément. Bien que les boutons floraux puissent se consommer, ce sont plutôt les pétioles qui sont à l'honneur dans la cuisine lyonnaise, de Noël, en particulier. Ceci dit, le cardon a beaucoup d'autres usages qu'alimentaires : médicinal, fourrager, biocarburant et pour fabriquer du papier.

C'est une plante pérenne, appartenant à la famille des astéracées. Quoique souvent cultivé comme une plante annuelle, le cardon peut se conserver de 7 à 12 ans au potager ; il fait donc potentiellement partie des légumes « perpétuels ». Toensmeier et al. (2020) en recensent plus de six cents, pouvant présenter de nombreux avantages. Primo, cela augmente la biodiversité des cultures. Secundo, ils permettent souvent de régler des problèmes nutritifs (déficience, ou inversement, obésité), avec des compositions chimiques intéressantes. Tertio, ces légumes peuvent produire dans des saisons décalées, des milieux difficiles et avec un entretien limité : ce qui est le cas du cardon, pouvant être récolté en hiver et être produit sur des terres pauvres et arides. Quarto, ce sont des solutions éventuelles dans un contexte de changement climatique, d'une part, du fait de sa possible adaptation à l'augmentation des températures, et d'autre part, en permettant également un stockage du dioxyde de carbone plus important. C'est sans doute le mérite essentiel de la permaculture, que d'avoir souligné l'intérêt de ces cultures de vivaces. On pourra consulter la longue liste de Toensmeier et al. (2020), dont l'article est disponible en accès libre, avec un fichier décrivant brièvement les conditions de culture pour chaque espèce, afin de savoir si elle peut correspondre à notre contexte...

Mais revenons au cardon, selon Ierna et al. (2003), ses températures cardinales de germination sont de 6 °C (minimale), de 20 °C (optimale) et de 32 °C (maximale). La profondeur de semis est de 2 cm (PMG=45 g). On peut transplanter le cardon, en le gardant six

semaines en contenant et en l'installant après les derniers gels : il n'est, en effet, pas très résistant quand il est jeune et il peut aussi monter à graines prématurément, en cas de vernalisation. Le semis direct est également intéressant, à partir de mai, avec des poquets de trois graines, en ne conservant, par la suite, que le plant le plus vigoureux. L'espacement conseillé dans Maynard et Hochmuth (2006) varie de 30 à 45 cm, ce qui ne correspond pas à d'autres références, ni à mon expérience : la plante étant volumineuse. Il semble plus courant d'espacer les plants d'un bon mètre ; de toute façon, il est assez rare d'en cultiver une grande quantité, et rien n'empêche de disposer, au départ, autour de lui, quelques salades pour rentabiliser l'espace.

La température de croissance idéale pour le cardon est de l'ordre de 20 °C. Son origine méditerranéenne indique qu'une exposition au soleil est préférable et garantit une bonne tolérance à la sécheresse. Sa rusticité est également intéressante (RHS=H5) et lui permet de passer des hivers doux sans dommages. Les périodes de croissance végétative sont l'automne et le printemps, ce qui peut laisser espérer deux récoltes annuelles. Celle de printemps est plus délicate, car le cardon est une plante de jours longs, qui fleurit vers juin, ce qui rend les pétioles très fibreux. Ses fleurs composées sont très belles et mellifères. La plante est allogame et peut donc s'hybrider avec les deux autres variétés botaniques.

Ierna et al. (2012) proposent une fertilisation de 100 N / 150 P_2O_5 / 150 K_2O (kg/ha), qui doit être renouvelée les années suivantes, si la culture est prolongée. Danalatos et al. (2005) notent l'effet très important de l'irrigation, en particulier pour les mois d'été, sur la croissance du cardon[632]. La compétition avec les mauvaises herbes n'est gênante que la première année, mais il faut, à ce moment, désherber soigneusement, car la croissance initiale du cardon est lente : cela prend quatre à cinq mois du semis à la maturité.

On ne récolte pas les feuilles extérieures qui sont généralement fibreuses et on se concentre sur celles du centre. Le cardon est souvent

[632] Notons que la culture est à contre-temps par rapport à la culture alimentaire, il s'agit en effet d'une étude sur le cardon comme biocarburant. Cependant, les résultats concernant l'irrigation semblent rester applicables.

blanchi en automne, pendant trois semaines, pour en limiter l'amertume[633]. On peut l'entourer, pour ce faire, d'un carton, d'un plastique opaque, ou mieux, d'une toile de jute plus respirante.

Il existe beaucoup de variétés intéressantes en Espagne et en Italie, qui sont de gros producteurs. On trouvera plus facilement, sur le marché français, le "Cardon Vert de Vaulx-en-Velin" (celui de référence pour les lyonnais) et une variété suisse dont j'apprécie beaucoup la saveur : "Épineux Argenté de Plainpalais". Son seul problème est bien décrit par son adjectif, mais on peut opter pour d'autres variétés inermes.

Danalatos, N.G., Skoufogianni, E., Giannoulis, K., & Archontoulis, S.V. (2007). Responses of Cynara cardunculus to irrigation and N-fertilization in central Greece. In *Proceedings of the 15th European Biomass Conference* May, Berlin, Germany (p. 421–424).

Deligios, P. A., Sulas, L., Spissu, E., Re, G. A., Farci, R., & Ledda, L. (2017). Effect of input management on yield and energy balance of cardoon crop systems in Mediterranean environment. *European Journal of Agronomy*, *82*, 173-181.

Ierna, A., Restuccia, A., & Mauromicale, G. (2003). Effects of seed osmopriming on germination of cynara cardunculus under low, optimal and high temperatures. In *V International Congress on Artichoke 660* (p. 333-338).

Ierna, A., Mauro, R. P., & Mauromicale, G. (2012). Biomass, grain and energy yield in Cynara cardunculus L. as affected by fertilization, genotype and harvest time. *Biomass and Bioenergy*, *36*, 404-410.

Lanteri, S., & Portis, E. (2008). Globe Artichoke and Cardoon. In J. Prohens and F. Nuez, (Eds.), *Vegetables I. Handbook of Plant Breeding, vol 1* (p. 49-74). Springer, New York, NY.

Maynard, D.N., & Hochmuth, G.J. (2006). *Knott's handbook for vegetable growers*. John Wiley & Sons.

[633] De mon expérience personnelle, j'ai cueilli du cardon beaucoup plus tard en mars sans le blanchir, et l'hiver lui avait supprimé son amertume...

Toensmeier, E., Ferguson, R., & Mehra, M. (2020). Perennial vegetables: A neglected resource for biodiversity, carbon sequestration, and nutrition. *PLoS One*, *15*(7), e0234611.

18.3 Chénopode blanc

Le chénopode[634] blanc (*Chenopodium album*) est une plante herbacée, annuelle, pouvant s'élever à 1.5 mètre, voire jusqu'à trois mètres de hauteur. Il est classé comme l'une des dix pires mauvaises herbes de la planète (Bajwa et al., 2019) ! Cette performance s'explique par sa capacité de germination dans des environnements divers, sa croissance rapide, sa taille importante, sa capacité à mobiliser les minéraux et sa bonne tolérance aux stress abiotiques.

Le chénopode s'avère toutefois comestible : ses feuilles et ses jeunes pousses contiennent de nombreuses protéines intéressantes, un bon apport de minéraux tels que le calcium et le fer, et de vitamines A, B et C. Sa composition importante en fibres peut cependant en limiter la digestibilité ; sa tendance à accumuler des nitrates et de l'acide oxalique, surtout dans les tiges, posent aussi question : ce sont, sans doute, des voies d'amélioration variétale à explorer (Bhargava et al., 2008). En résumé, le chénopode blanc est considéré comme un légume-feuille sous-utilisé.

Ses graines sont parfois aussi consommées, principalement sous forme de farine, mais dans le genre *Chenopodium*, d'autres espèces s'avèrent plus intéressantes en tant que pseudo-céréales, comme le chénopode de Berlandier (*C. Berlandier*i), et surtout, le quinoa (*C. quinoa*). Pour en revenir à la consommation de feuilles, le chénopode blanc est très proche de l'arbre épinard (*C. giganteum*), et dans une moindre mesure, d'une plante de la même famille des amaranthacées, mais d'un autre genre[635] : le Bon-Henri (*Blitum bonus-henricus*).

Ses températures cardinales de germination sont de 4 °C (minimale), de 24 °C (optimale) et de 39 °C (maximale). Toutefois, le chénopode blanc, répandu dans le monde entier, présente une grande variabilité

---

[634] Qui se prononce *k*énopode.

[635] Ou de la curiosité que constitue l'épinard-fraise (*Blitum capitatum*).

de comportement, selon son origine (Eslami, 2011) : une difficulté pour standardiser sa culture, sur laquelle nous reviendrons. La germination s'améliore avec une exposition au froid (Williams, 1963), des températures alternées (Henson, 1970) et de la lumière. La graine (PMG=0.6-1.4 g) germe mieux à la surface du sol, et nettement moins bien en dessous de 1 cm. Il faut savoir qu'il existe deux sortes de graines produites par le chénopode blanc : la plus courante (95 %) est petite, noire et difficile à faire germer, en particulier juste après la récolte, car ayant une dormance importante ; un autre type de graine plus grande et de couleur marron peut germer immédiatement, et dans des conditions moins favorables.

La plantule possède deux longs cotylédons et les premières vraies feuilles sont de forme ovale ; puis elles deviennent alternes et un peu pourpres avec des taches blanches ; la plante mature a de larges feuilles triangulaires et dentées. Le chénopode blanc s'adapte à une gamme de températures assez large (5-30 °C). D'une part, il possède une certaine résistance au froid, voire à de petits gels, d'autre part, il a aussi la capacité de s'adapter à des températures élevées, ce qui peut être relié au fait que le type de photosynthèse de l'espèce s'avère intermédiaire entre le type C3 et le type C4, et possède un point de compensation[636] plus bas que les plantes C3 (Yorimitsu et al., 2019). Il peut accepter des situations de stress hydrique, mais produit alors nettement moins (Maganti et al., 2005, trois fois moins dans leurs expérimentations). Il tolère également tous les types de sols, et même des sols assez pauvres, s'exprimant cependant mieux en sol riche en matière organique. Il est considéré comme nitrophile et répond à la fertilisation azotée (Blackshaw et al., 2003 ; Andreasen, et al., 2006) et très fortement à celle en potassium, voire en magnésium (Qasem & Hill, 1995). En revanche, son besoin en phosphate est relativement faible (Willams, 1963). Il n'existe pas de véritables préconisations en ce qui concerne des niveaux optimaux de fertilisation, ce qui s'explique assez bien, car on ne va pas rechercher la pousse maximum d'une mauvaise herbe ! Et faute de mieux, *je* suggère de partir sur les quantités proposées pour

[636] Le point où l'intensité lumineuse permet un équilibre entre photosynthèse et respiration.

les amaranthes, plantes de la même famille et partageant avec le chénopode blanc certaines caractéristiques. Pour nous résumer, la hauteur du chénopode blanc peut aller de 2-3 cm de haut à pratiquement trois mètres, selon la richesse et l'humidité du sol (Willaims, 1963), ce qui fait prendre conscience... qu'il n'y a pas de miracles en agronomie.

Cette capacité à exploiter le sol lui vient, entre autres, de sa racine pivot, qui ne permet guère le repiquage à racine nue. Le semis direct est donc le plus courant, dans un sol bien affiné, vu la petite taille de la graine. Le semis peut s'effectuer soit à la volée, en visant 100-150 plants au mètre carré, soit avec des espacements d'implantation de type 10-15×20-30 (cm).

Le chénopode blanc a toutes les qualités de compétition d'une mauvaise herbe, renforcées par des propriétés allopathiques qui handicapent la croissance de ses concurrentes (Bajwa et al., 2019). Si Rana et Panday (2017) suggèrent deux désherbages, sans en dire plus sur leur timing, le sujet n'est pas vraiment exploré en ce sens dans la littérature scientifique... mais plutôt pour supprimer le chénopode blanc des autres cultures ! Il convient d'ailleurs de noter qu'il ne faut surtout pas l'associer avec du radis, de la carotte, du chou-fleur, de la courge musquée, du maïs, de la pomme de terre, de la betterave, de la tomate, et sans doute, d'autres légumes, car il occasionne de fortes pertes de production (Bajwa et al., 2019). Ce sera d'ailleurs un sujet de préoccupations en fin de cycle pour limiter la dispersion des graines, sinon le potager risque l'envahissement les années suivantes !

Il existe quelques problèmes pour le chénopode blanc, en fait particulièrement étudiés dans le cas du quinoa. Le plus important semble être le mildiou (*Peronospora chenopodii*), mais il reste lié à des situations chaudes et humides peu courantes dans nos contrées. On relève aussi de l'alternariose (*Alternaria alternata*) et de la maladie de la tache foliaire (*Cercospora chenopodii*). Les ravageurs les plus cités sont un papillon (*Eurysacca melanocompta*) et le puceron vert du pêcher (*Myzus persicae*).

En ce qui concerne la récolte, elle peut commencer 45 jours après le semis ; ensuite, la plante complète rapidement son cycle pour produire de nombreuses graines. La récolte végétale consiste soit à couper la plante au ras du sol à 10-15 cm et consommer alors la jeune pousse,

soit en des cueillettes répétées des feuilles. Il ne paraît pas possible de couper la pousse principale au-dessus de deux feuilles pour espérer des ramifications, car la plante semble alors mourir (Bassett & Crompton, 1978).

Le chénopode blanc est une plante de jours longs, qui possède de petites fleurs hermaphrodites, pollinisées par le vent ; on observe un fort taux d'autogamie (90 %). Une fois que les feuilles ont jauni, la production des graines se fait comme pour des céréales. (Faucher, bien laisser sécher les tiges, battre, vanner et laisser à nouveau sécher les graines, car elles ont un pourcentage d'humidité encore trop élevé.)

