

The background of the cover is a vibrant photograph of a natural landscape. In the foreground, there is a field of tall, green grass. Behind it, a dense line of green bushes and shrubs stretches across the middle ground. In the background, a row of tall, thin trees stands against a clear, bright blue sky. The overall scene is bright and sunny, with strong shadows cast by the foliage.

BONNES PRATIQUES CULTURALES FAVORISANT LA BIODIVERSITÉ

Denis La France

Enseignant et expert en agriculture biologique

SOMMAIRE

INTRODUCTION	3
PROBLÉMATIQUE	5
Approches de solutions	8
APPLICATIONS DE SOLUTIONS	10
Introduction	10
Diversité intra-parcellaire	10
Diversité en périphérie	11
Diversité temporelle	14
Redondance ou équivalence fonctionnelle	14
VIE DES SOLS ET BIODIVERSITÉ.....	15
Microorganismes des sols	16
Et hors des sols?	17
Faune des sols	17
Protéger la mégafaune épigée des prairies	18
Quel avenir pour la biologie des sols?	19
PRINCIPALES PRATIQUES CULTURALES	21
Engrais verts	21
Engrais verts déplacés	24
Travail de sol	24
Drainage	26
Rotations	26
Importance des racines	27
Amendements	28
Fumier	28
Compost	29
Chaulage.....	31
Pâturage.....	31
Autres intrants	31
Biofertilisants, biostimulants, biopesticides.....	31
Agroforesterie	32
Taille des champs	33
Chaintres, bandes tampon, fossés, chemins agricoles	33
Doit-on tolérer des mauvaises herbes?	35
Exemples de gestion active	36
GESTION ACTIVE DES VERS DE TERRE – LA BIOINGENIERIE ARTISANALE !	37
AVANTAGES DE LA CULTURE BIOLOGIQUE	42
Importance de la collaboration	45
CONCLUSION – PLUSIEURS PETITS MARTEAUX.....	46
Références.....	47

INTRODUCTION

Le terme de biodiversité a été utilisé pour la première fois en 1985 alors que les scientifiques parlaient de diversité biologique depuis le début du 20^e siècle. Le terme a rapidement été généralisé après la publication d'un livre de E.O. Wilson sur le sujet en 1988. C'est devenu un mot passe partout, médiatisé, utilisé souvent de façon imprécise et, comme « environnement » utilisé parfois comme synonyme de nature. Il est considéré plus large et plus englobant que diversité biologique.

La biodiversité est définie par la Convention sur la diversité biologique : « la variabilité des êtres vivants de toute origine y compris, entre autres, les écosystèmes aquatiques et les complexes écologiques dont ils font partie : cela comprend la diversité au sein des espèces, ainsi que celle des écosystèmes » (art. 2).

Le concept de biodiversité décrit l'ensemble des êtres vivants et leurs écosystèmes. On l'étudie à différentes échelles : la diversité écologique (les écosystèmes), la diversité spécifique (les espèces) et la diversité génétique (les gènes). Mais de plus en plus on l'aborde à l'échelle du paysage, du bassin versant, même de la région ou de l'unité administrative.

En agriculture la gestion doit se faire à l'échelle du paysage, notamment la relation entre les auxiliaires et les ennemis des cultures (Tscharnkte 2007). Le paysage est composé d'une mosaïque d'îlots (« patches ») hétérogènes (Duelli 1997). On doit gérer la diversité d'une population (d'une même espèce) et celle d'une communauté (regroupement d'espèces diverses.)

D'abord qu'est-ce qu'un être vivant : au plus simple il naît, il se nourrit et utilise de l'énergie, il se transforme, et il se reproduit (dans la plupart des cas) en transmettant certaines caractéristiques, et il meurt, pour servir de nourriture à d'autres êtres vivants, prédateurs ou décomposeurs. Les plantes, les animaux, dont les humains, et divers microorganismes, forment tous des cellules qui contiennent des gènes et ont besoin d'eau. La persistance dans le temps de ces organismes ou de leur bagage génétique est très variable et certains organes reproducteurs comme des graines ou des spores peuvent être dormants très longtemps sans perdre leur vitalité. Ils cohabitent avec des minéraux (non-vivants) qui sont formés et transformés par diverses influences telluriques, puis par l'action des humains.

On a identifié environ deux millions d'espèces vivantes sur terre. Les chercheurs divergent d'opinions : certains pensent qu'il en existe probablement quelques dizaines ou même centaines de millions, d'autre entre 5 et 8 millions, ou 14 à 18 millions. Chose certaine il y a beaucoup plus d'inconnu que de connu.

Les espèces vivantes par leur relation entre-elles et avec l'environnement offrent de nombreux bienfaits pour l'environnement et la société. L'Évaluation des écosystèmes pour le millénaire (ONU, MEA 2005) a répertorié les services écosystémiques rendus par les êtres vivants, entre autres : l'approvisionnement en nourriture, matériaux, énergie, ressources génétiques ; la régulation du climat, des cycles de l'eau, du carbone, des nutriments ; l'assainissement et la bioremédiation, la pollinisation et la régulation des ennemis des cultures ; le recyclage de la nécromasse et la formation des sols, le maintien des habitats, en plus de services culturels.

Bien que la plupart des êtres vivants contribuent à plusieurs fonctions dans l'écosystème, une biodiversité minimale est nécessaire pour assurer un équilibre essentiel au maintien de la vie. Une ferme est un agroécosystème; sa productivité à long terme est dépendante de l'équilibre entre les êtres vivants qui la composent. Les chercheurs ont démontré que la perte d'espèces dans un agroécosystème peut nuire à des fonctions comme le cycle de l'azote (Phillippot, 2013) et la productivité primaire (Van der Heijden, 2008.). C'est pour ça que tout le milieu agricole doit s'impliquer dans cette nouvelle voie. Les modèles agricoles industrialisés et simplifiés ne sont pas durables et n'ont pas d'avenir.



PROBLÉMATIQUE

Préserver la vie est essentiel, une responsabilité collective des êtres humains. Malheureusement, par l'industrialisation de l'agriculture, de la foresterie et des pêcheries, les humains se sont concentrés sur l'approvisionnement au détriment des autres fonctions naturelles des êtres vivants. Il en a résulté une destruction majeure de la biodiversité mettant à risque l'équilibre de la nature, et, éventuellement, la qualité de vie de l'humanité et de tous les êtres vivants. Selon la Plateforme intergouvernementale sur la biodiversité et les services écosystémiques, environ 75 % de la surface terrestre a été dégradée et 87 % des zones humides ont disparu depuis 300 ans. (IPBES 2024). La perte, la fragmentation et la dégradation des habitats causées par les humains vont bien au-delà des activités extractives ci-dessus; la surconsommation et l'anthropisation globale du paysage sont en cause. Selon l'ONU 2024, les causes des dommages sont, dans l'ordre, la destruction des habitats, la surexploitation des ressources, les changements climatiques, la pollution et les espèces envahissantes.

Le rythme d'extinction des espèces est 50 à 500 fois plus élevé depuis un siècle que par le passé (MEA, 2005). Globalement, 70 % des animaux sauvages auraient disparu depuis 50 ans, et c'est même 94 % pour l'Amérique latine, selon la WWF. Selon le Cornell Lab of Ornithology, en Amérique du Nord seulement, on observe une chute de population de 3 , d'oiseaux, disparus depuis 50 ans (30 %). Pour plusieurs oiseaux champêtres dont le Gloglu des prés, la situation est alarmante. On parle d'une diminution de 88% de la population canadienne de cet oiseau entre 1970 et 2014, essentiellement due aux pratiques agricoles (WWF 2017). Le moineau domestique est aussi devenu rare; on blâme surtout l'agriculture (Rosenberg, 2019).

L'Union internationale pour la conservation de la nature a une liste rouge qui dépasse 46 000 espèces menacées sur 160 000 espèces étudiées en détails. Ainsi 38 % des espèces d'arbres connues sont menacées. (UICN 2024) Dans une étude portant sur environ 8 millions d'espèces l'IPBES estime la disparition potentielle à 1 million. Diverses études en Europe et en Amérique quantifiant les arthropodes, embranchement dont font partie les insectes et les araignées, notent des baisses de population atteignant 80 % depuis 30 ans. Étant à la base de la chaîne alimentaire, plusieurs autres taxons en sont impactés, les amphibiens, les oiseaux et les chauves-souris qui s'en nourrissent par exemple. Il en est de même pour les écosystèmes aquatiques fragiliser par les activités anthropiques. L'impact des activités humaines sur la faune et décuplé par les changements climatiques auxquels nous faisons face. Les récifs de coraux qui actuellement se dégradent rapidement, pourraient disparaître à 99% si le climat se réchauffe de 2 degrés, ce qui est probable. Au Québec, Berteaux et al. 2014, ont étudié plusieurs centaines d'espèces et prévoient un repositionnement géographique des niches de 500 à 800 km au XXIe siècle à cause du réchauffement, ce qui entraînera des perturbations majeures. Notre territoire deviendra donc un refuge climatique pour bon nombre d'espèces.

La forte réduction de la biodiversité dans les milieux terrestres par l'agriculture est causée principalement par : la perte d'habitats due au remplacement de paysages naturels (forêts, prairies, tourbières) par des espaces cultivés, souvent en monocultures, mais aussi par la fragmentation et la détérioration des habitats (Fahrig, 2019). L'un des plus importants déclin de la biodiversité est sans contredit dû la destruction des forêts tropicales, qui abritent possiblement 50 % de la biodiversité, et leur remplacement par des pâturages ou des plantations comme l'eucalyptus, l'huile de palme ou la banane (Sponsel, 2001). Bien

souvent l'agriculture n'est pas le problème en soit, mais davantage les pratiques agricoles intensives qui sont devenues la norme. Plusieurs milieux cultivés traditionnels sont riches en biodiversité, mais l'introduction de produits synthétiques et toxiques pour les êtres vivants domine l'agriculture moderne; on parle de 3 milliards de kg de pesticides appliqués en Europe, au Brésil, aux États-Unis et en Chine en 2016 (Donley, 2019). Sans parler des fertilisants de synthèse dont on observe une augmentation de l'utilisation de 700 % en 50 ans (Banerjee, 2019). Des matières fertilisantes dépourvues de carbone pour nourrir la biodiversité du sol. Les impacts négatifs des pesticides et fertilisants de synthèses sont amplifiés par la bioaccumulation, c'est-à-dire que les substances toxiques s'accumulent dans les tissus des êtres vivants impactant davantage les plus grands prédateurs dont l'homme ultimement. la généralisation récente des insecticides et fongicides en grande culture, empoisonnant les pollinisateurs et auxiliaires; l'accumulation des résidus des précédents produits et leur dérive hors des parcelles; l'augmentation des surfaces de grande culture et la diminution des superficies en foin; la destruction de sources de nourriture par les herbicides; l'élimination des arbres et arbustes dans les bordures; les périodes de sols nus sans ressources ni protection par le couvert de plantes; la perturbation des sols par des labours trop fréquents; la réduction de l'oxygène et de la porosité des sols par le travail du sol et le passage de matériel de plus en plus lourd en conditions souvent trop humides; et la dégradation des sols puis leur abandon lorsqu'ils deviennent incultes.

On observe aussi des impacts collatéraux comme ceux de la production d'énergie, les rejets de déchets et de boues en milieu agricole et des gaz à effet de serre. De plus, le gaspillage alimentaire (estimé à 33 %) produit presque autant de gaz à effet de serre que les États-Unis ou la Chine. Selon la FAO, 28 % des terres cultivées servent à produire de la nourriture perdue ou gaspillée. Pendant ce temps, 11 % de la population mondiale souffre de malnutrition (IPBES, 2019). La liste des exemples pourrait être allongée.

Au Québec, alors que le gouvernement a proposé en 1992 une stratégie phytosanitaire visant la réduction de 50 % des pesticides agricoles, l'utilisation avait augmenté de 29 % en 2014 (MAPAQ, MDDELCC, 2016). En production végétale, elle a doublé (MELCCFP, 2023), et le glyphosate a presque quintuplé (Vandelac, 2023). On mesure l'évolution des volumes épandus, mais de nombreuses molécules sont beaucoup plus concentrées et toxiques à doses plus faibles que celles du passé. De plus on ajoute des adjuvants (ou formulants) par exemples des surfactants, des émulsifiants, des solvants à base de pétrole, pas toujours identifiés sur l'étiquette, variables d'un fournisseur à l'autre, secrets commerciaux confidentiels, parfois toxiques, et pas toujours soumis au processus d'homologation (Mesnage 2018). On retient aussi que lors de l'application d'un pesticide, un certain pourcentage se volatilise dans l'atmosphère ou se disperse, entre autres, par la dérive, ou l'érosion; on en retrouve à des milliers de km de leur lieu d'application, accumulés dans les sols, les aliments, l'eau et les tissus des êtres vivants, pas du tout leur cible de départ. Au Québec, devant l'incapacité à stopper l'expansion de l'utilisation, on a décidé de réduire les risques pour la santé et l'environnement, avec des résultats mitigés. Une forte pression commerciale appuie cette expansion. Les politiques de santé publique seront-elles capables de tenir tête au marketing des grands entreprises?

On considère qu'il n'existe aucun milieu sur la terre qui ne subit pas les impacts des pratiques agricoles. Un facteur important dans la perte de biodiversité a été la révolution verte initiée par Norman Borlaug (Gaud 1968) qui a proposé l'utilisation de variétés de céréales à haut potentiel de rendement, nécessitant toutes les technologies modernes, fertilisants artificiels et pesticides, dans les pays dits « sous-développés ». En conséquence, des milliers de cultivars traditionnels adaptés à une multitude de situations locales ont été abandonnés et ont disparu, une perte de diversité estimée à 7000 cultivars au Bangladesh et 300 aux Philippines (Altieri 2004). Aux États-Unis, environ 6000 variétés de pommes ont disparu. Le tiers des races d'animaux domestiques sont disparues ou en voie de disparition (FAO).



Approches de solutions

Il est urgent d'agir pour renverser cette situation.

Certains défendent une approche qui consiste à mettre en place des **zones protégées**, parcs, etc., soustraites à l'influence humaine (sur environ 15 % des surfaces émergées), mais cela ne change pas grand-chose dans les milieux cultivés. Certains prônent même une agriculture extrêmement intensive, concentrant une production maximale sur les plus petites surfaces, afin de libérer des espaces favorables au maintien de la biodiversité. En 2022, Gong, Hodgson, Tschardtke, ont déterminé que pour fournir des abris à la biodiversité, avec des pratiques intensives où la monoculture et les pesticides la réduisent fortement dans les champs cultivés, il faudrait aménager des surfaces non-cultivées beaucoup plus importantes en bordure des champs. Mais une étude allemande met à mal cette approche, en démontrant une chute majeure (> 75 %) des insectes dans les zones protégées (Hallmann et al, 2017).

La position opposée consiste à aménager des agroécosystèmes moins productivistes, favorables à une maximisation de la biodiversité en milieu agricole. Les solutions passent alors par des pratiques et des aménagements respectueux de la nature dans les milieux cultivés et ceux occupés par les humains. Et dans certains cas, la restauration de milieux fortement dégradés. On peut s'inspirer de l'agroécologie et de l'agriculture biologique qui font une place importante à la biodiversité dans les champs cultivés.

Identifions d'abord les principales composantes d'un agroécosystème : Les cultures et les diverses plantes non-cultivées, les herbivores sauvages, le microbiote du sol et de la plante, les pollinisateurs, les parasites et les prédateurs, les animaux d'élevage, les vers de terre et autre faune du sol (modifié de Altieri, 1991).

« Les paysages complexes caractérisés par des mosaïques cultures-non-cultures hautement connectées peuvent être les meilleurs pour un contrôle biologique de conservation à long terme et une production agricole durable. Cependant, des preuves expérimentales pour des recommandations détaillées permettant de concevoir la composition et la configuration des paysages agricoles qui maintiennent une diversité d'ennemis naturels généralistes et spécialisés sont encore nécessaires » (Tschardtke, 2007). Le principe est donc généralement accepté mais il manque beaucoup de connaissances sur le comment.

Les questions à poser sont : Comment pratiquer l'agriculture de façon à minimiser les impacts négatifs, en favorisant l'interaction harmonieuse avec les êtres vivants qui ne sont pas destinés à être utilisés par les humains? Et comment aménager la ferme pour y maximiser la biodiversité et en tirer des avantages pour les cultures?