Il existe quelques cultivars de chénopode blanc développés en Inde, mais surtout beaucoup de variétés locales avec une forte variabilité génétique – il existe ainsi des versions diploïdes, tétraploïdes et hexaploïdes, et selon les accessions, le chénopode blanc peut avoir des affinités avec des espèces différentes (Rana et al., 2010) - et aussi une forte variabilité géographique, qui font qu'on ne sait pas trop ce sur quoi on va tomber quand on se procure des graines ! L'espèce n'a pas fait l'objet d'un programme systématique de sélection, ce qui semble dommage, car les effets génotypiques semblent plus importants que les effets environnementaux sur la production et sa qualité (Bhargava et al., 2008) ; dès lors, il paraît possible de créer des cultivars intéressants. En France, il est même difficile de se procurer des graines de chénopode blanc[637] et on trouvera plus couramment celles du chénopode géant ou d'espèces proches comme le chénopode de Berlandier, l'épinard-fraise, ou le Bon-Henri (parfois appelés chénopodes, chez certains semenciers).

Andreasen, C., Litz, A. S., & Streibig, J. C. (2006). Growth response of six weed species and spring barley (Hordeum vulgare) to increasing levels of nitrogen and phosphorus. *Weed Research*, *46*(6), 503-512.

Bajwa, A. A., Zulfiqar, U., Sadia, S., Bhowmik, P., & Chauhan, B. S. (2019). A global perspective on the biology, impact and management of Chenopodium album and Chenopodium murale:

[637] Sauf aux « Semences du Puy ».

two troublesome agricultural and environmental weeds. *Environmental Science and Pollution Research*, *26*(6), 5357-5371.

Bassett, I. J., & Crompton, C. W. (1978). The Biology of Canadian Weeds.: 32 Chenopodium album L. *Canadian Journal of Plant Science*, *58*(4), 1061-1072.

Bhargava, A., Shukla, S., & Ohri, D. (2008). Genotype x environment interaction studies in Chenopodium album L.: an underutilized crop with promising potential. *Communications in Biometry and Crop Science*, *3*(1), 3-15.

Blackshaw, R. E., Brandt, R. N., Janzen, H. H., Entz, T., Grant, C. A., & Derksen, D. A. (2003). Differential response of weed species to added nitrogen. *Weed Science*, *51*(4), 532-539.

Eslami, S. V. (2011). Comparative germination and emergence ecology of two populations of common lambsquarters (Chenopodium album) from Iran and Denmark. *Weed Science*, *59*(1), 90-97.

Jellen, E. N., Kolano, B. A., Sederberg, M. C., Bonifacio, A., & Maughan, P. J. (2011). Chenopodium. In Chittaranjan Kole (Ed.), *Wild crop relatives: genomic and breeding resources* (p. 35-61). Springer, Berlin, Heidelberg.

Henson, I. E. (1970). The effects of light, potassium nitrate and temperature on the germination of Chenopodium album L. *Weed Research*, *10*(1), 27-39.

Maganti, M., Weaver, S., & Downs, M. (2005). Responses of spreading orach (Atriplex patula) and common lambsquarters (Chenopodium album) to soil compaction, drought, and waterlogging. *Weed Science*, *53*(1), 90-96.

Peter, K. V. (2004). *Underutilized and Underexploited Horticultural Crops*: Vol. 04 (Vol. 4). New India Publishing.

Poonia, A., & Upadhayay, A. (2015). Chenopodium album Linn: review of nutritive value and biological properties. *Journal of Food Science and Technology*, *52*(7), 3977-3985.

Qasem, J. R., & Hill, T. A. (1995). Growth, development and nutrient accumulation in Senecio vulgaris L. and Chenopodium album L. *Weed Research*, *35*(3), 187-196.

Rana, M. K., & Pandav, A. K. (2017). Chenopod. In M.K. Rana (Ed.), *Vegetable Crops Science* (pp. 219-226). CRC Press.

Rana, T. S., Narzary, D., & Ohri, D. (2010). Genetic diversity and relationships among some wild and cultivated species of Chenopodium L.(Amaranthaceae) using RAPD and DAMD methods. *Current Science*, 840-846.

Williams, J. T. (1963). Chenopodium album L. *Journal of Ecology*, *51*(3), 711-725.

Yorimitsu, Y., Kadosono, A., Hatakeyama, Y., Yabiku, T., & Ueno, O. (2019). Transition from C3 to proto-Kranz to C3–C4 intermediate type in the genus Chenopodium (Chenopodiaceae). *Journal of Plant Research*, *132*(6), 839-855.

18.4 Chou-rave

Le chou-rave (*Brassica oleracea* var. *gongylodes*) est un bel exemple du polymorphisme des choux et du travail de sélection. Ce qui est consommé est essentiellement la tige très courte et tubérisée, même si les feuilles le sont parfois aussi, quand la plante est jeune et la « boule » petite. À ce sujet, il vaut mieux ne pas attendre et ne pas viser des performances (le record est actuellement de 44 kg...), car la boule devient dure avec l'âge. Elle doit être pelée pour manger le chou-rave, soit cru en salade, soit selon divers modes de cuisson. En France, le chou-rave a longtemps été essentiellement considéré comme un légume fourrager, alors qu'il est un classique de la cuisine allemande ou d'Europe centrale[638].

Même si, à ma connaissance, un travail systématique de recherche de températures cardinales de germination n'existe pas pour le chou-rave, la température minimale est proche de 3-5 °C et les travaux de Tokumasu et al. (1985) montrent que la germination est réussie et rapide vers 20-25 °C. La semence doit être disposée entre 0.5 et 1 cm de profondeur (PMG=4 g).

Maynard et Hochmuth (2006) donnent des zéros de végétation minimum à 5 °C et un plafond vers 25 °C. La température de croissance optimale est de 13-15 °C (Baudoin et al., 2017). Pour un

[638] Cf. les noms de cultivars qui contiennent souvent Vienne, Danube ou directement des noms allemands.

chou, c'est une variété peu rustique (RHS=H3). Tout ceci nous conduit à des cultures, de préférence au printemps et à l'automne, mais qui s'avèrent plus difficiles en été et en hiver.

Pour la culture de printemps, le semis a lieu à l'intérieur, en mars, en terrine ou petits contenants ; il peut, à l'émergence, être amené en serre froide[639] ; il est repiqué en godet au bout de trois semaines. Il est ensuite transplanté trois nouvelles semaines plus tard : on vise, en fait, une implantation une à deux semaines avant les dernières gelées[640]. Les espacements varient de 15 à 25 centimètres. Biesiada (2008) souligne l'intérêt d'une couverture thermique à plat, de type P17, qui permet un gain de 7-10 jours. Des bâches noires de couverture du sol sont aussi employées pour accélérer son réchauffement (Baudoin et al., 2017). La récolte a lieu, selon la vitesse de cycle des cultivars, de 45 à 75 jours plus tard (sans compter donc les 30-45 jours de production du plant).

Le chou-rave est une plante bisannuelle, cultivée comme annuelle, elle est allogame à pollinisation entomophile. La montaison prématurée est un problème (Wiebe et al.,1992). Le chou-rave a un stade juvénile bref jusqu'à deux feuilles sans souci, puis des températures de 2 à 12 °C peuvent induire la floraison. La dévernalisation est heureusement assez efficace[641].

Pour la culture d'automne, le semis a lieu vers juin-juillet, en pleine terre, souvent en poquets de trois graines à 25-30 cm d'espacement (on espace généralement plus en automne et les cultivars choisis sont souvent plus imposants). Le poquet est éclairci à une seule plantule au stade 3-4 vraies feuilles. Il est également possible de transplanter, et des bâches blanches ou un paillage organique sont alors employés pour éviter la surchauffe de l'été.

La préconisation en serre de fertilisation du chou-rave est de 145–225 N / 80 P_2O_5 / 180 K_2O. (kg/ha, Baudoin et al. 2017). L'azote est souvent procuré en deux fois, à la préparation du sol et lorsque la tige tubérise, c'est-à-dire au stade 4-7 feuilles. La demande en potassium

---

[639] Mais avec un risque de montaison prématurée sur lequel nous reviendrons.

[640] En somme, un rétro-planning partant du 15/05 moins de deux semaines, moins trois semaines, moins encore trois semaines, donne un semis vers le 15/03.

[641] Par exemple, pour des plants en serre froide, les rentrer à l'intérieur à une température supérieure à 15 °C une ou plusieurs journées est suffisant.

est assez importante, comme c'est souvent le cas pour les légumes qui tubérisent : certains ajoutent, par conséquent, un peu de cendres. Les auteurs convergent sur le fait que l'arrosage doit absolument être régulier pour le chou-rave, cela s'exprime par des indications telles que (1) rester au-dessus de 65 % de la capacité au champ, (2) irriguer tous les 3-4 jours avec 10-15 mm ou (3) 25 mm par semaine. On visera donc deux irrigations par semaine pour combler l'évapotranspiration, en étant particulièrement attentif aux périodes de semis ou plantation, et de tubérisation.C'est ce problème de l'humidité du sol qui rend la culture de printemps plus simple que celle d'automne. Pour ce qui est de l'entretien de la culture, un désherbage s'avère indispensable pendant un mois pour un semis direct et les deux premières semaines de l'installation des transplants (Leela, 1987). Un petit buttage, un mois après la transplantation, sans toutefois recouvrir la boule, peut être effectué (Choudhary et al, 2014), afin de la poser sur le sol.

Les problèmes du chou-rave sont ceux des autres choux... On récolte quand la boule a la taille d'une balle de tennis, mais avec un sécateur et non pas une raquette. La boule se conserve deux à trois mois à 0 °C et forte humidité, mais seulement deux à trois semaines si les feuilles sont laissées.

En ce qui concerne les cultivars, on a le choix entre des boules petites, moyennes ou géantes. Leur couleur est blanche (vert clair) ou violette. Il y a des cultivars plutôt destinés au printemps ou à l'automne et plus rarement à l'été, avec différentes rapidités de cycle, et certains pouvant être démarré dès janvier. Il existe des hybrides F1 avec de bonnes résistances à la montaison, voire à l'éclatement de la boule.

Baudoin, W., Nersisyan, A., Shamilov, A., Hodder, A., Gutierrez, D., Pascale S, D. E., ... & Tanny, J. (2017). *Good Agricultural Practices for greenhouse vegetable production in the South East European countries-Principles for sustainable intensification of smallholder farms* (Vol. 230, p. 1-449). FAO.

Biesiada, A. (2008). Effect of flat covers and plant density on yielding and quality of kohlrabi. *Journal of Elementology, 13*(2).167-173.

Choudhary, A. K., Rana, K. S., Dass, A., Srivastav, M., Kumar, A., & Rahi, S. (2014). *Advances in vegetable agronomy*. An ICAR Publication, New Delhi. p358.

Leela, D. (1987). Weed control by herbicides in knol khol and radish. International *Journal of Pest Management, 33*(3), 214-219.

Maynard, D. N., & Hochmuth, G. J. (2006). *Knott's handbook for vegetable growers*. John Wiley & Sons.

Tokumasu, S., Kanada, I., & Kato, M. (1985). Germination behaviour of seeds as affected by different temperatures in some species of Brassica. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science, 54*(3), 364-370.

Wiebe, H. J., Habegger, R., & Liebig, H. P. (1992). Quantification of vernalization and devernalization effects for kohlrabi (Brassica oleracea convar. acephala var. gongylodes L.). *Scientia Horticulturae, 50*(1-2), 11-20.

18.5 Cresson alénois

Le cresson alénois[642] (*Lepidium sativum*) est une plante annuelle, érigée (50 cm) et ramifiée, faisant partie de la famille des brassicacées. On consomme en Europe, soit les micro-pousses, soit les jeunes feuilles au goût piquant, en les ajoutant à des salades, soit enfin, en petits bouquets, disposés sur le bord des assiettes, qui nourriront votre faim... de profits de distinction. Il est également possible d'en faire de très bonnes soupes. En Asie et en Afrique, on mange les graines entières au goût poivré, ou bien, on en extrait de l'huile avec diverses utilisations médicinales. Le cresson alénois est aussi employé dans des tests de qualité de compost à cause, d'une part, de sa surprenante vitesse de germination, et d'autre part, de son pourcentage de germination élevé. Ceci dit... cela n'a pas l'air de fonctionner très bien (Warman, 1999). Il est aussi utilisé comme plante modèle pour des études de toxicité.

La culture du cresson alénois est des plus simples. La température minimale de germination est de 1 °C et la maximale de 45 °C. Wagenvoort et Bierhuizen (1977), pour un bon taux de germination,

[642] Ce n'est pas un épithète à la noix, mais une déformation signifiant Orléans.

conseillent de dépasser 9 °C ; et à 20 °C les cotylédons émergent en deux ou trois jours ! C'est la plante cultivée la plus rapide sur tous leurs essais. La profondeur de semis doit être faible (PMG=1-2.5 g), de 0.5 cm, voire à la surface du sol. Il est possible de semer à la volée ou dans des bandes larges, mais il est plus courant de semer en lignes, pour des questions de désherbage et de récolte (avec un petit coup de ciseaux) plus rapides. En tout cas, le semis doit être dru, avec un espacement inférieur à 1 cm. (Pour une récolte de feuilles, pour des graines, c'est différent.) C'est aussi une plante qui pousse très bien en contenant, elle est d'ailleurs vendue ainsi, pour un usage alimentaire, dans certains pays européens. On peut aussi la cultiver en petits bouquets dans des plaques alvéolées ou en godets. Libre à nous de finir la culture, à l'intérieur si l'ensoleillement et l'entente avec votre partenaire de vie sont satisfaisants, ou bien de transplanter ensuite à l'extérieur.

Noorhosseini et al. (2018) ont mené une étude sur le trempage préalable des graines. Cela peut sembler inutile pour le cresson alénois qui est une bête de course, cultivé sur de petites surfaces en Europe, avec un arrosage qui peut être suivi : c'est sans doute plus intéressant dans un contexte de pays chauds, lorsque les possibilités d'irrigation sont limitées, afin d'obtenir des levées plus uniformes. Au-delà, l'article souligne que tremper les graines paraît être une procédure intéressante, mais comment s'y prendre ? La température de l'eau joue. Le médium (papier mouillé, sable ?), également. Sans parler de la durée de trempage (déjà largement évoquée dans la section 10.3.6) et aussi des conditions de séchage. (Avant de les semer, car les semences « collent » et on sème rarement dans l'immédiat, en tout cas pas de grandes surfaces.) On y réfléchira donc à deux fois, pour optimiser la technique avec des espèces plus concernées, comme les apiacées, par exemple.