Par exemple, on sait qu'une diversité d'être vivants dans les sols et l'entourage des plantes cultivées participe à la protection de la santé de ces dernières, et à leur productivité. Comment adopter cette voie? Cela implique la remise en cause de nombreuses pratiques existantes.

Il y a aussi un problème de perspective : Chercheurs et agronomes ont tendance à travailler en silos. Pour certains, la biodiversité concerne surtout la faune de surface, notamment les pollinisateurs et les auxiliaires actifs autour des parties aériennes des plantes. D'autres s'intéressent surtout à ce qui se passe dans les sols. Mais la plante est active dans ces deux zones et les phénomènes qu'on y observe ont des effets réciproques dans les deux sphères de vie des cultures. En pratique, on sépare souvent les problèmes de maladies et de ravageurs selon qu'ils sont situés dans le sol ou sur les parties aériennes des cultures. Cependant, le microbiote du sol a une incidence sur la santé de la plante dans ses organes émergés; et de nombreux auxiliaires et ravageurs actifs en surface vivent en partie dans le sol. Nous proposons donc d'élargir la perspective et de nous intéresser à la biodiversité dans les deux sphères de développement de la plante.

Le paysage agricole d'une ferme et même d'une région sera :

industrialisé avec des très grandes parcelles hyper simplifiées, (l'on observe cette tendance même sur certaines fermes biologiques) : la grande dimension des parcelles est un facteur majeur de baisse de la diversité ;

intégré dans une mosaïque de parcelles de dimensions plus modérées et d'espaces non-cultivés, souvent parce que des zones peu intéressantes à cultiver se retrouvent dans le milieu agricole, notamment hors des zones de plaine ;

ou aménagé par l'agriculteur/trice de façon particulièrement diversifiée à partir de concepts agroécologiques.

Faisons un lien avec le célèbre concept développé au Québec par Stuart Hill et Rod MacRae (1995) qui ont décrit l'évolution de l'agriculture industrielle vers l'agriculture écologique en trois étapes d'amélioration. Dans un premier temps, amélioration de l'efficacité, par exemple par des mesures de diminution d'intrants et de conservation des ressources. Au second niveau, la substitution des ressources, comme des intrants certifiables en bio plutôt que des produits de synthèse. La troisième étape, beaucoup plus exigeante en connaissances, est une reconception (« redesign ») de la ferme avec des mesures d'aménagement écologique et une perspective beaucoup plus globale. Beaucoup de fermes biologiques passent au second niveau sans se rendre au troisième. Si on examine la situation actuelle en agriculture, force est de constater que le maintien de nos sols et de notre agriculture à l'avenir exige qu'on passe au troisième niveau et qu'on instaure des changements majeurs dans nos pratiques. Beaucoup de gens qui comprennent la crise écologique actuelle appellent à un passage urgent vers ces nouveaux modèles d'agriculture. Restaurer la biodiversité sera au cœur de ces stratégies.

Examinons la situation agricole dans son ensemble pour trouver des pistes de solution.

APPLICATIONS DE SOLUTIONS

Introduction

Les chercheurs qui étudient la biodiversité se réfèrent à trois échelles d'organisation (écosystème-espèces-gènes); en agriculture on ajoute un schème de référence supplémentaire :

1. On se réfère d'abord à la biodiversité intra-parcellaire c'est-à-dire **dans les parcelles cultivées**;
2. Puis, celle de la **périphérie des parcelles**, allant des bordures ou marges non-cultivées, comme les talus, les fossés ou les chaintres, aux zones aménagées dites-semi-naturelles comme les haies et les bandes riveraines, jusqu'aux espaces sauvages ou forestiers voisins, ou parfois plus éloignés.
3. On va aussi se pencher sur une dimension temporelle c'est à dire les variations dans le temps, d'abord tout au long de la saison, mais aussi sur une période pouvant atteindre plusieurs années, par exemple sur la durée d'une rotation. La suppression du couvert végétal par les récoltes, le déchaumage et la préparation pour de nouvelles implantations réduisent la protection des organismes actifs dans les champs, qui est meilleure sous le couvert des cultures ou des engrais verts.

Diversité intra-parcellaire

Face aux paysages agricoles simplifiés, il faut d'abord travailler à instaurer une diversité intra-parcellaire. Quelques exemples :

- augmenter le nombre de cultures présentes sur la ferme;
- utiliser des mélanges de fourrages pérennes multi-espèces, incluant des forbes comme la chicorée fourragère en plus des légumineuses et graminées, et inclure des espèces à enracinement profond;
- intensifier les cultures d'engrais verts à tous les moments où c'est possible, et en profiter pour diversifier les espèces cultivées en engrais verts; par exemple il peut facilement y avoir plus d'une dizaine d'espèces, même de diverses familles, sur la ferme;
- appliquer des pratiques de biodiversité culturale : par ex. semer céréales d'automne avec une culture associée qui compétitionne les mauvaises herbes puis meurt à l'hiver et favorise la culture par ex. un faible taux de pois fourrager; ou planter un trèfle vivace au moment du semis en espérant qu'il poursuivra sa croissance au printemps et après la récolte;
- semer au printemps un engrais vert associé dans la culture d'automne; soit il continue à pousser après la récolte, soit il est suivi d'une autre culture de couverture en fin de saison; plusieurs effectuent un sursemis de pois fourrager dans un trèfle rouge, par exemple.

Les cultures mixtes, ou polycultures, consistent à planter plus d'une culture dans le même champ: en anglais on parle d'«intercropping » ou de « mixed cropping ». En français on dit cultures associées, en bandes, intercalaires. Les dispositifs varient : semences mélangées avant l'implantation, rangs alternés de cultures différentes, ou bandes plus ou moins larges de cultures alternées, etc. On trouve aussi en agriculture paysanne manuelle, des cultures à relais, avec implantation différée entre les rangs d'une culture associée et des récoltes non-synchronisées. Bien que ces formes de diversification présentent des avantages pour la productivité et la protection des cultures contre leurs ennemis, elles sont difficiles à gérer en agriculture mécanisée.

Des cultures en rangs alternés ont souvent donné des rendements totaux supérieurs à ceux des cultures cultivées séparément. La céréale en rangs alternés avec des légumineuses a souvent un meilleur taux de protéines (Bedoussac, 2015). Après une visite d'une ferme française qui cultive les combinaisons suivantes : blé-lentille, blé-pois chiche, blé-lin, lin-lentille, lentille-cameline, blé-féverole, maïs-haricot grimpant, tournesol-haricot, et qui utilise des équipements de triage optique sophistiqués et commercialise en partie en circuit court, le CETAB+ a entrepris des travaux exploratoires pour valider l'intérêt de ces méthodes au Québec.

Peu répandue, la culture en bandes alternées est présente au Québec depuis des décennies; sur une ferme biologique, Labrie et al 2016 ont démontré une diminution appréciable du puceron du soja dans un tel système de culture. Un agriculteur bio français très innovant a mis en place un système de cultures d'automne et de printemps en bandes alternées (12 m de large), complétées par des engrais verts, où une bande sur deux a toujours une plante active. Ça assure un refuge et une réserve d'être vivants pendant que la zone voisine est récoltée ou que le sol y est en préparation.

Au Québec, on combine souvent des pois à des grains mélangés dans le semoir. Une pratique répandue associe une légumineuse comme du trèfle dans une céréale, par exemple en la semant dans le sillon de la céréale. On peut semer un engrais vert intercalaire entre des cultures en rangées comme le maïs ou dans les allées des légumes en plasticulture. Des essais de culture de maïs en rangs espacés de 1,53 m, dits corridors solaires, avec diverses plantes intercalaires ont été effectués, mais pour l'instant les rendements ne sont pas au rendez-vous. Le développement de nouvelles pratiques mécanisées pour les cultures mixtes pourrait être avantageux pour la biodiversité mais nécessitera des travaux de recherche et de mise au point technique.

En Europe, en culture bio on sélectionne des variétés composites, « composite crosses », dans le blé, intégrant plusieurs lignées pour augmenter la diversité génétique et obtenir des multirésistances, par exemple aux mauvaises herbes, aux maladies, aux insectes, au stress abiotique, en plus de viser qualité panifiable et rendement (Finckh et al in Köpke, 2019). La diversité génétique, considérée comme un facteur de résistance et d'adaptation, est extrêmement élevée. On cite leur ressemblance aux variétés primitives ou traditionnelles dites en anglais « landraces ».

Alors que les grands joueurs industriels dominent la sélection des cultivars, souvent très dépendants à de hauts niveaux d'intrants, il existe de plus petits joueurs, souvent en lien avec la société civile, qui sélectionnent en tenant compte de protéger la diversité génétique.

Une pratique assez commune en Europe et en Asie consiste à combiner une diversité de cultivars dans une même culture pour profiter de la diversité génétique, par exemple pour le blé et le riz. Wilkinson et al. (2023) ont mené des essais au CETAB+. Malgré des résultats intéressants, et un intérêt de la part d'une meunerie, la pratique n'a pas été implantée. Aux États-Unis, on parle de « chaos wheat ».

On peut résumer ces pratiques en disant qu'on vise à augmenter la diversité par la mixité.

Diversité en périphérie

Retirer des espaces de la production pour les consacrer à la conservation de la nature, à l'échelle de la ferme, ressemble à réserver des zones protégées à l'échelle territoriale. On aménage de petits espaces favorables à des espèces autres que nos récoltes et on s'assure que ces espaces participent à l'équilibre écologique de la ferme, et nous rendent plusieurs services comme la modération des populations des ennemis des cultures ou la recolonisation des champs perturbés par les vers de terre (Frazao. On les qualifie souvent d'habitats semi-naturels.

On peut atteindre un contrôle biologique naturel de certains ennemis en maintenant des populations élevées et saines de prédateurs et parasitoïdes actifs en surface et dans le sol, au moyen d'aménagements d'une flore nutritive diversifiée et d'habitats favorables.

Beaucoup d'auxiliaires qui contrôlent les ennemis dans les cultures ne peuvent survivre dans les champs cultivés et doivent coloniser ces derniers à partir des espaces voisins non-cultivés. Des parasitoïdes qui pondent dans des ravageurs, comme les syrphes, vont se sustenter dans les zones de bordure (à condition que la distance soit raisonnable). Certains auxiliaires peuvent se déplacer 100 ou 200 m et d'autres 1 km ou même plus. Certains insectes ou spores de maladies peuvent provenir de distances très éloignées, par exemple arriver des États-Unis portés par le vent.



L'augmentation de la dimension des parcelles est un facteur majeur de baisse de la diversité, même sur les fermes biologiques (Fahrig, 2015). Réduire la dimension des parcelles augmente automatiquement les zones périphériques favorables, allant des bordures ou marges non-cultivées aux friches (souvent sur sols trop pierreux). On aura le choix de laisser coloniser ces zones spontanément, ou d'aménager en introduisant au moins une partie des plantes qui y seront naturalisées. On peut végétaliser les talus, les fossés ou les chaintres, ou même les bandes-tampon en culture bio; et aménager des zones dites-semi-naturelles comme les bandes riveraines ou des coulées non-cultivables.

On peut aussi aménager des bandes fleuries en choisissant des espèces appropriées soutenant la faune auxiliaire; ça implique un aménagement plus élaboré demandant davantage d'entretien. Par contraste les fossés et leurs talus sont des espaces négligés à haut potentiel pour la flore indigène ou naturalisée; on devrait encourager les autorités à retarder la fauche des fossés publics et à ne l'effectuer qu'une fois par année. Dans les zones de bordure on installe des nichoirs pour oiseaux insectivores et chauve-souris (menacées), des perchoirs (chicots, poteaux de clôture). On aménage des tas de roches, de bois mort; on laisse des branches, des souches. De vieux murets de pierre peuvent être préservés. Et on essaie d'aménager des corridors de connectivité, idéalement jusqu'aux espaces sauvages ou forestiers parfois plus éloignés; Fry (1995) prône un complexe de corridors. L'aménagement ou le maintien d'étangs et de marécages sur la ferme nous rend aussi plusieurs services. Le Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy (CERFO) a produit des fiches techniques détaillant de tels aménagement pour favoriser les oiseaux, les reptiles, les amphibiens, les chauves-souris et les pollinisateurs.

À proximité des cours d'eau souvent sinueux, il est difficile de cultiver en suivant les méandres. L'aménagement d'une bande riveraine classique ou élargie peut redresser le bord du champ et servir de refuge aux auxiliaires de nos cultures. On peut y aménager un habitat artificiel pour les hirondelles des rivages.



Mur nichoir pour hirondelles de rivage - Photo : Lynda Luxley et Dermot Duran (Creative Commons)

On veut maximiser les espèces présentes dans les zones de bordure; un mélange de racines à base d'une ou deux espèces est insuffisant. Planter une diversité d'arbres et arbustes, complétés par des plantes herbacées vivaces. On veut laisser fleurir ces dernières, donc s'il y a fauche ou broyage, retarder en 2^e partie d'été et faucher haut. L'agriculteur devra choisir le moment approprié pour éviter l'envahissement de plantes indésirables; une attention particulière sera accordée à contrôler les espèces exotiques envahissantes comme la renouée japonaise, le nerprun, la berce du Caucase, l'érable à Giguère, les roseaux (Phragmite). Avec les changements climatiques, les espèces migrent. Notamment, des espèces établies migrent vers le Nord pour se maintenir, et de nouvelles espèces arrivent du Sud. L'envahissement par des espèces exotiques envahissantes est considéré comme une des 5 causes majeures de perte de la biodiversité.

Utilisée de longue date en serres, la lutte biologique inondante est de plus en plus utilisée au champ : par exemple, l'introduction de trichogrammes, des guêpes parasitoïdes, qui contrôlent certaines larves nuisibles aux cultures comme le maïs sucré; ou l'introduction de mâles stériles qui en s'accouplant avec les femelles de mouches de l'oignon donnent des œufs stériles, réduisant les populations et les dommages aux cultures. Apporter ces organismes de façon à ce qu'ils s'implantent dans le milieu et puissent coloniser les cultures ultérieures serait idéal; mais c'est rarement possible d'éviter de nouvelles introductions car il est important d'atteindre la quantité appropriée d'auxiliaires au moment critique. Entre les récoltes ils survivent surtout en s'abritant dans les zones non-perturbée en périphérie.

La non-utilisation de traitement de semences sera favorable aux abeilles, bourdons et abeilles sauvages; ces produits se répandent avec le vent, se déposent sur les plantes florales, et sont prélevés par les arthropodes qui butinent ce qui les empoisonne, réduisant la pollinisation, mais aussi le travail de certains auxiliaires. La contribution des insectes sauvages est supérieure à celle des abeilles domestiques, et améliore la pollinisation malgré une présence abondante de ces dernières (Garibaldi 2013, et Breeze, 2011).

Diversité temporelle

On doit prévoir l'instauration d'une **diversité temporelle**. On peut allonger la rotation (v. ci-dessous) en ajoutant des espèces dans la séquence; bien réfléchir aux avantages de placer les cultures à la suite les unes des autres, notamment pour assurer la survie des auxiliaires ou des organismes du sol. Intégrer des cultures vivaces dans la rotation, comme de la luzerne ou du foin, donne une période où le sol n'est pas perturbé, ce qui est particulièrement utile pour la faune des sols et épigée; elles favorisent notamment une augmentation des grands lombrics (*Lumbricus terrestris*).

En culture légumière, sur des champs plus petits, cultiver du foin de légumineuses et graminées fauché en engrais vert apporte une matière organique (MO) qui ressemble un peu à du fumier mais sans passer par l'animal. Donc une MO produite sur place sans transport qui enrichit le sol; la pratique a l'avantage de perturber le cycle de plusieurs mauvaises herbes et d'en réduire les coûts de contrôle.

Les chercheurs remarquent que, pour une culture annuelle, on observe une fluctuation durant l'année entre conditions défavorables puis favorables pour les arthropodes : travail de sol et sol nu, perturbation par un labour, utilisation de pesticides nocifs, assèchement du sol exposé laissé à lui-même après la récolte; en alternance avec les périodes de croissance favorables, le feuillage offrant un abri, la croissance d'un engrais vert ajoutant de nouvelles ressources. Vasseur 2012

Cependant selon Fahrig (2014), la diversification des cultures sur les fermes de grande culture a moins d'impact sur les arthropodes et les oiseaux que la réduction de la dimension des champs qui augmente les zones de bordure. Généralement une mosaïque complexe de parcelles améliore l'équilibre écologique et facilite la diffusion des auxiliaires.