Le cresson alénois est une plante de saison fraîche, il pousse très bien au printemps et à l'automne, et étant assez rustique, il peut passer l'hiver sous abri froid. En revanche, la culture d'été est plutôt à déconseiller, sauf à mi-ombre avec une humidité constante, car il montera très vite à graines et le goût des feuilles deviendra très fort.

Non seulement le cresson alénois émerge très rapidement, mais on peut cueillir des micro-pousses, dix jours après le semis ! Après un mois, la récolte de feuilles peut avoir lieu ; en coupant à trois

centimètres au-dessus du sol, une seconde récolte sera possible. Les feuilles moins jeunes ayant un goût très prononcé, il vaut mieux ne pas attendre et prévoir des successions de semis.

La floraison se produit deux mois après le semis. Les fleurs blanches tirant sur le rose sont hermaphrodites et plutôt protogynes. Elles sont pollinisées par des insectes, avec une reproduction majoritairement allogame. Le cycle de vie complet dure trois mois, les fruits sont de petites siliques contenant deux graines.

On conseille un sol riche, mais une fertilisation n'est pas nécessaire, sauf peut-être un petit coup de fouet au printemps. Vu sa vitesse de germination et sa récolte rapide, les mauvaises herbes posent peu de problèmes, à part si l'objectif est la production de graines. Cultivé en ligne, un rapide coup de sarcloir règle l'affaire. Le cresson alénois souffre peu des maladies et des ravageurs. Tout juste, quelques attaques d'altises sont possibles et peuvent être contenues par un voile anti-insectes, dans les saisons à risques (où sa culture est déconseillée).

On distingue deux variétés botaniques : var. *crispum* à feuilles frisées et var. *latifolium* à feuilles larges et plates. Les cultivars sont rares.

Gupta, R., & Choudhary, P. (2020). Botanical description of garden cress (Lepidium sativum L.) plant and physical characteristics of its seeds. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, *9*(5), 2424-2428.

Jansen, P.C.M. (2004). Lepidium sativum. In G.J.H. Grubben and O.A. Denton (Eds.), *Plant Resources of Tropical Africa 2. Vegetables* (p. 365-367). PROTA Foundation, Wageningen, Netherlands / Backhuys Publishers, Leiden, Netherlands / CTA, Wageningen, Netherlands.

Noorhosseini, S. A., Jokar, N. K., & Damalas, C. A. (2018). Improving seed germination and early growth of garden cress (Lepidium sativum) and basil (Ocimum basilicum) with hydro-priming. *Journal of Plant Growth Regulation*, *37*, 323-334.

Wagenvoort, W. A., & Bierhuizen, J. F. (1977). Some aspects of seed germination in vegetables. II. The effect of temperature fluctuation, depth of sowing, seed size and cultivar, on heat sum

and minimum temperature for germination. *Scientia Horticulturae*, *6*(4), 259-270.
Warman, P. R. (1999). Evaluation of seed germination and growth tests for assessing compost maturity. *Compost Science & Utilization*, *7*(3), 33-37.

18.6 Panais

Le panais (*Pastinaca sativa*) est une plante herbacée, bisannuelle, de la famille des apiacées. Comme le souligne l'expression : « il n'est panais de la dernière pluie », ce légume est cultivé en Europe et en Angleterre depuis l'Antiquité, mais a été, peu à peu, supplanté par la carotte et surtout la pomme de terre. Il s'agit pourtant d'une racine très productive, de bonne conservation et avec un goût remarquablement fin. Il peut être cuisiné de multiples façons. Tout ce que vous avez toujours voulu faire avec la pomme de terre et la carotte, vous pouvez le faire avec le panais ! Plus rarement, les feuilles sont employées, et même les graines, un peu comme... avec la coriandre. Alors, où est le problème ?

Le premier problème concerne la germination : le panais est notoirement difficile, lent et peu uniforme à ce niveau. McCormick et al. (2014) indiquent que ses températures cardinales sont de 0 °C (minimale), de 37 °C (maximale), avec une valeur optimale basse de 15 °C. D'autre part, le temps thermal de germination est de 167 jours (par rapport à la base de 0 °C), ce qui signifie qu'à 5 °C, par exemple, il lui faut 167/(5-0)=33 jours. On optera donc pour un semis direct en mars-mai[643] (sous couvert ?), avec un espacement de 5 cm (à éclaircir à 10 cm). La profondeur de semis doit être faible, de l'ordre de 1 cm (PMG= 2-4 g). Il est indispensable, comme pour la carotte, de *tenir la mouillure* jusqu'à l'émergence. Parmi les aides à la germination, il est possible d'envisager un pré-trempage des graines dans l'eau, pendant 12 heures, ce qui est une méthode économique fonctionnant plutôt bien (Soltani & Soltani, 2015). Il existe également des graines enrobées et

[643] Pas avant, ce serait très long et il y aurait peut-être un risque de montée à graines prématurée ; et pas après, car la température pourrait vite monter...

pré-germées, souvent des hybrides F1, c'est peut-être le moment de tenter le diable ! Pour nous compliquer encore la tâche, il s'agit d'une des semences qui se conservent le moins longtemps... Il est aussi envisageable de semer des poquets de trois graines, tous les dix centimètres, pour multiplier les chances de germination. La dernière option est de se préparer à une deuxième tentative de semis, un mois plus tard, si la première ne prend pas.

Un deuxième problème est celui de la longueur de cycle du panais, qui prend de quatre à cinq mois jusqu'à la récolte. Son démarrage est très lent et la compétition avec les mauvaises herbes va être forte. Si on se base sur la carotte, la période critique est de trois à six semaines après l'émergence. Faisant office également de désherbage, un buttage peut être pratiqué.

Un troisième problème est de ne pas faire fourcher la racine : la transplantation est, par conséquent, impraticable. Le lit de semences doit être particulièrement soigné, sans cailloux, bien ameubli et assez profond. Le sol doit être bien drainé.

En ce qui concerne la fertilisation, un sol riche est conseillé, Maynard et Hochmuth (2006, Table 4.36) préconisent 125-170 N / 85 P_2O_5 / 280 K_2O (kg/ha). Le panais est une culture de climat frais et tempéré, qu'il faudra aider à passer l'été, en ne négligeant pas l'arrosage. Un paillage limitera ses besoins, mais aussi la concurrence des adventices. Le panais est moins sensible que la carotte aux maladies et aux insectes, mais un filet est parfois employé pour ne pas prendre de risques.

Le panais peut se conserver en terre pendant l'hiver (RHS=H5), surtout s'il est recouvert d'un paillage, ce qui permet une extraction plus facile. Les premiers gels augmentent d'ailleurs sa saveur, toutefois, plus il avance en âge, et plus il devient fibreux. Il se conserve également très bien au réfrigérateur.

Concernant la reproduction, le panais est essentiellement allogame, certaines de ses fleurs sont hermaphrodites et d'autres sont mâles. Elles sont disposées en proportions différentes selon les niveaux d'ombelles.

Il existe des variétés de longueurs différentes (rond, demi-long ou long) et certaines plus ou moins résistantes aux maladies.

Lim, T. K. (2015). Pastinaca sativa. *Edible Medicinal and Non Medicinal Plants: Volume 9, Modified Stems, Roots, Bulbs* (p. 417-428). Springer, Dordrecht.

Maynard, D. N., & Hochmuth, G. J. (2006). *Knott's handbook for vegetable growers*. John Wiley & Sons.

McCormick, J. I., Goodger, R. A., & Chynoweth, R. J. (2014). Cardinal temperatures and vernalisation requirements for a selection of vegetables for seed production. *Agronomy New Zealand, 44*, 71-83.

Rubatzky, V. E., & Yamaguchi, M. (2012). *World vegetables: principles, production, and nutritive values*. Springer Science & Business Media.

Soltani, E., & Soltani, A. (2015). Meta-analysis of seed priming effects on seed germination, seedling emergence and crop yield: Iranian studies. *International Journal of Plant Production, 9*(3), 413-432.

Splittstoesser, W. E. (1990). *Vegetable growing handbook*. Springer Science & Business Media.

18.7 Pissenlit

Le pissenlit (*Taraxacum* sect. *Ruderalia*) est une plante pérenne, herbacée, formant une rosette, appartenant à la famille des astéracées. Comme l'indique son étrange nom latin, il est assez compliqué de parler d'espèce pour cette plante : il s'agit plutôt d'un complexe de micro-espèces, réunies dans ce qu'on appelle une section botanique[644]. Ceci provient largement du mode de reproduction du pissenlit qui est apogame. Pour entrer dans le détail, la « fleur » du pissenlit est en fait un capitule qui regroupe un grand nombre de véritables fleurs (d'où le nom précédent de la famille botanique : les composées), qui sont hermaphrodites. Ces fleurs très mellifères[645] sont pollinisées par des insectes, mais le pollen ne sert, en fait, qu'à déclencher une reproduction non-sexuée. Ce sont les gènes de la plante-mère qui sont

[644] Et les chercheurs ne sont pas d'accord sur ces regroupements dans le cas très embrouillé du pissenlit.....

[645] Le pissenlit est parfois appelé « or du printemps », car il permet aux abeilles de trouver leur première nourriture de façon abondante.

« dédoublés » automatiquement : la plante-fille en étant donc un clone parfait (aux mutations près). Ceci génère des populations de plantes identiques. L'une des conséquences est qu'un net polymorphisme est observé (d'une population à l'autre) sur la forme des feuilles ; selon la plante, cela peut aller de la forme classique dentée (d'où est tiré un autre de ses noms : le dents-de-lion) à une forme nettement plus ovale.

Le pissenlit est souvent considéré comme une mauvaise herbe, dont il peut cependant être amusant de souffler le capitule fécondé, formé d'un ensemble de fruits secs (akène), portant une aigrette (pappus). Le pissenlit est parfois cueilli à l'état sauvage pour ses feuilles particulièrement délicieuses en salade[646]. Il est également possible d'utiliser les boutons floraux comme substituts de câpres, ou de les frire. Des recettes de grand-mère existent pour réaliser des boissons à partir des capitules. Certains zombies mangent même les pissenlits par la racine. Nous parlerons dans cet article de la forme « améliorée » du pissenlit, celle que l'on cultive[647], qui est moins amère et à feuilles plus grandes.

Les températures cardinales de germination sont de 4 °C (minimale), de 32 °C (maximale), et sont optimales entre 18 et 25 °C. La germination du pissenlit n'est pas toujours simple, ni uniforme. Letchamo et Gosselin (1996) précisent que la lumière aide, ainsi qu'une profondeur de semis entre 0 et 1 cm (PMG=0.5 g). Il faut également se méfier des conditions de stockage des semences, et l'une des meilleures solutions est de les congeler. Le pissenlit peut être transplanté comme chez Kuusi et al. (1984), qui le laissent à l'intérieur à 20 °C pendant six semaines, avec deux graines par contenant, pour ensuite garder le plus vigoureux. L'espacement usuel est de 7.5-25 cm sur le rang[648]. Le semis direct est également possible au printemps.

Le pissenlit est une plante de saison fraîche, qui est très rustique. Même si ses feuilles disparaissent en cas de forts gels, le plus souvent, il repartira de la racine au printemps. Il est parfois planté à mi-ombre

---

[646] Mais les feuilles peuvent aussi être légèrement cuites, à la façon de la roquette, sur des pâtes ou de la pizza.

[647] Et qui a aussi l'avantage de ne pas présenter de problèmes divers de toxicité, toujours possibles avec une cueillette sauvage.

[648] Ce n'est pas très précis, j'en conviens, le classique semble être de 20 cm.

pour diminuer l'amertume. Il vaut mieux un sol fertile : Kuusi et al. (1984) emploient une fertilisation de base de 100 N / 40 P_2O_5 / 170 K_2O (kg/ha). Une bonne irrigation est importante pour qu'il puisse passer l'été sans stress excessif. Il arrive parfois que le pissenlit fleurisse la première année, on éliminera alors le capitule et son pédoncule. Le désherbage doit être suivi, car le démarrage, particulièrement en semis direct, est lent, et la culture est longue (parfois le printemps suivant, voire même sur des années...).

Il existe plusieurs maladies (*Sphaerothecafuliginea*, *Puccinia taraxaci*, *Ramularia taraxaci*, *Botrytis cinerea*) qui culminent en fin d'été-début d'automne, mais elles ne menacent pas la récolte de printemps. De la même façon, les ravageurs ne créent pas véritablement de dommages, à part éventuellement les campagnols.

La récolte des feuilles peut avoir lieu en automne, en hiver ou au printemps. Il existe de nombreuses variantes. Primo, la récolte de septembre est la plus productive, mais avec généralement une forte amertume. On utilise souvent un blanchiment, en retournant des pots au-dessus de la plante, ou bien, à plus grande échelle, en les recouvrant d'une bâche opaque. Il est reconnu, dans les tests sensoriels, que le blanchiment améliore la saveur. Secundo, il existe une technique de forçage, plutôt employée à l'automne, qui consiste à retirer la racine du sol, couper les feuilles, puis à la replanter dans un bac de sable pour la faire pousser à l'obscurité, à la façon des endives. Tertio, après avoir éliminé les feuilles (ou les avoir récoltées), on va attendre la repousse du printemps, qui est vigoureuse, et soit cueillir les jeunes feuilles telles quelles, qui ne sont pas aussi amères que celles d'automne, soit en ayant préalablement durant l'hiver couvert la plante avec un buttage, une bâche, un pot... Il faut, toutefois, se méfier de la floraison pour trouver la bonne fenêtre de récolte, car cette floraison est particulièrement rapide et nuit fortement à la saveur des feuilles.

Grauso, L., Emrick, S., de Falco, B., Lanzotti, V., & Bonanomi, G. (2019). Common dandelion: A review of its botanical, phytochemical and pharmacological profiles. *Phytochemistry Reviews*, *18*, 1115-1132.

Kuusi, T., Hårdh, K., & Kanon, H. (1984). Experiments on the cultivation of dandelion for salad use: l study of cultivation

methods and their influence on yield and sensory quality. *Agricultural and Food Science*, *56*(1), 9-22.