Redondance ou équivalence fonctionnelle

Une des raisons d'accorder de l'importance à la biodiversité est le processus de redondance fonctionnelle. Les principales fonctions doivent être effectuées dans un écosystème. Plusieurs espèces peuvent le faire en complémentarité l'une de l'autre, de façon équivalente mais pas exactement semblable. Si une espèce faiblit ou disparaît, d'autres continueront à assurer la fonction. Une diversité élevée d'organismes assure le bon fonctionnement de l'agroécosystème.

Ceci ouvre la porte à la stratégie des nombreux petits coups de marteaux, populaire en culture biologique pour la gestion des mauvaises herbes mais utile aussi dans d'autres domaines. (Duval, J., communication personnelle) (Voir en conclusion)

VIE DES SOLS ET BIODIVERSITÉ

Une définition du sol parmi d'autres : « Le sol correspond à une couverture biologique répartie sur toute notre planète et correspondant à un immense « système digestif et accumulatif » alimenté par des composés organiques et/ou minéraux. Une fois démantelées, les matières minérales et organiques structurées fournissent de l'énergie et des matériaux pour de nouvelles structures vivantes. La matière organique stockée dans le sol, à savoir l'humus, sert de facteur de stabilisation pour les écosystèmes terrestres grâce aux éléments séquestrés et à l'environnement optimisé du sol (...). » (Zanella, Ponge, et al. 2018)

Pour situer l'importance des sols, citons Paré et al. 2011 « Les sols représentent de loin le plus grand réservoir de carbone terrestre (Schlesinger et Andrews 2000) et les rejets annuels des sols sont 10 fois supérieurs à ceux provenant de la combustion de combustibles fossiles (Raich et Tufekcioglu 2000). »

Ils rendent une série de services écologiques, par exemple : approvisionnement en nourriture, matériaux, énergie et ressources génétiques; régulation du cycle de l'eau et détoxification; maintien du paysage, accès aux loisirs; support de la biosphère, stockage du carbone, atténuation des perturbations atmosphériques et climatiques, etc.

Les sols comptent parmi les habitats les plus riches en biodiversité de la planète. On estime qu'un gramme de sol contient jusqu'à un milliard de cellules bactériennes comprenant des dizaines de milliers de taxons, jusqu'à 200 m d'hyphes fongiques; et le sol héberge une large gamme de nématodes, de vers de terre et d'arthropodes [Bardgett et al. 2014].

L'intensité de l'utilisation des terres augmente constamment à l'échelle mondiale, avec des effets néfastes sur les écosystèmes terrestres. Un quart des sols du monde entier sont en voie de dégradation [Lal et al. 2015] et un nombre croissant d'études ont montré que l'utilisation intensive des terres menace la biodiversité des sols, certains groupes de biotes du sol étant gravement affectés dans les systèmes très intensifs [Tsiafouli et al. 2015, Verbruggen et al. 2010].

Il faut donc améliorer la vie des sols fortement affectée par diverses pratiques agricoles perturbatrices, et ça se fait d'abord à l'échelle de la parcelle. Le sol est un milieu hyper diversifié qui renferme probablement jusqu'à 59 % des espèces vivantes sur la planète (Anthony, 2023). On divise généralement les êtres qui y vivent en microorganismes, microfaune, méso et macrofaune, en plus des racines des plantes. Le sol est notoirement difficile à étudier car dès qu'on s'y introduit, on en perturbe les processus. Et les organismes y vivent d'une échelle de quelques microns, au millimètre, au centimètre, à plusieurs mètres.

La diversité des êtres vivants du sol effectue les 4 principales fonctions écosystémiques des sols : ingénieurs (aménagement du milieu de vie); cycle du carbone; cycles des éléments nutritifs; immunité et résistance aux ennemis.

En agriculture de climat tempéré, les principaux ingénieurs sont d'abord les racines de plantes, puis les vers de terre, appuyés surtout par les fourmis et les enchytréides. Ils travaillent le sol (bioturbation), développant la structure et la macroporosité, favorisant l'infiltration et la rétention de l'eau et créant un milieu propice à la vie des racines et de tous les êtres vivants du sol. En agriculture, on pourrait rajouter l'être humain comme ingénieur.

En les fractionnant et les incorporant dans les sols, les animaux préparent la décomposition des matières organiques par les microorganismes, surtout responsables des 3 autres fonctions, avec l'appui de la faune : cycles du carbone, des éléments nutritifs, et protection des plantes contre leurs ennemis.

Microorganismes des sols

Les principaux microorganismes du sol sont les bactéries, les archées, les protistes et les champignons. On en retrouve aussi sur et dans les plantes et les animaux. En fait, on considère aujourd'hui qu'un organisme supérieur est un holobionte (Meyer-Abisch 1943, Margulis 1991), une unité biologique avec tous les microorganismes qu'elle héberge et qu'on qualifie de microbiome. Un être vivant sans interaction avec des microbes ça n'existe pas.

Par sa photosynthèse, la plante génère la matière organique qui va servir à nourrir toute la vie sur terre. Bactéries, archées et champignons constituent les premiers agents de transformation de la matière organique, assurant le fonctionnement des cycles du carbone et des éléments nutritifs.

Dans un sol il est important de retrouver une diversité fonctionnelle de micro-organismes, c'est-à-dire qu'il y ait suffisamment de représentants pour effectuer les fonctions principales, et c'est d'autant plus important quand on travaille avec de faibles niveaux d'intrants. Si on utilise abondamment fertilisation soluble et pesticides, on contourne en partie l'action de ces micro-organismes; avec des intrants plus modérés on est plus dépendant de leur action et une diversité suffisante est essentielle. Les pratiques agricoles usuelles ont tendance à réduire l'activité biologique et il faut porter une attention particulière à la restaurer dans toute sa diversité, entre autres à favoriser les interactions dites mutualistes ou symbiotiques, avantageuses pour les cultures. Des pratiques d'amélioration des sols seront abordées plus tard.

Une symbiose est une association entre deux organismes, à l'avantage des deux. Un lichen combine une algue et un champignon. Une légumineuse héberge et nourrit des bactéries (*Rhizobium* spp.) dans ses racines, qui lui fournissent de l'azote. En conséquence, une graminée de prairie voisine d'un trèfle en recevra une partie de ses besoins en azote (Nyfeler 2011). Si la bactérie n'est pas présente dans le sol il est avantageux d'inoculer les graines au semis, une pratique très répandue. Une symbiose très importante est celle des mycorhizes, des champignons nourris par la plante qui les héberge sur ses racines en échange de phosphore, d'azote, d'eau, de protection, et d'autres services. Malgré quelques exceptions, plusieurs études concluent qu'une diversité d'espèces d'endomycorhizes est supérieure à une seule espèce, notamment issue de l'inoculation (Maherali 2007).

Prenons l'exemple de la 4^e fonction d'immunité et résistance aux ennemis, un domaine émergent où nos connaissances sont peu avancées mais au potentiel énorme. Vukicevich et al énumèrent une série d'organismes et de phénomènes en lien avec cette 4^e fonction qui sont favorisés par la diversité des plantes de couverture : des antagonistes microbiens, des champignons protecteurs, des bactéries suppressives qui agissent par exemple par compétition pour les ressources ou l'espace de niche écologique, ou par antibiose directe. On retrouve des bactéries suppressives de maladies dans la rhizosphère, par exemple les *Pseudomonas* fluorescentes, qui inhibent les agents pathogènes bactériens et fongiques et même les nématodes qui se nourrissent des racines; la suppression s'effectue via la compétition pour les ressources en C, N et Fe, ainsi que par la production de composés antimicrobiens.

« La matière organique dérivée d'une diversité d'espèces de plantes augmente le niveau général d'activité microbienne, et plus il y a de microbes dans le sol, plus grandes sont les chances que certains d'entre eux soient antagonistes aux agents pathogènes » et aux divers ennemis des cultures comme les nématodes rhizophages, (Altieri 1999 ; Widmer et Abawi 2002;) car les apports organiques peuvent améliorer l'état biologique du sol en augmentant à la fois la diversité et la taille des populations d'espèces bénéfiques (McGill et al. 1986 ; Rasmussen, 1989 ; Rodriguez-Kabana et Kokalis-Burelle 1997). À cet égard, la culture d'une diversité d'espèces de plantes fournit des niches écologiques aux micro-organismes et favorise la diversité microbienne (Ratnadass, 2010).

Autre exemple de cette fonction, certaines endomycorhizes sont des antagonistes pathogènes des maladies des cultures, ou les inhibent par la compétition pour l'espace racinaire; ou induisent une résistance systémique (réponse immunitaire renforcée dans la plante hôte). Des champignons saprotrophes (décomposeurs), comme *Trichoderma*, qui peuvent parasiter d'autres champignons en utilisant des enzymes dégradant leur paroi cellulaire et des composés antibiotiques, peuvent être achetés, mais sont naturellement communs dans le sol; ils sont favorisés par la diversité des cultures et des plantes de couverture. Une myriade d'autres champignons sont également connus pour protéger les racines des agents pathogènes, ou des insectes (champignons entomopathogènes). Vukicevich (2016) et Liu (2021) ont constaté que la décomposition des résidus d'engrais verts modifiait le profil microbien du sol et pouvait réduire les dommages causés par des pathogènes causant la fonte des semis.

Bactéries et archées sont particulièrement importantes dans le cycle de l'azote, notamment pour la formation des nitrates, la forme la plus commune assimilée par les plantes. Les protistes sont un groupe microbien fourre-tout, extrêmement diversifié dont certains clades sont considérés comme partie de la microfaune. Plusieurs protistes joueront un rôle capital dans la boucle de rétroaction. (v. ci-dessous)

De nombreuses espèces de bactéries présentes surtout dans la rhizosphère, appartenant à une dizaine de genres, ont des effets positifs sur la qualité et le rendement des plantes, améliorant le développement racinaire, la disponibilité des éléments nutritifs, la protection contre les ennemis, la résistance au stress climatique. Certaines produisent des substances stimulantes pour la croissance des plantes comme des hormones et des enzymes. Plusieurs sont vendues comme biostimulants mais elles ne sont pas toujours faciles à inoculer; il est souvent plus efficace de gérer les sols pour les laisser proliférer naturellement.

Et hors des sols?

Les microbes et la microfaune sont actifs partout et participent à l'immunité naturelle. On en retrouve partout sur et dans les plantes : sur la surface des feuilles (phyllosphère), à proximité des racines (rhizosphère) mais aussi des endophytes à l'intérieur de tous les organes des plantes. Un microbiome équilibré est un facteur de résistance naturelle et de santé des plantes. Les humains et les animaux consomment tous ces microbes qui participent à l'équilibre de leur propre microbiote. On s'intéresse même aujourd'hui aux liens entre les espèces communes au microbiote des sols, à celui des bovins et à celui des humains. (Banerjee, van der Heijden)

On retrouve sur une pomme 100 millions de bactéries qui appartiennent à plus d'une soixantaine de genres, et comportent des centaines d'espèces. On sait aussi que sur une pomme cultivée de façon biologique et conventionnelle, le profil moléculaire sera très différent. Wassermann et al (2019) Il faut favoriser cette biodiversité, et notamment éviter de la perturber en employant des pesticides de synthèse.

Faune des sols

Mesurant moins de 0,2 mm, la microfaune (petits nématodes et certains protistes comme les amibes) vit surtout dans les micropores riches en eau, avec les bactéries, les archées et une partie des champignons. La méso et la macrofaune, surtout dans les macropores bien aérés. Et il y a une faune épigée, en surface du sol.

Plusieurs espèces d'amibes se nourrissent de bactéries et de champignons. Les nématodes sont les animaux les plus abondants sur la terre. On peut en retrouver plusieurs millions par mètre carré; ils se déplacent dans l'eau du sol. Bien que les parasites rhizophages soient mieux connus, la grande majorité des dizaines de milliers d'espèces de nématodes sont utiles. Il faut viser à restreindre le développement des espèces nuisibles, pas celui de tous les nématodes.

Laissés à eux-mêmes, bactéries, archées et champignons monopoliseraient des ressources au détriment des plantes. Leur prédation par des nématodes, des protistes, des collemboles et acariens, en limite l'expansion. Ce phénomène extrêmement important pour les cultures est nommé la boucle de rétroaction (Clarholm, 1985); les déjections des prédateurs fournissent une part importante de l'azote et d'autres nutriments aux cultures ; Trap et al. 2015 ont démontré que la minéralisation d'azote a presque doublé en présence de bactérivores.

Peu étudiée, la mésofaune (0,2 mm à 2 ou 4 mm) vit soit dans l'eau pelliculaire ou dans les pores aérés du sol. Elle comprend gros nématodes, collemboles, acariens (mites), tardigrades, rotifères, protozoaires, diploures, symphiles, enchytréides. Toutes les fonctions écosystémiques sont représentées. Les régimes alimentaires vont des microbes aux petits animaux, de la litière à la matière organique des sols, des algues aux racines mortes; certains ont un régime alimentaire spécialisé et d'autres plus diversifié. Leur abondance et leur diversité est nécessaire pour les sols et les cultures. Dans une prairie en climat tempéré on peut trouver jusqu'à 260 millions de petits animaux au m² totalisant 1,5 t/ha. (Eglin et al. 2010)

La macrofaune est mieux connue. Elle comprend beaucoup d'arthropodes, articulés, dotés de pattes et d'un exosquelette : myriapodes (millipèdes), diplopodes (centipèdes), coléoptères, diptères, araignées, crustacées, fourmis. Aussi des mollusques. Et, très important en agriculture, diverses espèces de vers de terre. Plusieurs de ces organismes partagent leur vie entre le sol, par exemple pour se reproduire ou s'abriter, et la surface.

Facteur peu connu, qualifiés d'habitants à temps partiel (Wolters 2001), une part importante des pollinisateurs et auxiliaires des cultures vivent une partie de leur vie dans le sol, notamment pour s'y abriter l'hiver sous ce qu'on appelle les annexes du sol (Gobat et al. 2017), par exemple une pierre, une bûche ou un morceau de bois, un arbre mort, la litière forestière, des débris divers, des résidus de culture, des feuilles ou des copeaux de bois, des cadavres d'animaux morts, des déjections. Les vers de terre s'y réfugient aussi, et recherchent souvent les matériaux synthétiques : un paillis, un sac ou un seau de plastique, une balle ronde enrobée, un objet en métal, un pneu.

Sackett et al. 2010 ont démontré que l'augmentation de diversité de la faune des sols augmentait la productivité moyenne des parties aériennes des plantes de 35% dans un ensemble d'écosystèmes, sauf dans le cas des légumineuses moins dépendantes de la faune pour leur nutrition azotée.

La mégafaune comprend crapauds, couleuvres, rongeurs etc. Et aussi une faune épigée (de surface) qui vit et se reproduit au sol comme le pluvier Kildir.

Protéger la mégafaune épigée des prairies

Pour permettre à la mégafaune vivant au sol de s'échapper lors de la fauche des prairies et pâturages, on peut commencer à faucher au centre du champs en se dirigeant graduellement vers la périphérie. Ou dégager le tour du champ puis faucher du centre vers la périphérie. Ou faucher d'un côté vers l'autre côté de la parcelle, le côté où se termine la fauche étant connecté à une zone de refuge. On peut aussi réduire la vitesse du tracteur, relever la barre de coupe jusqu'à 15, même 20 cm de hauteur, installer une barre d'effarouchement à l'avant du tracteur. Certaines entreprises proposent un logiciel de traitement automatisé de la fauche qui tient compte de la protection de la faune.

Certains vont plus loin avec la détection de la faune au sol par un drone équipé d'une caméra thermique, la marche préalable avec des chiens et le marquage des nids, ou l'identification de la présence d'oiseaux par observation; on peut alors reporter la fauche après la période de reproduction.

Le paradoxe des vers de terre

De la vingtaine d'espèces de vers de terre identifiées au Québec, presque toutes sont classifiées parmi les espèces pérégrines. Ce sont des vers qui se sont répandus dans le monde lors de la colonisation. Nous avons à peu près les mêmes espèces, adaptées à l'agriculture, qu'on retrouve en Europe du Nord. Avant l'arrivée des européens, il n'y avait pas de vers de terre au Québec. Suite à la glaciation du Wisconsin qui a pris fin il y a environ 10 000 ans, nos écosystèmes ont évolué sans vers de terre. Comme ces animaux ne se déplacent que de quelques mètres par année et qu'ils n'avaient pas réussi à remonter des zones exemptes de glaciers aux États-Unis, les écologistes forestiers considèrent que les vers de terre perturbent les écosystèmes québécois notamment en accélérant la décomposition de la litière de surface du sol et en transformant la communauté des espèces vivant en forêt. Le paradoxe vient donc du fait que les vers sont considérés essentiels en agriculture, où l'écosystème original est complètement remplacé par un agroécosystème, et considérés dommageables en milieu forestier, malgré que les forêts soient fortement perturbées par l'exploitation. (Certains critiques de la présence des vers en milieu forestier prônent le chaulage des érablières, une bonne façon d'y attirer des vers de terre.)