Letchamo, W., & Gosselin, A. (1996). Light, temperature and duration of storage govern the germination and emergence of Taraxacum officinale seed. *Journal of Horticultural Science*, *71*(3), 373-377.

Martinková, Z., & Honěk, A. (2007). The effect of cryopreservation on germination of dandelion seeds. *Plant Protection Science*, *43*(2), 63.

Mitich, L. W. (1989). Common Dandelion–the Lion's Tooth. *Weed Technology*, *3*(3), 537-539.

Rubatzky, V. E., & Yamaguchi, M. (2012). *World vegetables: principles, production, and nutritive values*. Springer Science & Business Media.

Splittstoesser, W. E. (1990). *Vegetable growing handbook*. Springer Science & Business Media.

Washitani, I. (1984). Germination responses of a seed population of Taraxacum officinale Weber to constant temperatures including the supra-optimal range. *Plant, Cell & Environment*, *7*(9), 655-659.

18.8 Roquette(s)

Il existe essentiellement deux espèces qui sont désignées par le terme de « roquette » : il s'agit de la roquette cultivée (*Eruca sativa*) et de la roquette sauvage (*Diplotaxis tenuifolia*). Ce qui les réunit est la forme de leurs feuilles, aux bords plus ou moins dentés, leur goût de moutarde et leur appartenance à la famille des brassicacées. En revanche, nous verrons qu'elles présentent aussi de nombreuses différences et que leur mode de culture doit en tenir compte. Les roquettes sont connues depuis l'Antiquité, particulièrement en Italie ; mais leur popularité a explosé dans les années 1990 ; au niveau agronomique, ces années ont aussi été marquées par la tenue de deux symposiums qui lui ont été consacrés[649].

[649] Padulosi S (Ed.) (1995). Rocket Genetic Resources Network. Report of the First Meeting, 13-15 November 1994, Lisbon, Portugal. Padulosi S, Pignone D (Eds.)

En Europe, ce sont d'abord les feuilles qui sont consommées, soit crues en salades plus ou moins mixtes, éventuellement sous forme de micro-pousses ou de jeunes pousses, soit « fanées » sur des pizzas, des pâtes ; la roquette est un marqueur de la cuisine italienne. Les feuilles plus âgées ont généralement un goût très prononcé et sont plutôt employées pour la constitution de sauces, de pestos ou de soupes. Les fleurs, comme celles d'autres brassicacées, peuvent décorer et épicer un plat. En Asie et en Afrique, les graines sont également utilisées comme épices ou pour fabriquer de l'huile. Le goût moutardé des roquettes vient de glucosinolates, qui leur confèrent des propriétés médicinales. Elles contiennent également une quantité notable de vitamine C.

18.8.1 Roquette cultivée

La roquette cultivée est une plante herbacée, érigée, annuelle. Elle présente un polymorphisme foliaire important. En fait, on ne sait pas si le genre *Eruca* comporte une seule espèce ou bien quatre ou cinq... La forme des feuilles va donc de l'ovale au très fin et dentelé selon les cultivars, et c'est souvent cette dernière apparence qui est privilégiée au jardin, car elle évoque plus « l'idée de roquette ».

Ses températures cardinales de germination sont de 1 °C (minimale), de 30 °C (optimale), et de 41 °C (maximale). Elle a un excellent pourcentage de germination sur une large gamme de 5 à 35 °C. C'est à partir de 15 °C qu'elle émerge assez rapidement et plus encore entre 20 et 30 °C ; il faudra essayer de tirer parti de cette propriété. (Le cultivar 'Speedy' est particulièrement rapide.) En général, si la roquette tarde plus de dix jours, il vaut mieux recommencer le semis. La germination ne nécessite pas de lumière et la profondeur de semis idéale est de 2 cm (PMG=2 g).

La roquette cultivée croît bien en milieu tempéré, particulièrement au printemps et à l'automne. Bien qu'assez rustique, elle passera mieux l'hiver sous protection. Vu sa rapidité de germination et de croissance, on peut la semer jusqu'en septembre et la transplanter jusqu'en octobre. C'est une plante méditerranéenne qui ne demande pas une

---

(1997). Rocket: A Mediterranean crop for the world. Report of a workshop 13-14 December 1996, Legnaro (Padova), Italy.

grande irrigation, sauf en cas de fortes chaleurs ; irrigation qui limite, par ailleurs, un goût trop prononcé des feuilles. Toutefois, à l'approche de l'été, la montée à graines prématurée est un véritable problème. Elle est causée par les jours longs et les températures élevées : on évitera donc de la cultiver les mois les plus chauds. Le cas échéant, il faudra laisser la roquette cultivée à mi-ombre, arroser régulièrement et choisir un cultivar résistant comme 'Adagio'.

Il existe plusieurs possibilités pour l'installation de la roquette cultivée. Le semis direct peut se faire soit en ligne, avec un espacement de 1 à 5 cm sur le rang et 10 à 15 cm entre les rangs ; soit à la volée[650] pour des micro-pousses à ramasser en 15 jours, et les densités sont alors affolantes, de l'ordre de 30 000 graines au mètre carré (Murphy & Pill, 2010) ! Il est également possible de la transplanter, au bout d'un mois, avec des bouquets de cinq plantules au stade quatre feuilles, qu'on installera à 10 ou 20 cm d'espacement (en aérant plus en hiver, du fait des maladies). Les travaux de Dolezalova et al. (2013) suggèrent de transplanter au printemps et d'employer le semis direct en fin d'été et au début d'automne.

La roquette cultivée répond bien à la fertilisation azotée, mais il faut se méfier de l'accumulation de nitrates dans les feuilles. Elle répond aussi à une fertilisation en potassium raisonnable. Pour des micro-pousses, on préfèrera une fertilisation liquide, immédiatement disponible. Les densités importantes et la croissance très rapide font que le désherbage est léger, mais sera facilité par la culture en lignes.

Les problèmes de la roquette cultivée sont ceux de nombreuses brassicacées : des maladies fongiques qu'on minimisera en diminuant la densité et l'irrigation pendant les périodes froides ; et souvent des altises, qu'un filet pourra contenir, lorsqu'il fait chaud.

La récolte commence deux semaines après le semis pour les micro-pousses, trois à six semaines après pour les jeunes pousses et les feuilles. Deux ou trois coupes successives sont pratiquées.

L'inflorescence en racème porte des fleurs hermaphrodites, blanches à jaunes. L'espèce est préférentiellement allogame. Le fruit est une silique.

---

[650] Mais recouvert ensuite de deux centimètres de terre ou de compost.

18.8.2 Roquette sauvage

C'est une plante herbacée, érigée, plus haute que la roquette cultivée, et qui est, elle, pérenne. Son goût est souvent considéré comme meilleur et elle commence à être plus cultivée commercialement que l'autre roquette.

Il faut vraiment faire attention à la température de germination : elle a un pourcentage de germination qui ne devient acceptable qu'entre 20 et 30 °C et gagne en vitesse à 25-30 °C, mais elle reste nettement plus lente que la roquette cultivée. Il ne faut pas semer au lance-roquettes, la graine doit vraiment être déposée à la surface du sol, non pas pour des besoins de lumière, car elle germe dans l'obscurité, mais parce que la semence est très petite (PMG=0.25 g).

La roquette sauvage est plutôt une plante de saison fraîche, qui pousse de plus en plus vite jusqu'à 25 °C. Cependant, elle peut aussi facilement passer l'été, car elle présente une photosynthèse intermédiaire C3-C4 et un point de compensation en CO_2 assez bas. Le problème est, à nouveau, la montée à graines prématurée, avec une floraison qui peut se produire au bout d'un mois seulement (et rendre les feuilles peu agréables à manger) ; il existe un cultivar mutant 'Rock-ad' qui recule cette échéance. La roquette sauvage possède une bonne racine pivot, ce qui lui permet de mieux atteindre l'eau, les nutriments et autorise également une meilleure repousse (après récolte). Très rustique, elle peut passer l'hiver en plein champ : c'est donc la roquette à privilégier pour l'hiver, avec un semis fin août-début septembre.

La récolte demande un mois ou plus d'attente, elle est moins rapide que la roquette cultivée. Elle se conserve encore moins bien : une fois récoltée, il faut la mettre au réfrigérateur immédiatement. Quatre à cinq coupes sont cette fois possibles, sur un cycle automne-printemps, pour des feuilles de 10 à 15 cm. La coupe s'opère à 3-5 cm au-dessus des cotylédons. Pour une récolte de jeunes feuilles, on utilise des densités allant de 1 800 à 2 800 graines par mètre carré, dans des rangs espacés de 5 cm. On emploie aussi des transplants, avec 15-20 graines par contenant, qui sont, 20-30 jours plus tard, installés à 10-15 cm.

La fertilisation azotée ne doit pas dépasser 100 kg/ha, sauf en cas de coupes multiples. Sur la durée d'un cycle d'hiver, trois à cinq arrosages de 10 mm devraient suffire, il vaut mieux ne pas exagérer,

car les maladies fongiques sont courantes. Le désherbage est minimal : la roquette sauvage est assez compétitive et produit d'ailleurs des substances allopathiques.

Elle porte également des fleurs jaunes en racème, mais plus petites que la roquette cultivée. La silique comporte deux rangées (d'où le nom du genre *Diplotaxis*) de graines très petites. La roquette sauvage se ressème très facilement, elle est d'ailleurs considérée comme une mauvaise herbe dans certains pays.

Il existe plusieurs cultivars d'origine italienne, et même des hybrides F1. 'Dragon tongue' se distingue par de jolies nervures rouges. *Diplotaxis muralis*, une autre espèce, assez proche et comestible, est très peu cultivée.

Bakhshandeh, E., Pirdashti, H., Vahabinia, F., & Gholamhossieni, M. (2020). Quantification of the effect of environmental factors on seed germination and seedling growth of Eruca (Eruca sativa) using mathematical models. *Journal of Plant Growth Regulation*, *39*(1), 190-204.

Bell, L., & Wagstaff, C. (2019). Rocket science: A review of phytochemical & health-related research in Eruca & Diplotaxis species. *Food Chemistry: X*, *1*, 100002.

Caruso, G., Parrella, G., Giorgini, M., & Nicoletti, R. (2018). Crop systems, quality and protection of Diplotaxis tenuifolia. *Agriculture*, *8*(4), 55.

Dolezalova, I., Duchoslav, M., & Dusek, K. (2013). Biology and yield of rocket (Eruca sativa Mill.) under field conditions of the Czech Republic (Central Europe). *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, *41*(2), 530-537.

Hall, M., Jobling, J., & Rogers, G. (2012a). The germination of perennial wall rocket (Diplotaxis tenuifolia [L.] DC.) and annual garden rocket (Eruca sativa Mill.) under controlled temperatures. *Plant Breeding and Seed Science*, *65*, 15-28.

Hall, M., Jobling, J., & Rogers, G. (2012b). Some perspectives on rocket as a vegetable crop: A review. *Journal of Fruit and Ornamental Plant Research*, *76*(1), 21-41.

Ibn Oaf, H.S. (2004). Eruca sativa. In G.J.H. Grubben and O.A. Denton (Eds.), *Plant Resources of Tropical Africa 2. Vegetables*

(p. 294-297). PROTA Foundation, Wageningen, Netherlands / Backhuys Publishers, Leiden, Netherlands / CTA, Wageningen, Netherlands.

Kenigsbuch, D., Ovadia, A., Shahar-Ivanova, Y., Chalupowicz, D., & Maurer, D. (2014). "Rock-Ad", a new wild rocket (Diplotaxis tenuifolia) mutant with late flowering and delayed postharvest senescence. *Scientia Horticulturae*, *174*, 17-23.

Kleemann, S. G., Chauhan, B.S., & Gill, G.S. (2007). Factors affecting seed germination of perennial wall rocket (Diplotaxis tenuifolia) in Southern Australia. *Weed Science*, *55*(5), 481-485.

Murphy, C., & Pill, W. (2010). Cultural practices to speed the growth of microgreen arugula (roquette; Eruca vesicaria subsp. sativa). *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, *85*(3), 171-176.

Nurzynska-Wierdak, R. (2009). Growth and yield of garden rocket [Eruca sativa Mill.] affected by nitrogen and potassium fertilization. *Acta Scientiarum Polonorum. Hortorum Cultus*, *8*(4).

Tripodi, P., Francese, G., & Mennella, G. (2017). Rocket salad: crop description, bioactive compounds and breeding perspectives. *Advances in Horticultural Science*, *31*(2), 107-114.

Une couille dans le potager

Après avoir décidé de m'adonner à la culture d'un potager, j'ai lu de nombreux ouvrages traitant du sujet ; j'ai aussi regardé maintes vidéos réalisées par des amateurs plus ou moins expérimentés ; et certaines pratiques conseillées m'ont paru, d'emblée, assez... bizarres. En conséquence, par réflexe professionnel, pourrait-on dire, j'ai consulté la littérature académique, en l'occurrence agronomique, et elle a confirmé mes premières impressions[651].

J'ai alors commis trois *billets d'humeur*, sur des sujets anecdotiques. Mais je n'aime guère *malparler*, c'est pourquoi je me suis rapidement embarqué dans un projet plus positif : celui de voir ce que la science avait à dire sur certains légumes peu répandus, puis sur la conduite d'un potager. Et si je reste attaché à ces trois billets, et que je les ai conservés, c'est uniquement parce qu'ils constituent les prémices d'*Homo sapiens* var. *hortus*.

[651] Ça n'a pas toujours été le cas par la suite...

19 Calendrier lunaire

On en arrive à un sujet particulièrement excitant : faut-il « jardiner avec la Lune », ou en un sens plus restreint, utiliser un de ces calendriers lunaires pour effectuer nos semis, plantations et récoltes ?

Une première réponse à la question nous est fournie dans l'un des journaux scientifiques les plus célèbres : *Nature*, en 1946. Beeson conclut que la seule preuve expérimentale est celle avancée par Kolisko (pas dans une revue scientifique et sans statistiques) et que « l'ensemble des autres chercheurs dans le monde ont été incapables de découvrir une corrélation consistante entre la Lune et les processus vitaux des plantes. Certains reconnaissent toutefois qu'une telle influence peut exister, mais qu'elle est alors trop obscure pour être une quelconque utilité pratique en agriculture. »

Une deuxième réponse, plus récente (Mayoral et al., 2020), provenant d'une autre très bonne revue (*Agronomy*), expose, d'une part, qu'une explication physique de l'effet de la Lune en termes de gravitation, de luminosité nocturne ou de champ magnétique ne tient pas la route ; d'autre part, que l'effet de la Lune n'est mentionné dans aucun manuel d'enseignement de botanique ou de physiologie des plantes, manuels qui constituent la version consolidée de la science[652] ; enfin, concernant les recherches agronomiques, on en arrive aux travaux de Spiess (1990), aux résultats plutôt négatifs, et à ceux de Kollerstrom et Staudenmaier (2001) clairement positifs, que nous allons étudier en détail plus loin.

On comprendra, dès lors, le peu de volonté des chercheurs en agronomie de creuser la question plus avant, car les causes explicatives usuellement évoquées de l'effet de la Lune sont réfutées par la physique : elles restent donc inexpliquées, et les précédentes expérimentations ont montré peu de chances de résultats positifs. Stratégiquement, le but du chercheur est la publication. Passer deux

[652] Même si quelques publications scientifiques avancent des corrélations entre les cycles lunaires et les mouvements des feuilles de certaines espèces de plantes, le lien avec leur pollinisation nocturne pour d'autres, ou la capacité à percevoir la « lumière lunaire » nocturne pour quelques-unes.

ou trois ans de son existence à tenter de montrer, soit qu'il n'y a pas d'effet (ce qui est toujours très difficile à publier) de la Lune, soit qu'il y a un effet, contre toute attente de la communauté scientifique, qu'il va donc falloir convaincre, avec un travail irréprochable...

En revanche, il y a une très forte volonté des partisans de l'agriculture biodynamique de montrer une telle influence de la Lune sur les cultures. Pour en expliquer rapidement la raison, cette agriculture alternative a été proposée en 1924 par Rudolf Steiner (qui ne possédait aucune formation, ni expérience professionnelle dans le domaine de l'agriculture). Les comparaisons de la biodynamie avec l'agriculture biologique ne montrent pas de différences entre les deux, car leurs pratiques diffèrent peu, sauf en ce qui concerne cinq éléments. Le plus important de ces éléments est constitué de préparations spécifiques, dont l'efficacité a été réfutée par Chalker-Scott (2013). Une technique de protection biologique (*pest ashing*), consistant à brûler les ravageurs (ou les mauvaises herbes) et à répandre leurs cendres pour éloigner les autres, n'a pas montré son utilité (Eason & Hickling, 1992). Restent la disposition de menhirs dans les parcelles, dite géoacupuncture, et la biocristallisation, non testées à ma connaissance, et enfin, l'influence de la Lune. On saisit alors l'importance pour le mouvement biodynamique de sa preuve[653], car sinon la certification Demeter n'aurait aucun sens par rapport à une certification AB classique.

Le seul article positif, celui de Kollerstrom et Staudenmaier (*op. cit.*), peut également servir de point d'appui à d'autres articles, comme par exemple, celui de Sivasankari et Thimmaiah (2021) : à mon avis très médiocre à de nombreux points de vue, en ânonnant les résultats de Kollerstrom et Staudenmaier, mais n'y ajoutant rien ; il a été publié dans un journal que j'ai peine à qualifier de scientifique, vu l'acceptation de cet article alors que son sujet n'a rien à voir avec les objectifs de la revue (*International Journal of Complementary and Alternative Medecine)* et vu, disons, la qualité des expertises (ne

[653] Enfin, pas tant que cela, car la position du mouvement rejoint souvent celle de son fondateur, qui se pense ouvertement au-dessus de la science avec ses intuitions. On reconnaîtra néanmoins à Steiner le mérite d'avoir été un des initiateurs de l'agriculture biologique (et un innovateur en pédagogie).

regardez, au hasard, que le rapport entre la bibliographie et les citations dans le texte...) ; c'est le papier qui ne sert à rien, dans une revue douteuse... mais qui pourra ensuite être lui-même cité et faire nombre !

Nous allons donc nous concentrer sur cet unique article positif publié à ce jour, qui revisite les deux articles de Spiess (1990). Mais nous allons faire œuvre de *science-fiction*. Il faut en effet savoir que, pour être accepté, un article soumis à une revue est relu anonymement par au moins deux experts[654]. De leurs évaluations, dépendra le sort de l'article : accepté, à modifier ou refusé. J'ai déjà joué ce rôle et j'aurais pu expertiser un tel papier, car il repose essentiellement sur des considérations statistiques. Je vais donc, à présent, livrer un compte-rendu de l'expertise que j'aurais pu en faire. Pour casser le suspense, mon évaluation est « demande de modifications majeures », ce qui signifie qu'il n'aurait jamais pu être publié en l'état. C'est bien de la science-fiction, puisqu'il a, bel et bien, été accepté ! Et je donne donc les points devant être améliorés, ce qui permettra au lecteur de se faire une idée critique de son contenu (l'article original est disponible en ligne). Suivez-moi dans l'univers impitoyable de l'expertise des articles académiques.

En ce qui concerne l'introduction, il est nécessaire d'expliquer les différents cycles lunaires existants au lecteur, sans doute plus au fait des cycles de la Terre en agriculture. Le classique cycle synodique de 29.5 jours, auquel se réfère Steiner, l'inspirateur de la biodynamie, le cycle anomalistique du périgée et de l'apogée, le cycle draconitique des nœuds lunaires auquel, sauf erreur (?), il est fait allusion par la suite, et également le cycle de la Lune ascendante ou descendante, très souvent employé dans les calendriers lunaires. Enfin, celui de Thun qui semble être celui utilisé, est le cycle sidéral : faisant référence aux constellations du zodiaque. Quant à ce zodiaque, il ne s'agit visiblement pas du *zodiaque astronomique* de 13 constellations inégales, mais du *zodiaque astrologique* à 12 constellations égales. Étant donné que la théorie du zodiaque astrologique constitue un échec

[654] D'abord évalué par les éditeurs afin de voir s'il correspond aux objectifs de la revue.

patenté de prédictions en astrologie (Dean & Kelly, 2003), en quoi serait-elle censée mieux fonctionner pour des végétaux ? Il faudrait, en outre, expliquer pourquoi une référence est faite aux constellations du zodiaque, qui ont du sens dans le plan de l'écliptique, alors que celui de l'orbite de la lune est différent de 5° ? Parmi ces différents cycles lunaires, il est choisi d'écarter le cycle synodique, défendu par Steiner le fondateur, et visiblement celui anomalistique et celui de la lune montante et descendante : sur quelle base théorique se fondent ces mises à l'écart ? Le calendrier de Thun préconise également (p. 249) les jours d'éclipse (nœuds lunaires, donc cycle draconitique) de ne pas semer, et les auteurs semblent dire que les preuves sont insuffisantes à ce sujet. Très bien, mais quelles sont-elles, et en quoi sont-elles insuffisantes ?

Les auteurs établissent ensuite une *correspondance* entre les douze constellations et quatre « éléments » (eau, feu, terre, air), puis les quatre « forces éthériques » de Steiner, et enfin, quatre catégories de légumes. On aimerait en savoir plus, d'une part, sur les fondements théoriques de ces classifications, et les applications précédentes de chacune, et d'autre part les raisons de ces correspondances ?

Pour revenir à un thème plus botanique, la catégorisation des légumes est peu standard. Pour prendre le cas des légumes « racines » cités par les auteurs, la pomme de terre est un tubercule d'une tige, certes souterraine, mais en aucun cas une racine, et le radis est un hypocotyle tubérisé, et non pas une racine. Il est plus usuel scientifiquement de regrouper les légumes en familles botaniques ou en genres, or, ici, l'effet de la lune semble être le même sur plusieurs familles (solanacées, brassicacées), regroupées dans une même catégorie (« racine »), et plusieurs familles se retrouvent dans plusieurs catégories (*e.g.* solanacées avec pomme de terre dans « Racines » et tomate dans « Grains/Fruits »)... Plus surprenant encore, la betterave, que l'on suppose légume « Racine » (bien que son tubercule soit, à la fois, racine et hypocotyle) et la bette à cardes probablement légume « Feuille » sont *une seule et même espèce*. Comment est-il possible de les retrouver dans deux groupes différents ?

Passons maintenant à l'étude des données, et nous allons nous concentrer sur celles de Spiess[655]. Celles sur le seigle ne sont pas analysées (nous reviendrons ensuite sur la raison de cette mise à l'écart), mais plus haut dans l'article, les données d'Abele sur l'orge et l'avoine ne donnent pas de résultats significatifs. Il semble que, pour la catégorie fruit/grain, l'effet de la Lune soit peu intéressant. Il convient peut-être de le souligner ? Il ne semble pas y avoir, à ma connaissance, d'essais publiés menés sur la catégorie fleur et sur la catégorie feuille. Ne convient-il pas, à nouveau, de le souligner ?

La seule catégorie véritablement étudiée est, par conséquent, celle des légumes « Racines ». Commençons par le radis. Notons, au préalable, que deux séries d'expériences en 1979 et 1980 sont ignorées, en raison, comme le disent les auteurs : d'une grande variabilité et d'une forte tendance saisonnière qui rendent impossibles la détection du cycle lunaire. Ce qui nous laisse donc conclure que c'est, au mieux, un *facteur de second ordre*, ce que la littérature scientifique ne cesse d'affirmer. En outre, les auteurs « expliquent » que l'endroit où s'est déroulée l'expérience est une région fortement industrialisée. Mais quel est le rapport avec le cycle lunaire ? Passons donc aux deux essais restants sur les radis, ils sont non significatifs statistiquement MALGRÉ la méthode employée. L'un particulièrement, car il s'agit d'une culture fertilisée, et selon les auteurs, cela a tendance à masquer l'effet des rythmes lunaires. Pourquoi ? Et s'il faut ne pas fertiliser pour bénéficier de l'effet lunaire, l'avantage à en retirer, en termes de productivité, est peut-être négatif ?

Nous en sommes rendus à considérer finalement le seul modèle carotte qui, lui, obtient un résultat statistiquement très significatif. Ici, il va falloir rentrer dans le détail technique... Les auteurs nous y invitent d'ailleurs (p. 257), car ils considèrent que, si les expériences de Spiess sont plutôt bien menées, « un tel *soin*[656] n'a pas été apporté à l'analyse de ces données ». Voyons donc les progrès curatifs qu'ils nous proposent, et pourquoi leurs résultats sont significatifs. En

---

[655] Car le reste, ce sont essentiellement des thèses en allemand. Je ne lis pas cette langue et je n'ai, par conséquent, pas un compte-rendu précis des expérimentations, ni de ce qui est mesuré...

[656] C'est moi qui souligne.

préambule, et à nouveau, *l'ensemble des données sur les carottes n'a pas été analysé*, et six points ont été écartés. (Car deux dates de semis avaient été omises, mais ceci ne semble pas invalider l'utilisation de la méthode statistique, dès lors pourquoi ?) Primo, il y a quatre répétitions à chaque date dans les expériences pour les radis, et les auteurs disent que le protocole est similaire pour les carottes. (Mais je n'ai pas accès à la description précise de l'expérience des carottes, seulement à celles sur le seigle et les radis, je vais donc leur faire confiance.) Ces répétitions sont éliminées et nous ne travaillons que sur la moyenne, *une première partie de la variabilité est donc évacuée* ce qui rend automatiquement les résultats plus significatifs. (Ils le sont en fonction inverse de cette variabilité.) Secundo, les données sont normalisées en pourcentages par année, ce qui, d'une année à l'autre, évacue une *deuxième* partie de la variabilité, puisque qu'on élimine alors les différences entre les moyennes annuelles de production. Tertio, les différences entre les dates de semis étant « masquées » par une tendance générale (sans doute due au climat, mais tout facteur de production non maîtrisé peut jouer) que nous allons éliminer, évacuant ainsi une *troisième* partie de la variabilité. Comment garantir que ce que l'on élimine ici n'ait rien à voir avec les cycles lunaires ? Les auteurs disent que la tendance doit être globale (For investigating whether lunar-monthly rhythms are present in crop yield data, it is, in general, necessary to allow for the seasonal or year trend, as this may be larger in magnitude than rhythms of a monthly nature, p.254) Admettons. Mais, dans ce cas, ils utilisent parfois une droite, parfois une parabole, parfois ce qu'on appelle un lisseur, ici une moyenne mobile. Et, comme ils le disent eux-mêmes, cela « peut affecter considérablement » les résultats (p. 255). Ne serait-il pas mieux d'utiliser, pour l'ensemble des analyses, le même modèle de tendance, afin de rendre comparables les résultats d'une étude à l'autre ? Ils choisissent donc d'employer, pour les carottes, une tendance de moyenne mobile sur un voisinage de cinq points. En effet, comme ils le disent cela permet de réduire plus encore la variabilité des données, MAIS en ne traduisant alors plus une tendance saisonnière globale, mais une tendance locale ! En outre, la façon dont ils emploient ce lisseur les conduit à éliminer des points de l'analyse de chaque côté (ce qui est un peu maladroit, il y a des versions de ce type de lisseur qui

permettraient de les conserver). Enfin, dans les tests statistiques qui s'ensuivent, il y a une notion qu'on appelle *degrés de liberté* (qui permet, là aussi, de booster plus ou moins la significativité statistique) : les auteurs « oublient » de décompter les degrés de liberté du lisseur (qui s'approchent de 3.6 d'après mes calculs... ils peuvent être décimaux avec les lisseurs). On en arrive à la conclusion : qu'après avoir éliminé trois parties de variabilité, des points aux extrémités, ou aux endroits avec des « trous », et oublié de décompter correctement les degrés de liberté, un *soin* tout particulier a effectivement été accordé à l'analyse de ces données, et l'on parvient à détecter un rythme lunaire sur les carottes. Si on parvient encore, après avoir corrigé ces petites étourderies, à exhiber une significativité statistique, il faudra donner une mesure de la taille de cet effet *vis-à-vis de la variabilité générale*, afin de voir si la conclusion de Beeson (1946) n'est pas finalement confirmée (pour mémoire : l'inutilité pratique en agriculture de cet effet).