Cependant, lorsqu'on fait de l'agriculture, ces animaux sont des alliés essentiels et s'ils sont absents ou peu développés il est bon de prendre des mesures pour favoriser une communauté diverse et équilibrée comportant quelques espèces de catégories écologiques complémentaires. Ces pratiques peuvent aller jusqu'à l'inoculation. La plupart des pratiques culturelles ci-dessous leur sont favorables.

Dans les milieux où ils sont présents, ils atteignent couramment 1t/ha (parfois 2 à 5 t), ce qui représente probablement 70 % ou plus de la biomasse animale, humains compris (Bouché 2014). 4 à 10% du sol sont consommés par les vers chaque année ce qui peut représenter 100 à 300 t/ha. (Bouché 2014; Shipitalo & Le Bayon 2004)

Quel avenir pour la biologie des sols?

Wagg et al. 2014 démontrent « que la perte de biodiversité du sol et la simplification de la composition des communautés du sol altèrent de multiples fonctions de l'écosystème, notamment la diversité végétale, la décomposition, la rétention des nutriments et le cycle des nutriments (...) ce qui menace la multifonctionnalité et la durabilité de l'écosystème (...) et que la biodiversité souterraine est une ressource essentielle au maintien du fonctionnement des écosystèmes. »

L'agriculture de l'avenir sera biologique ou elle ne sera pas. Il y a consensus chez les chercheurs qu'il faut développer de nouveaux raisonnements en agriculture, basés sur le fait que depuis des millions d'années les plantes évoluent en interagissant avec la biodiversité des sols. Nos méthodes de nutrition soluble et d'usage massif de biocides perturbent les fonctions naturelles et nuisent aux cultures. Malgré qu'on soit encore peu avancés, il y a un essor spectaculaire de la recherche dans ce domaine et il est de plus en plus clair qu'il faut développer une nouvelle agriculture basée sur les phénomènes naturels de la vie. Est-ce que la défense des intérêts commerciaux aura le dessus sur cette approche émergente? L'avenir le dira.

Des chiffres sur la biodiversité des sols

Taxons			Diversité
Bactéries			Centaines de milliers connues, mais encore des millions d'espèces inconnues
Archées			Environ 20 000 espèces, encore peu étudiées
Champignons			Environ 100 000 connus, mais entre 0,8 et 3,8 millions au total *
Protistes			On estime à plusieurs millions d'espèces **
Nématodes			Environ 30 000 espèces actuellement décrites, mais elles sont potentiellement 1 million
Tardigrades			Plus de 1000 espèces connues
Rotifères			Plus de 2000 espèces
Annélides	Oligochètes	Vers de terre	Environ 6000 espèces décrites et 1000 à venir (21 espèces au Québec)
		Enchytréides	Environ 700 espèces
Arthropodes	Arachnides	Acariens	Environ 40 000 espèces connues
		Araignées	Environ 40 000 espèces
	Collemboles		Environ 8500 espèces connues
	Protoures		Environ espèces connues
	Diploures		Environ 1000 espèces
	Myriapodes		Environ 16 000 espèces connues
	Insectes	Coléoptères	Environ 370 000 espèces connues
		Fourmis	Environ 15 000 espèces connues et au moins 5000 à venir
	Crustacées	Isopodes	Environ 3500 espèces
Mollusques	Escargot		Environ 25 000 espèces
	Limaces		Environ 5000 espèces

Sources :

FAO, 2020

Orgiazzi, et al. 2016

*Blackwell, M. 2011 ; Hawksworth et al, 2017

** Geisen, S, et al, 2020

PRINCIPALES PRATIQUES CULTURALES

Engrais verts

Les plantes accueillent un microbiote ainsi qu'une faune diversifiée sur les parties aériennes et dans le sol à proximité des racines, dont les exsudats nourrissent la vie du sol; mais aussi des micro-organismes endophytes qui s'installent dans les tissus des plantes et contribuent divers services allant de la résistance aux ennemis et maladies, aux stress, jusqu'au renforcement du système immunitaire.

Associés aux diverses espèces de plantes, on retrouve certaines espèces microbiennes semblables, mais aussi des organismes différents. Diversifier les engrais verts et les cultures augmente ainsi la biodiversité.

Dans les systèmes de culture simples comme les grandes cultures, on observe une biodiversité réduite. Une des façons de favoriser la diversité dans le sol et en surface est d'implanter une diversité d'engrais verts dont les choix peuvent varier d'une section de la ferme et d'une année à l'autre. L'agriculteur a tendance à trouver l'engrais vert le plus facile à réussir, qui apportera le plus d'azote à la culture ultérieure et à se cantonner dans les pratiques les plus simples possibles. Cependant il est possible de semer des dizaines d'espèces, de plusieurs familles, comme engrais verts et couvre-sol. (Weill, La France, 2016)

Gentsch et al (2020) suggèrent même qu'on pourrait constituer des mélanges pour faire évoluer le microbiote des sols et favoriser certaines fonctions (nutrition, cycle du carbone, protection contre les ennemis) selon les cibles prioritaires de la ferme. En comparant un sol nu, une moutarde et des mélanges de 4 à 12 espèces, l'absorption de CO₂ de l'air et la biomasse microbienne de la rhizosphère augmentaient avec le nombre d'espèces présentes.

Prenons l'exemple des mycorhizes; on sait que plusieurs espèces différentes peuvent coloniser nos cultures avec des services variables rendus à la plante selon les espèces, de l'aide à la nutrition à l'approvisionnement en eau, à la résistance au stress et à l'antagonisme contre les pathogènes. On sait que les diverses espèces de mycorhizes ont aussi leur propre microbiote, facteur supplémentaire de biodiversité et de protection contre les pathogènes des sols. On a même observé un transfert de nutriments via des mycorhizes entre des plantes d'espèces différentes. Une diversité d'engrais verts peut permettre à une gamme plus large d'espèces de mycorhizes de se développer puis de s'associer aux cultures dans la rotation ce qui nous assure une résilience accrue lors de conditions changeantes durant la croissance de nos cultures.

Quand c'est possible, inclure des espèces florales dans les mélanges d'engrais verts ajoute de la nourriture pour les auxiliaires.



Phacélie intercalaire au vignoble L'orpailleur, photo D. La France

Deux exemples : Certains utilisent le sarrasin à cet effet bien qu'il y ait des possibilités de repousses, et de présence éventuelle de graines difficiles à cribler dans les grandes cultures. La phacélie (*Phacelia tanacetifolia*) augmente la présence de prédateurs polyphages (Klinger 1987) et peut être cultivée dans des mélanges d'engrais verts ou en semis pur dans des parcelles ou des lisières sur la ferme. Elle est fréquemment utilisée dans des vignobles (L'Orpailleur, photo D. La France, 2024, ci-dessous) et des vergers. En plus d'attirer une large gamme d'auxiliaires, elle est très mellifère (500-1200 kg miel/ha) et renforce les populations d'abeilles domestiques autant que celles des pollinisateurs indigènes. Elle peut être semée à diverses périodes de l'année.

Quand on instaure ces pratiques on voit des améliorations sur plusieurs années; et les effets bénéfiques sont cumulatifs.

Ceux qui préfèrent des semis d'une ou deux espèces seulement pourraient varier les choix d'espèces dans des parcelles différentes et à différents stades de la rotation.



Engrais verts floraux en culture maraîchère. Photos D. La France



Engrais verts floraux en culture maraîchère. Photos D. La France

Si on veut appliquer le principe de maximiser les plantes actives pour augmenter la vie des sols et la biodiversité, on doit viser à toujours associer un engrais vert dans chacune de nos cultures. On peut par exemple semer une légumineuse associée avec la céréale lors de l'implantation; dans la céréale d'automne, on utilise une plante qui sera peu compétitive comme un trèfle blanc nain. Pour ceux qui préfèrent semer un engrais vert dérobé après la céréale, on peut ajouter au printemps une plante comme le trèfle incarnat dans un blé d'automne; les résidus se retrouveront dans les pailles et l'azote contribue de la protéine à la biomasse vivante des sols. Pour augmenter la diversité il y aurait lieu de mettre au point l'utilisation d'une diversité d'espèces associées dans la céréale. Le projet TwinWin en Finlande nous ouvre des perspectives intéressantes (Domeignoz-Horta 2024).