Avec un autre point[657] qui me gêne plus que l'analyse statistique *soignée* : les auteurs indiquent (p.254) « It is crucial to the theory of these experiments, that germination occurs on the day of sowing ». Des graines qui germent le jour où on les met en terre ? Des carottes, de surcroît, qui sont notablement connues pour leur lenteur de germination ?

Pour finir sur des broutilles, la bibliographie doit rester scientifique (The Astrological Journal ?). Je passe sur le fait qu'un des auteurs, cinq fois cité dans la bibliographie, soit probablement l'un des deux co-auteurs ; le courriel pour la correspondance pourrait effrayer les lecteurs (nk@astro3.demon.co.uk)... Le changer.

Bref, je propose donc au lecteur de répondre lui-même aux interrogations ci-dessus, avant de commencer à semer à l'aide d'un calendrier lunaire. Pour ma part, je vais, non seulement, jardiner avec la Lune, mais l'ensemble du système solaire. En allant dans mon jardin, la nuit, ce dernier m'apparaît (en partie) avec ses constellations, ses

---

[657] Un point soulevé dans Thompson, K. (2011). *An Ear to the Ground: Understanding Your Garden*. Random House (p.72) qui est professeur retraité en écologie des plantes à l'université de Sheffield.

planètes, voire ses machines humaines volantes ; et m'offre un spectacle et des questions autrement plus intéressants que la validité du « calendrier lunaire zodiacal ». Sans compter que la nuit apparaît également dans le jardin une biodiversité nouvelle !

Beeson, C. F. C. (1946). The moon and plant growth. *Nature*, *158*(4017), 572-573.

Chalker-Scott, L. (2013). The science behind biodynamic preparations: A literature review. *HortTechnology*, *23*(6), 814-819.

Dean, G., & Kelly, I. W. (2003). Is astrology relevant to consciousness and psi?. *Journal of Consciousness Studies*, *10*(6-7), 175-198.

Eason, C. T., & Hickling, G. J. (1992). Evaluation of a bio-dynamic technique for possum pest control. *New Zealand Journal of Ecology*, 141-144.

Kollerstrom, N., & Staudenmaier, G. (2001). Evidence for lunar-sidereal rhythms in crop yield: a review. *Biological Agriculture & Horticulture*, *19*(3), 247-259.

Mayoral, O., Solbes, J., Cantó, J., & Pina, T. (2020). What has been thought and taught on the lunar influence on plants in agriculture? perspective from physics and biology. *Agronomy*, *10*(7), 955.

Sivasankari ,J., & Thimmaiah, A. (2021). Lunar rhythms in agriculture - review on scientific perspectives. *International Journal of Complementary and Alternative Medecine*. 14(2), 81-85.

Spiess, H. (1990). Chronobiological investigations of crops grown under biodynamic management. I. Experiments with seeding dates to ascertain the effects of lunar rhythms on the growth of winter rye (Secale cereale, cv. Nomaro). *Biological Agriculture & Horticulture*, *7*(2), 165-178.

Spiess, H. (1990). Chronobiological Investigations of Crops Grown under Biodynamic Management. II. Experiments with Seeding Dates to Ascertain the Effects of Lunar Rhythms on the Growth of Little Radish (Raphanus sativus, cv. Parat). *Biological Agriculture & Horticulture*, *7*(2), 179-189.

20 Purin d'orties

Le purin d'orties est le résultat d'une macération d'orties dans une *certaine* quantité d'eau, pendant un *certain* temps. Il est souvent recommandé par les agricultures alternatives. C'est même devenu un marqueur idéologique, dans ce qu'on a appelé la « guerre de l'ortie », c'est-à-dire un débat qui s'est déroulé au début des années 2000, lors de l'élaboration d'une réglementation de la commercialisation de produits de ce type. Auparavant, ils étaient commercialisés librement ; depuis, ils font partie des « préparations naturelles peu préoccupantes » (PNPP).

Ce cadre, considéré par certains comme bureaucratiquement délirant et profondément liberticide, oblige en fait, *pour une préparation commerciale* – et pas pour l'autoproduction – à des obligations simplifiées d'autorisation, de production et d'étiquetage, devant en indiquer la composition, mais aussi à utiliser comme éléments de base... des produits naturels ; et enfin, à garder une certaine mesure dans la mention de leur efficacité (un effet *bio-stimulant*).

En effet, contrairement à d'autres produits phytosanitaires ou fertilisants, *aucune obligation* n'est faite en ce qui concerne la réalisation de tests d'efficacité. Ce sont ces preuves d'efficacité qui vont nous intéresser ici, sachant que le spectre des allégations est large sur les bienfaits de ces produits. Ils permettraient de limiter les maladies, les attaques des ravageurs, en particulier des pucerons, et de stimuler la croissance et la production.

Mais tout d'abord, d'où vient l'idée de faire du purin d'orties ? Le rapport (Bernard et al., 2012) du comité scientifique de la société nationale d'horticulture de France (SNHF) ne trouve pas, historiquement, de citations du produit, en tant que recette traditionnelle, dans la littérature agronomique depuis l'Antiquité romaine, mais il indique qu'il s'agit, sans doute, d'une invention assez récente (1990), par un dénommé Jean-Claude Chevalard. Sa « découverte » a alors rapidement fait l'objet d'une commercialisation. Le rapport de la SNHF fait ensuite un inventaire des études scientifiques concernant son efficacité en tant que protection

phytosanitaire et fertilisant. Il conclut que : « Au final, il est frappant de constater l'écart entre les effets mesurés – nuls, ténus et/ou aléatoires – et les recommandations des prescripteurs de la profession sur l'emploi des purins ». L'objet de ce billet est de savoir, depuis la publication en 2012 de ce rapport, ce que disent les nouvelles études scientifiques parues à ce sujet.

Garmendia et al. (2018) ont testé son application foliaire sur la pomme de terre. Ils ne détectent aucun effet sur la production, et des effets très faibles, et assez incohérents, sur diverses mesures de la croissance de la plante. On n'en sera pas surpris, car les plantes absorbent essentiellement les minéraux par les racines, et miser sur l'application foliaire est un peu similaire à verser une soupe sur les pieds d'un être humain, en lui souhaitant « bon appétit ». On attendra plus un possible effet sur les maladies et les ravageurs. Les auteurs ne le détectent pas non plus, et citent les conclusions similaires de Bozsik[658] (1996) qui échoue à montrer un effet significatif sur divers pucerons.

Pour revenir à un effet de fertilisation, il semble plus logique de verser le purin directement au sol, et c'est ce qui est fait dans une étude récente de Maricic et al. (2021). Leurs résultats statistiques montrent, qu'en ce qui concerne la production des haricots, le purin d'orties ne fait pas mieux que le contrôle ; qu'un purin express (24h de macération) est aussi « efficace » qu'un purin classique (14 jours) ; que l'augmentation d'application (d'une dose, en gros[659] selon les cas de 1 à 5L/m^2, parfois partiellement en application foliaire, et parfois complètement au sol) donne des résultats peu cohérents ; et qu'en revanche, par rapport à une fertilisation classique (urée minérale), le résultat est indubitablement moins bon.

Maricic et al. (2022) réitèrent, avec une version macération anaérobie du purin d'orties, et obtiennent cette fois des résultats plus encourageants, en récoltant 50 % de production supplémentaire par rapport à un contrôle (eau sans orties). Une précaution bienvenue, soit

---

[658] Dont malheureusement, je n'ai pu me procurer que le résumé.

[659] Les quantités et taux exacts et moments d'application sont bien sûr détaillés dans l'article.

dit en passant, car un atout du purin d'orties, rarement évoqué, est qu'il consiste à réaliser une irrigation supplémentaire et... on a assez souvent démontré l'effet de l'irrigation sur la croissance des plantes ! Outre le fait que l'étude semble menée sur un nombre très réduit de plants[660], il est utilisé un litre de ce purin tous les deux jours par plant de haricots. Comme les auteurs le disent eux-mêmes, ceci correspond à un équivalent de 62 N (kg/ha), ce qui doit faire de l'ordre de 350 g/m^2 en termes d'orties fraîches[661].

Dans la même veine, les expérimentations de Li (1994), sur on ne sait pas combien de plants de persil d'ailleurs, l'amènent à des résultats comparables au sang séché, qui est un très bon engrais organique, mais en utilisant 8 g de poudre d'orties sèches par litre de sol, ce qui équivaudrait à 2.3 kg[662] d'orties fraîches par mètre carré. On en arrive à la conclusion que le purin fonctionne comme fertilisant, mais *à des quantités phénoménales par rapport aux « prescriptions »*. Le travail de Li montre, en outre, que *cela marche mieux en poudre qu'en dilution à quantité équivalente d'orties* ! La dilution est donc une technique à utiliser... à doses homéopathiques, il y a peu à craindre que l'effet soit trop puissant pour nos cultures, comme c'est parfois évoqué. La macération des orties apparaît finalement comme une perte de temps, produit une odeur désagréable et valant peut-être surtout pour l'eau qu'elle contient, aux doses où elle est appliquée.

Pour nous résumer, si nous ramassons un kilo d'orties, cela fait 350 grammes de matière sèche et environ 17 grammes d'azote total, sans doute pas entièrement disponible ensuite pour les plantes. On a, à peu près, de quoi fertiliser un mètre carré, comme avec, à peu près, n'importe quel engrais vert... ou alors plus sûrement la possibilité de réaliser directement une très bonne soupe d'orties !

---

[660] Six est-il dit, mais il se peut que leurs explications, pas toujours très claires, cachent en fait l'emploi de 24 plants, ce qui reste très faible.....

[661] Avec un % d'azote dans la matière sèche de 5 % (Li, 1994) et un %MS de 35 % (20 % pour les feuilles et 50 % pour les tiges), on a donc 62/0.05/0.35~3500 kg/ha soit 350 g/m^2.

[662] Sur un mètre carré, en considérant 10 centimètres de sol, cela fait donc 100 litres de sol, donc 800 g d'orties sèches, en prenant comme précédemment un % de MS de 35 % cela donne 800/0.35=2,3 kg.

Bernard, J.-L., My, J. & Veschambre, D. (2012). *Protection des plantes, tradition et macération d'ortie*. Regard du conseil scientifique, Société Nationale d'Horticulture de France (Réf. 120).

Bozsik, A. (1996). Studies on aphicidal efficiency of different stinging nettle extracts. *Anzeiger für Schädlingskunde, Pflanzenschutz, Umweltschutz*, *69*, 21-22.

Garmendia, A., Raigón, M. D., Marques, O., Ferriol, M., Royo, J., & Merle, H. (2018). Effects of nettle slurry (Urtica dioica L.) used as foliar fertilizer on potato (Solanum tuberosum L.) yield and plant growth. *PeerJ*, *6*, e4729.

Li, T. (1994). Use of stinging nettle as a potential organic fertilizer for herbs. *Journal of Herbs, Spices & Medicinal Plants*, *2*(2), 93-98.

Maričić, B., Radman, S., Romić, M., Perković, J., Major, N., Urlić, B., ... & Ban, S. G. (2021). Stinging Nettle (Urtica dioica L.) as an aqueous plant-based extract fertilizer in green bean (Phaseolus vulgaris L.) sustainable agriculture. *Sustainability*, *13*(7), 4042.

Maričić, B., Brkljača, M., Ban, D., Palčić, I., Franin, K., Marcelić, Š., & Goreta Ban, S. (2022). Non-Aerated Common Nettle (Urtica dioica L.) Extract Enhances Green Beans (Phaseolus vulgaris L.) Growth and Soil Enzyme Activity. *Life*, *12*(12), 2145.

21 Y a-t-il un effet de serre dans ma serre ?

Il existe divers dispositifs afin de créer un microclimat favorable aux cultures (Lamont, 2005). Il est, en l'espèce, porté intérêt aux dispositifs se plaçant au-dessus des plantes, et non pas, sur le sol (les couvertures de sol). Plus précisément, nous allons ici considérer les dispositifs qui cherchent à créer un microclimat plus chaud, plutôt que les dispositifs de type structure d'ombrage, visant à protéger les cultures en été. Ce sont, par conséquent, les voiles de forçage ou d'hivernage, les châssis et mini-tunnels, et enfin, les serres qui sont concernés[663].

En élevant la température, près du sol et dans le sol, il s'agit d'allonger la saison de culture, d'assurer une meilleure germination, une meilleure croissance et un meilleur développement des plantes, et au final, d'obtenir une récolte plus importante, plus rapidement. Mais si la température joue un rôle essentiel, en accélérant divers processus chez les plantes et les micro-organismes du sol, ces dispositifs permettent, en même temps, de mettre le sol et les plantes à l'abri des fortes pluies et des forts vents, de contrôler un peu mieux l'humidité et le lessivage des minéraux, et d'offrir une protection contre divers ravageurs, voire maladies. Enfin, les légumes sont souvent plus « propres ».

En ce qui concerne donc la température, ces dispositifs l'augmentent très clairement en journée (la température maximale, donc), mais ont, généralement, un bien plus faible effet sur les températures de nuit (les températures minimales). On parvient ainsi à dépasser plus régulièrement les zéros de végétation et de germination, et donc à « forcer » les légumes rustiques, mais plus difficilement, à empêcher la baisse jusqu'aux températures dommageables, surtout pour les légumes

---

[663] Je ne vais pas ici me livrer à une véritable comparaison des dispositifs existants, on pourra, pour ce faire, se reporter aux pages 287-289, puis 319-340, du très intéressant ouvrage : Helmstetter, D. (2022). *Le potager du paresseux frappé par le changement climatique*. Tana éditions, Paris.

sensibles, comme des plants de tomates, en mars. Pour en donner une idée, avec les voiles de croissance P17, les températures maximales augmentent de 1 °C à 11 °C, et les températures minimales de 1 °C à 3 °C (Iapichino et al, 2010).

Mais comment est-ce que cela fonctionne ? De jour, la lumière du soleil qui parvient sur la couverture est réfléchie, absorbée et transmise. Le but du jeu étant de transmettre le maximum de lumière : le matériau employé sera généralement transparent. Notons que, si la quantité de lumière qui passe est importante (97 % pour du verre et 85 % pour un voile P17), sa qualité ne l'est pas moins ; le blocage des UV évite des dommages aux plantes, mais c'est surtout le blocage des infrarouges lointains qui a une importance, comme nous le comprendrons par la suite. La lumière transmise va, d'une part, atteindre les plantes et servir à la photosynthèse - c'est pourquoi la transparence doit être maximale, surtout à des époques de l'année où la lumière se fait rare – et d'autre part, atteindre le sol qui va la réfléchir ou l'absorber, plus ou moins selon sa couleur (albédo). L'absorption de la lumière par le sol va conduire à une augmentation de son énergie thermique qui, ensuite, va repartir (d'autant plus que l'atmosphère ambiante est froide, donc surtout la nuit), soit sous forme de chaleur, par évaporation[664] ou par échauffement de l'air, soit par radiations d'infrarouges lointains. Ces dernières radiations se dirigent alors vers la couverture, et selon sa composition, soit sont transmises et perdues pour notre système, soit sont bloquées et retournent en partie vers le sol : c'est ce qu'on appelle... l'effet de serre.

Notons que, par le dispositif, on peut perdre de la chaleur par conduction (cela dépend du matériau employé), mais surtout par convection (fuite de l'air et de la vapeur d'eau, par manque d'étanchéité) ou par radiation. Une question intéressante est de déterminer quelles sont les proportions respectives des effets thermiques de la convection naturelle et du blocage radiatif, car cela permettra d'améliorer les points faibles du système. En fait, on peut l'estimer en comparant un matériau transparent qui bloque les

[664] Ce qui explique que l'air soit plus humide sous les protections, et que l'on trouve des gouttelettes sur leurs parois au matin.

infrarouges lointains, comme le verre, et un matériau qui ne les bloque pas.

Une expérience de ce type a été tentée par Wood en 1909, ce qui l'a conduit à conclure que l'effet de blocage des radiations était négligeable. L'expérience, assez mal décrite, et avec des biais, a été reprise par Pratt (2010) et Nahle (2011). Ils arrivent, cependant, à des conclusions opposées ! Cela pourrait paraître anecdotique, mais au-delà de nos problèmes de jardinier, il y a *un autre enjeu*. Si on veut mettre en doute la thèse du réchauffement climatique par les gaz à effet de serre, il est difficile de le faire au niveau de la Terre, car les échelles, instruments de mesure et modélisations nécessaires sont hors de portée d'un individu. En revanche, une petite expérience dans un châssis peut permettre une extrapolation, plus ou moins raisonnable, et faire *naître un doute*. Il vaut donc mieux y regarder de plus près...

Comment comparer ces deux articles ? Dans l'ordre, on va regarder leur support de publication, le CV des auteurs, mais surtout le contenu. Pour le support de publication, il ne s'agit malheureusement pas de revues scientifiques, avec expertises anonymes, mais de simples publications sur des sites Internet. V.R. Pratt, qui est professeur émérite en informatique à l'université de Standford, présente son article sur sa page personnelle, hébergée sur le serveur de cette université. S. Nahle l'a déposé sur un site https://principia-scientific.com/, une association *scientifique* qui défend des positions climato-sceptiques et anti-vaccination. Comme Pratt, Nahle n'est pas un spécialiste de la question, il est, semble-t-il, biologiste spécialisé en phytothérapie (en fait, c'est difficile à savoir). Quant aux contenus, l'article de Nahle est indubitablement mal écrit. II n'y a pas véritablement de partie théorique, pour donner un cadrage, voire une prédiction, même grossière des résultats. Sept expériences se succèdent, sans grands apports supplémentaires, et avec des contradictions dans leurs résultats (expérience 1, 2 et 5 sur l'isolation avec laine de verre). Il n'y a pas de répétitions de ces expériences, afin de voir dans quelle mesure leurs résultats sont stables. Quant à l'article de Pratt, c'est *tout simplement le contraire*. Voilà, je vous laisse juges.

Maintenant, comment concevoir un système le plus efficace possible en ce qui concerne les températures, et plus particulièrement, pour élever la température minimale ? La première piste est d'augmenter la

quantité de lumière qui entre. Primo, il s'agit d'avoir une transparence maximale. Ainsi, une bâche plastique, de ce point de vue, est bien meilleure qu'un voile P17 qui plafonne à 85 %. Mais pour ce dernier, cela dépend de la saison, de la vapeur d'eau et de la poussière sur le voile[665] : cela varie de 85 % à 75 % au printemps et de 80 % à 65 % en hiver. On peut passer ainsi au-dessous du seuil de saturation de la photosynthèse, et perdre de la croissance (Gimenez et al., 2002). Secundo, il s'agit de pouvoir laisser entrer la lumière par toutes les directions, et, par conséquent, pour un châssis, une exposition au sud est fondamenale.

La deuxième piste consiste à limiter les sorties de chaleur, qui peuvent se faire par conduction, par convection ou par radiation. En ce qui concerne cette dernière, nous avons vu que le matériau doit bloquer les infrarouges lointains, pour créer l'effet de serre. En ce qui concerne la conduction, il s'agit de bloquer les pertes, soit sur certains côtés avec divers isolants, soit sur la surface transparente en utilisant des couches supplémentaires la nuit. En ce qui concerne la convection, il s'agit d'avoir la plus grande étanchéité possible, donc des ouvertures qui... se ferment correctement, éventuellement plusieurs couches, surtout pour le P17 qui est perméable à l'air. Il est très courant d'employer, dans une serre, un deuxième étage de mini-tunnels, voire un troisième étage avec voiles de croissance ou d'hivernage (à ôter le jour pour la luminosité).

La troisième piste consiste à stocker encore plus de chaleur, de façon passive, afin qu'elle puisse être relâchée durant la nuit. Santamouris et al. (1994) passent en revue de nombreux dispositifs utilisant, pour les plus sophistiqués, des matériaux à changement de phase produisant de la chaleur latente, des tuyaux d'aération enterrés ou des lits en pierres. Ils décrivent également des systèmes plus simples et appropriables par le jardinier amateur, comme l'utilisation de bidons noirs remplis d'eau ; la construction d'un mur nord épais en briques, pierres ou béton, isolé à l'extérieur et noir à l'intérieur ; l'isolation d'une partie des côtés est et ouest ; ou une couverture nocturne isolante enveloppant l'ensemble.

---

[665] La saleté et le jaunissement jouent aussi un rôle pour les bâches transparentes, les serres...

Pour le mur nord, une alternative est d'employer une matière réfléchissante à l'intérieur, ce qui retient plus de lumière qu'une paroi transparente et augmente la lumière disponible pour les plantes (ce qui est intéressant en hiver).

La quatrième piste consiste à employer un système ponctuel de chauffage, le plus économique possible, pour les situations difficiles (sauver ses fragiles plants de tomates, de poivrons et d'aubergines d'un gel annoncé !). Pour le jardinier amateur, ce peut être un simple transfert dans son logement, s'il arrive à le négocier avec son partenaire de vie... Il existe des petits câbles électriques antigels pour des châssis, voire des chauffages d'appoint pour les serres ; ou la version *old school* et écologique : les couches chaudes.

La cinquième piste a trait aux espèces et aux variétés cultivées. Si un forçage est facile à réussir sur des légumes relativement adaptés à la saison, une tentative sur des melons, souvent évoquée en louant les maraîchers français du dix-neuvième siècle, s'avère autrement risquée, et ne peut, de toute façon, conduire à un résultat intéressant sur le plan gustatif.

On va également évoquer la rançon du succès : la hausse trop forte des températures en journée. Certains systèmes, comme les châssis, peuvent conduire à des augmentations de températures trop importantes et menacer la croissance, voire la survie des légumes. C'est pourquoi l'aération doit être possible et efficace. Sans compter que l'humidité est souvent plus grande (Hälvä,1987), ce qui peut poser des problèmes de maladies. Pour ce qui est de la gestion de l'eau dans ces dispositifs, ils permettent d'être à l'abri des intempéries et donc de réduire la battance du sol, minimiser l'érosion par ruissellement et le lessivage des nutriments. En revanche, ils ne laissent pas passer la pluie : il faut, par conséquent, irriguer les cultures, ce qui n'est pas très fatigant en saison froide, où l'évapotranspiration est faible, mais impose des efforts soutenus ou un système d'irrigation automatisé en été. Notons que, si les plantes cultivées poussent plus, les mauvaises herbes poussent également plus. C'est pourquoi le système de protection des plantes est souvent couplé avec une couverture de sol. L'utilisation de bâches noires a plusieurs effets : occultant pour les adventices, absorbant plus de lumière et maintenant l'eau dans le sol. L'effet sur les insectes des dispositifs est généralement notable (Rekika,

et al., 2008), en revanche, celui sur les maladies est plus ambigu, du fait de l'humidité.

Somme toute, ces dispositifs présentent des avantages incontestables, mais demandent une technicité et une présence importante, pour aérer, couvrir, découvrir, arroser... au bon moment. Seul le voile P17, avec son efficacité certes plus limitée, peut être posé et ne plus causer de soucis. Le dernier problème que nous n'avons pas évoqué est celui de la durabilité écologique de ces matériaux, pratiquement tous constitués de plastique...

Gimenez, C., Otto, R. F., & Castilla, N. (2002). Productivity of leaf and root vegetable crops under direct cover. *Scientia Horticulturae*, *94*(1-2), 1-11.

Hälvä, S. (1987). Effect of Agryl P17 mulching on herb yield and volatile oils of basil (Ocimum basilicum L.) and marjoram (Origanum majorana L.) *Agricultural and Food Science*, *59*, 31-36.

Iapichino, G., Vetrano, F., Moncada, A., Fascella, S., & Incalcaterra, G. (2010, August). Effects of plastic mulch and floating cover on lettuce production in Sicily. In *XXVIII International Horticultural Congress on Science and Horticulture for People (IHC2010): International Symposium on 936* (pp. 491-494).

Lamont, W. J. (2005). Plastics: Modifying the microclimate for the production of vegetable crops. *HortTechnology*, *15*(3), 477-481.

Nahle, N. S. (2011). Repeatability of Professor Robert W. Wood's 1909 experiment on the Theory of the Greenhouse, July 5, e plaque transparente2011. Biology Cabinet Online-Academic Resources and Principia Scientific International. Monterrey, N. L.

Pratt, V.R. (2010). Wood's 1909 greenhouse experiment, performed more carefully. Disponible sur http://clim8.stanford.edu/WoodExpt/.

Rekika, D., Stewart, K. A., Boivin, G., & Jenni, S. (2008). Reduction of insect damage in radish with floating row covers. *International journal of Vegetable Science*, *14*(2), 177-193.

Santamouris, M., Balaras, C. A., Dascalaki, E., & Vallindras, M. (1994). Passive solar agricultural greenhouses: a worldwide

classification and evaluation of technologies and systems used for heating purposes. *Solar Energy*, *53*(5), 411-426.

Wood, R. W. (1909). XXIV. Note on the Theory of the Greenhouse. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, *17*(98), 319-320.

Table des matières

Avant-propos 5

Introduction 9

Potagérer 31

1 Lumière 33
1.1 Qu'est-ce que la lumière ? 33
1.2 Bilan radiatif 34
1.3 Facteurs de variation de la lumière 37
1.3.1 Latitude 37
1.3.2 Saisonnalité 38
1.3.3 Nuit/Jour 39
1.3.4 Altitude 40
1.3.5 Exposition 41
1.3.6 Qualité de l'air 42
1.3.7 Écrans 43
1.4 Réponse des plantes à la lumière 45
1.4.1 Photosynthèse 45
1.4.2 Faciliter la photosynthèse 47
1.4.3 Réponse à la quantité de lumière 52
1.4.4 Réponse à la qualité de la lumière 53
1.4.5 Réponse à la direction de la lumière 55
1.4.6 Réponse à la durée de la lumière 55
1.5 Gestion de la lumière 56
1.5.1 La quantité de lumière est satisfaisante 56
1.5.2 La quantité de lumière est insuffisante 57
1.5.3 La quantité de lumière est trop importante 59
1.6 Changement climatique et lumière 60
1.7 Références 62
1.8 Ctrl-R 65

2 Température 71
2.1 Qu'est-ce que la température ? 71
2.2 Réponse des plantes à la température 71
2.2.1 Germination et température 72
2.2.2 Croissance, développement et température 79

2.2.3 Thermopériodisme 91
2.2.4 Vernalisation et montaison prématurée 91
2.3 Facteurs de variation de la température 93
2.3.1 Macrovariations à l'échelle de la France 93
2.3.2 Mésovariations à l'échelle du paysage 95
2.3.3 Microvariations à l'échelle du potager 97
2.4 Gestion de la température 98
2.4.1 Gestion des températures élevées 98
2.4.2 La bonne plante au bon moment au bon endroit 100
2.4.3 Calendrier de semis « Yin et Yang » 101
2.4.4 Dispositifs contre le froid 104
2.4.5 Soudure 106
2.5 Changement climatique et température 109
2.6 Références 110
2.7 Ctrl-R 115

3 H_2O 121
3.1 Qu'est-ce que l'eau ? 121
3.1.1 De l'importance de l'eau et de l'irrigation raisonnée 121
3.1.2 Mesure de l'eau contenue dans l'atmosphère 123
3.1.3 Mesure de l'eau contenue dans le sol 123
3.1.4 L'eau échangée entre l'atmosphère et le sol 125
3.1.5 Cycle hydrologique 127
3.2 Réponse des plantes à l'eau 130
3.2.1 Germination 130
3.2.2 Photosynthèse, croissance et développement 134
3.2.3 Stress hydriques extrêmes 136
3.3 Précipitations 138
3.3.1 Variation des précipitations 138
3.3.2 La pluie efficace 140
3.4 Eau dans le sol 141
3.4.1 Eau contenue dans le sol 141
3.4.2 Eau disponible pour les plantes 143
3.5 Évapotranspiration 145
3.5.1 Évapotranspiration de référence 145
3.5.2 Évapotranspiration de la culture 148
3.5.3 Part de l'évaporation 149

3.6 Besoins en irrigation 150
3.6.1 Irrigation basée sur des capteurs d'humidité 150
3.6.2 Irrigation basée sur un bilan hydrique 151
3.6.3 Irrigation basée sur des simulations informatiques ... 152
3.7 Gestion du peautager 153
3.7.1 « Code de l'arrosage » en hiver 153
3.7.2 « Code de l'arrosage » en été 154
3.7.3 « Coût » de l'irrigation 161
3.7.4 Qualité de l'eau 163
3.8 Changement climatique et eau 166
3.9 Références 169
3.10 Ctrl-R 174

4 Vent 177
4.1 Mesure du vent 177
4.2 Réponse des plantes au vent 178
4.2.1 Croissance 178
4.2.2 Anémorphose 178
4.2.3 Thigmomorphogénèse 179
4.2.4 Conditionnement mécanique 179
4.3 Érosion éolienne 180
4.4 Autres effets du vent 182
4.5 Bilan du vent 183
4.6 Facteurs de variation du vent 183
4.7 Brise-vent 184
4.7.1 Facteurs d'efficacité du brise-vent 185
4.7.2 Effet du brise-vent sur le microclimat 187
4.7.3 Effet du brise-vent sur les plantes 187
4.7.4 Retombées économiques des brise-vent 188
4.7.5 Retombées écosystémiques 188
4.8 Global stilling ? 189
4.9 Références 190
4.10 Ctrl-R 193

5 Santé physique du sol 197
5.1 Qu'est-ce que le sol ? 197
5.2 Déconstruction du sol 198
5.2.1 Matière minérale 199

5.2.2 Matière organique (morte) 202
5.3 (re-)Construction du sol 205
5.3.1 Complexe argilo-humique 205
5.3.2 Agrégats 205
5.3.3 Matière organique vivante 206
5.3.4 Structure du sol 207
5.4 Mesures du sol 208
5.4.1 Masse volumique du sol 208
5.4.2 Porosité 210
5.4.3 Profondeur du sol 211
5.5 Réponse des plantes à l'état physique du sol 212
5.5.1 Racines des plantes 212
5.5.2 Réponse des plantes à la compaction 215
5.5.3 Réponse des plantes à la sécheresse du sol 218
5.5.4 Réponse des plantes au manque d'aération 218
5.5.5 Réponse des plantes à la résistance du sol 221
5.6 Concerto en sol 225
5.7 Clefs du sol 226
5.8 Changement climatique et santé physique du sol 245
5.9 Références 247
5.10 Ctrl-R 250

6 Santé chimique du sol (fertilisation) 257
6.1 « Alles ist chemie » 257
6.2 Nutrition des plantes 259
6.2.1 Éléments indispensables 259
6.2.2 Éléments limitants 260
6.2.3 Formes absorbées 261
6.3 Réponse des plantes à la fertilisation 262
6.3.1 Expérimentations de Rothamsted 262
6.3.2 Courbe de réponse à la fertilisation 265
6.3.3 Rendement des nutriments et offre du sol 267
6.4 Facteurs de variation de la réponse à la fertilisation 269
6.4.1 Facteurs climatiques 269
6.4.2 Facteurs édaphiques 271
6.4.3 Facteurs spécifiques 276
6.5 Principes de fertilisation 279

6.5.1 Lois de la fertilisation 279
6.5.2 Valeur optimale de fertilisation 282
6.5.3 4R 286
6.5.4 Gestion intégrée de la fertilité du sol 287
6.6 Pratique de la fertilisation 289
6.6.1 Modifier le pH 289
6.6.2 Modifier la CEC 290
6.6.3 Fertilisation azotée 291
6.6.4 Fertilisation phosphatée 311
6.7 Quelques réflexions sur la fertilisation organique 319
6.8 Changement climatique et santé chimique du sol 321
6.9 Références 323
6.10 Ctrl-R 327

7 Santé biologique du sol 331
7.1 Biodiversité du sol 331
7.2 Fonctions assurées par la biodiversité du sol 333
7.2.1 Bactéries 333
7.2.2 Champignons 335
7.2.3 Protistes 337
7.2.4 Nématodes 338
7.2.5 Vers de terre 339
7.3 Respiration du sol 341
7.4 Qu'est-ce que la santé biologique du sol ? 345
7.5 Paradigmes terrestres 347
7.5.1 Agriculture conventionnelle 347
7.5.2 Agriculture de conservation des sols 348
7.5.3 Agriculture biologique 350
7.5.4 Agroécologie 354
7.5.5 Autres courants alternatifs 355
7.6 Gérer la santé biologique du sol 359
7.6.1 Apport de matière organique 361
7.6.2 Couvertures de sol 362
7.6.3 Travail du sol 363
7.6.4 Système intégré de gestion du sol pour le maraîchage 364

7.6.5 Trois systèmes intégrés concrets de gestion du sol pour le maraîchage 365
7.6.6 Culture de compromis et d'adaptations 372
7.7 Santé biologique du sol et changement climatique 375
7.8 Références 377

8 Interactions végétales 383
8.1 Interactions intraspécifiques 383
8.1.1 Densité et récolte 383
8.1.2 Densité et survie 385
8.1.3 À la recherche du temps gagné 386
8.1.4 Modes de semis en monoculture 387
8.2 Interactions interspécifiques 388
8.2.1 Compétition, complémentarité et facilitation 389
8.2.2 Ratio équivalent terre 391
8.3 Malherbologie 393
8.3.1 Poireau et mauvaises herbes 393
8.3.2 Qu'est-ce qu'une mauvaise herbe ? 394
8.3.3 Laisser faire ? 396
8.3.4 Fonction de perte de récolte et variantes 397
8.3.5 Théorie du seuil économique de désherbage 399
8.3.6 Théorie de la période critique 400
8.4 Gestion des mauvaises herbes 402
8.4.1 Connaître les mauvaises herbes 402
8.4.2 Management des populations de mauvaises herbes 403
8.4.3 Contrôles directs des mauvaises herbes 405
8.4.4 Efficacité des méthodes de management et de contrôle direct des mauvaises herbes 406
8.4.5 Gestion intégrée des mauvaises herbes 406
8.5 Association de cultures 407
8.5.1 D'où vient l'idée de « plantes compagnes » ? 407
8.5.2 Mélange des espèces en grandes cultures 408
8.5.3 Et à l'échelle du jardin potager ? 409
8.6 Association avec des arbres 413
8.6.1 Agroforesterie 413
8.6.2 Forêt-jardin 416
8.7 Références 419

8.8 Ctrl-R 423

9 Adiversité 425
9.1 Plantes et interactions 425
9.2 Besti-of de l'adiversité 427
9.2.1 Limaces 427
9.2.2 Altises du chou 430
9.2.3 Mildiou (de la pomme des terre) 432
9.2.4 Diférence 434
9.3 Dommages causés par l'adiversité 435
9.3.1 Croissance d'une population de bioagresseurs 435
9.3.2 Dommages causés par les bioagresseurs 437
9.4 Réponses des plantes à l'adiversité 439
9.5 Ennemis naturels de l'adiversité 441
9.5.1 Modèle prédateur-proie (contrôle naturel) 441
9.5.2 Contrôle biologique 444
9.6 Biodiversité et adiversité 445
9.6.1 Biodiversité 445
9.6.2 Hypothèse de biodiversité-stabilité 447
9.6.3 Biodiversité et contrôle biologique 450
9.7 Rôle de l'environnement 451
9.7.1 Équilibre de la nature 451
9.7.2 Triangle de la maladie 453
9.8 Lutte intégrée contre les ennemis des cultures 454
9.8.1 Définition 455
9.8.2 Méthodologie de l'IPM 455
9.8.3 Prévention 456
9.8.4 Surveillance et décision d'intervention 458
9.8.5 Interventions 459
9.8.6 Évaluation 460
9.8.7 Critique de l'IPM 460
9.8.8 Production intégrée 461
9.9 Méthodes spécifiques de lutte contre l'adiversité 463
9.9.1 Rotations 463
9.9.2 Manipulation de l'habitat 465
9.9.3 Contrôle physique de l'adiversité 476
9.9.4 Pesticides 477

9.10 Changement climatique, cultures et adiversité 483
9.11 Références 485

10 Espèces, cultivars et semences 493
10.1 Espèces 493
10.1.1 Qu'est-ce qu'une espèce ? 493
10.1.2 Classifications des espèces 494
10.1.3 Nomenclature des espèces..... 499
10.1.4 Les espèces cultivées..... 500
10.2 Cultivars 508
10.2.1 Qu'est-ce qu'un cultivar ? 508
10.2.2 Qualités d'un cultivar 510
10.2.3 Catalogue officiel..... 511
10.2.4 Reproduction des plantes 512
10.2.5 Théorème de Hardy-Weinberg 515
10.2.6 Amélioration des plantes..... 516
10.3 Semences.....523
10.3.1 Qu'est-ce qu'une graine ? 524
10.3.2 Qu'est-ce que la qualité des graines ? Comment la mesurer ? 524
10.3.3 Facteurs influençant la qualité des graines..... 526
10.3.4 Est-ce que les semences AB c'est assez bien ?..... 529
10.3.5 Conservation des graines..... 530
10.3.6 Semis des graines 533
10.4 Références.....538
10.5 Ctrl-R 544

Potivations 545

11 Potag€r 547
11.1 Production d'un potag€r 549
11.2 Coût d'un potag€r.....552
11.2.1 En capital ?..... 552
11.2.2 En eau ?..... 553
11.2.3 En temps ?..... 553
11.3 Économies réalisées au potag€r 554
11.4 Est-ce suffisant ?.....557
11.4.1 Autosuffisance individuelle..... 558
11.4.2 Autosuffisance urbaine 560

11.5 Et en Europe ?....562
11.6 De l'intérêt de la programmation linéaire....564
11.7 Protag€r....565
11.7.1 Prix 566
11.7.2 Productivité 567
11.7.3 Surface (small is beautiful but small).... 569
11.7.4 Coûts.... 570
11.7.5 Récupération de l'eau.... 571
11.8 Références académiques 575
11.9 Autres références....578

12 « Un potager produit plus que des légumes »....579
12.1 Motivations des jardiniers amateurs....580
12.2 Bénéfices du jardinage en termes d'expression de soi....581
12.3 Bénéfices du jardinage en termes de santé....584
12.3.1 Nutrition 585
12.3.2 Santé physique 588
12.3.3 Santé psychique.... 591
12.4 Bénéfices du jardinage en termes de sociabilité 593
12.4.1 Capital social.... 593
12.4.2 Cohésion sociale 595
12.5 Bénéfices de la biophilie....597
12.5.1 Biophilie, autres théories et jardinage 597
12.5.2 Design biophilique et urbanisme biophilique 599
12.5.3 Urbanisme comestible 602
12.6 Références....604

13 Services écosystémiques au potager 609
13.1 Au-delà de la rationalité économique 609
13.2 Contribution des écosystèmes aux populations....611
13.2.1 La longue construction d'un cadre d'analyse des écosystèmes611
13.2.2 Évaluation des écosystèmes par l'IPBES (2019) ... 620
13.2.3 Écosystèmes durables 622
13.3 Contributions de l'agriculture aux populations....623
13.3.1 L'agrosystème : un écosystème particulier.... 623
13.3.2 Évaluation des services et disservices écosystémiques de régulation en agriculture 624

13.3.3 Agriculture durable 628
13.4 Contributions du potager aux populations 633
13.4.1 Le potager : un agrosystème particulier 633
13.4.2 Équilibre entre les types de contributions 634
13.4.3 Évaluation des services et disservices écosystémiques au potager 642
13.4.4 Potager durable..... 650
13.5 Au-delà du portillon du potager 658
13.6 Références.....660

Cabinet de curiosités 665

14 Aromatiques.....667
14.1 Aneth.....667
14.2 Basilic.....670
14.3 Ciboule 673
14.4 Ciboulette chinoise.....677
14.5 Ciboulette.....681
14.6 Coriandre.....685
14.7 Maceron.....687
14.7.1 Comment cultiver le maceron ?..... 688
14.7.2 Comment cuisiner le maceron ? 690
14.7.3 Comment trouver des graines de maceron ?..... 690
14.8 Oseille(s).....691
14.9 Persil 694

15 Légumes asiatiques.....699
15.1 Bardane cultivée 699
15.2 Chrysanthème comestible.....702
15.3 Moutarde(s) 707
15.3.1 Moutarde brune 708
15.3.2 Moutarde d'Abyssinie 710
15.4 Navet et Cie.....712
15.4.1 Un peu de taxonomie 713
15.4.2 Navet 714
15.4.3 Quelques bonnes raisons de s'intéresser aux verdures asiatiques 719
15.4.4 Verdures asiatiques 724
15.5 Radis (asiatique).....734

15.5.1 Encore un peu de taxonomie 734
15.5.2 Culture des groupes asiatiques de radis..... 736

16 Légumes d'été 741
16.1 Amaranthe(s).....741
16.1.1 Taxonomie des amaranthes cultivées 741
16.1.2 Généralités sur la culture des amaranthes..... 742
16.1.3 Particularités spécifiques de la culture des amaranthes 745
16.2 Baselle 748
16.3 Dolique 751
16.3.1 La faim des haricots 751
16.3.2 Culture du dolique 752
16.3.3 Variétés de doliques 754
16.4 Ficoïde glaciale 756
16.5 Maïs 759
16.6 Patate douce.....767
16.6.1 Multiplication de la patate douce..... 767
16.6.2 Culture de la patate douce 769
16.6.3 Récolte duale de la patate douce..... 771
16.7 Pourpier.....773
16.8 Soja 776
16.9 Tétragone 783

17 Légumes d'hiver 787
17.1 Chicorées amères italiennes.....787
17.1.1 Taxonomie des chicorées amères 787
17.1.2 Culture des chicorées amères..... 788
17.2 Claytone de Cuba 792
17.3 Cresson d'hiver 793
17.4 Plantain corne-de-cerf.....796

18 Légumes zoubliés.....803
18.1 Arroche.....803
18.2 Cardon.....806
18.3 Chénopode blanc.....809
18.4 Chou-rave 814
18.5 Cresson alénois.....817
18.6 Panais.....820

18.7 Pissenlit 822
18.8 Roquette(s) 825
18.8.1 Roquette cultivée 826
18.8.2 Roquette sauvage 828

Une couille dans le potager 831

19 Calendrier lunaire 833

20 Purin d'orties 841

21 Y a-t-il un effet de serre dans ma serre ? 845