Beaucoup d'agriculteurs laissent aller les champs après les récoltes; il est préférable d'implanter un engrais vert dérobé qui va nourrir la vie du sol durant sa croissance, puis couvrir le sol pour l'hiver. Il faut adapter le choix à la période d'implantation; pour une implantation plus tardive on choisit souvent des céréales de printemps.

Pour ceux qui font des implantations tardives de légumes, comme des crucifères d'automne, on peut semer l'année précédente jusqu'à la mi-septembre, en culture dérobée, une vesce velue qui repoussera au printemps avant la culture tardive. Détruire en 2^e partie de juin.



Champ de vesce velue, photo D. La France

Dans les cultures sarclées, en rangs espacés, comme le maïs, le soya il est de plus en plus courant de semer des engrais verts intercalaires. De récents essais du CEROM et du CETAB+ ont démontré des résultats positifs dans le soya et le blé qui a suivi (Bipfubusa 2024).

On pense souvent que ça ne vaut pas la peine de semer un engrais vert pour une courte période de croissance, par exemple tard en saison, parce que la biomasse produite ne sera pas élevée. Au contraire il y a toujours un impact, notamment sur le microbiome, la stimulation de la vie microbienne et faunique des sols. Les travaux de Martin Chantigny ont démontré que l'activité biologique se poursuit en hiver. Parfois une

culture suivant un retour d'engrais vert à la biomasse modérée est plus belle que sur une biomasse très abondante.

On sait aussi que les effets des engrais verts sont cumulatifs : plus on en cultive, plus leurs impacts augmentent. Donc, pour améliorer les sols il faut intensifier au maximum les engrais verts : par exemple semer un engrais vert associé au printemps dans une céréale d'automne et, s'il arrive au bout de son cycle, en semer de nouveau immédiatement après la récolte. Le principe que tous les chercheurs recommandent est de tendre le plus possible à toujours avoir des plantes en croissance et des racines vivantes actives dans les sols. La diversité d'espèces d'engrais verts favorisera la biodiversité globale, dans le sol et en surface.

Des méthodes de lutte aux ennemis des cultures utilisant des engrais verts sont utilisées et en développement. Le n est connu pour ses effets allélopathiques sur les mauvaises herbes, notamment les graminées. Libérées par les racines en croissance ou les résidus en décomposition, les substances allélopathiques inhibent des plantes ou d'autres ennemis des cultures. Des travaux de sélection d'un cultivar de seigle ultra précoce pour roulage sont en cours au CETAB+. (La France, Comeau, 2016)

En Europe, on réussit à contrôler le nématode de la betterave à sucre (*Heterodera schachtii*) en cultivant un engrais vert de radis fourrager ou de moutarde blanche en précédent de la betterave. L'avoine rude inhibe *Pratylenchus*

penetrans, un nématode phytoparasite; de même pour la crotalaire qui inhiberait plusieurs espèces de nématodes (Ranadass, 2012). On a réussi à réprimer *Meloidogyne hapla*, un nématode rhyzophage avec



Tournesol-vesce commune à la Ferme Croque-Saisons, photo D. La France

un engrais vert d'herbe du Soudan (Widmer, 2000). Des travaux récents en Scandinavie ont démontré que cultiver une diversité de plantes vivaces associées dans une orge améliore l'accumulation de carbone dans le sol et la protection de la céréale contre certaines maladies (Domeignoz-Horta 2024, Capelli 2024).

La présence d'isothiocyanates dans certaines crucifères a mené à l'émergence de la méthode de biofumigation. On cultive un engrais vert de moutarde asiatique (*Brassica juncea* cv. Caliente 199) qu'on broie et enfouit rapidement en pleine floraison afin qu'elle libère des substances biocides (glucosinolates) qui peuvent affecter plusieurs pathogènes fongiques et des nématodes, et inhiber des mauvaises herbes. Les effets sur la biodiversité utile ne sont pas déterminés. Des travaux sont en cours au CETAB+ pour valider l'utilité de la méthode au Québec (Bergeron, 2024).

Les engrais verts ont une fonction importante qui est de couvrir les sols pour les protéger contre les éléments et réduire l'érosion. À cet effet, on ne les enfouit pas avant l'hiver. En culture régénérative ou conventionnelle, on les détruit souvent au moyen d'un herbicide. En culture biologique, on choisira une espèce gélive qui ne survit pas à l'hiver ou on détruira les plantes au printemps en préparant les sols mécaniquement. On peut aussi les détruire partiellement avant l'hiver en laissant assez de résidus pour protéger le sol contre l'érosion.

Cultiver du foin en rotation avec des grandes cultures, surtout en mélanges multi-espèces, améliore fortement les sols et leur biodiversité; une bonne pratique consiste à laisser la dernière coupe en engrais vert. En culture légumière biologique plusieurs agriculteurs laissent plus d'une coupe en engrais verts, parfois même sur 2 ou 3 ans. (La France, Maynard, 2006) On observe une augmentation de la fertilité et de la vie des sols, notamment des vers de terre (La France, 2010). Parfois une récolte est déplacée pour fertiliser une autre parcelle ou une serre.

Engrais verts déplacés

Des travaux ont été effectués depuis plus de 20 ans en culture biologique, d'abord en Hollande (van der Burgt, 2024) où la surcharge de fumier mène à une surfertilisation des sols, pour développer des méthodes de fertilisation végétale au moyen d'engrais verts déplacés de légumineuses riches en azote, surtout des vivaces. Souvent on combine cet apport à l'enfouissement d'un engrais vert. Laborieuses, ces méthodes sont surtout utiles en cultures légumières sur des surfaces plus modérées. Des travaux concluants ont été effectués au CETAB+(Giard-Laliberté 2022), qui étudie en ce moment l'utilisation de luzerne comme fertilisant en remplacement du fumier de volaille séché et cubé. Comme tous les engrais organiques, la présence de carbone fournit de l'énergie pour nourrir la vie du sol.

Travail de sol

Le travail du sol est apparu dès les débuts de l'agriculture il y a environ 10 000 ans. D'abord effectué avec une houe manuelle, un bâton fousseur ou d'autres outils manuels, avec les débuts de la traction animale il y a 8000 ou 6000 ans, on a vu apparaître l'*araire*, utilisé encore aujourd'hui. Cet appareil scarifie le sol peu profondément, de façon symétrique, en déplaçant du sol sur les deux côtés. En conditions chaudes et sèches il détruit efficacement la végétation dans des sols pas excessivement durs, de même que dans une rizière, souvent en passages croisés. Plusieurs appareils modernes ont des pièces qui font un travail analogue.

La charrue est munie d'un versoir qui inverse le sol, ce qui est efficace, notamment en climat tempéré, pour détruire une végétation de vivaces, enfouir des résidus et du fumier, ameublir la couche superficielle du sol et préparer un lit de semences; elle pénètre mieux que l'araire dans un sol lourd. D'abord apparue en Chine elle s'est répandue en Europe à la fin de l'Empire romain et a évolué jusqu'à devenir l'outil capable de labours profonds tel qu'on en voit aujourd'hui. Avec l'époque coloniale, elle a migré partout dans le

monde. Le labour a été remis en cause après le « Dust Bowl » des années 1930 aux États-Unis et on a vu émerger de nouvelles façons de travailler le sol sans l'inverser, d'abord par l'invention du chisel, puis de divers appareils modernes, de même que des techniques de non-travail, habituellement avec des herbicides.

Bien que certaines catégories d'être vivants apprécient l'apport important en oxygène d'un sol travaillé, on considère que le labour systématique a un effet perturbateur pour la vie des sols, par exemple les hyphes de mycorhizes ou les grands lombrics qui vivent dans des galeries permanentes et s'alimentent et se reproduisent en surface. La faune plus petite (Kladivko, 2001) et les vers de terre endogés qui n'ont pas de galeries permanentes sont mieux adaptés aux sols travaillés. L'ameublissement important obtenu disparaît habituellement après un certain temps. De nombreux chercheurs et spécialistes appellent à réduire le travail de sol et même à l'éliminer quand c'est possible. Cependant ces changements réduisent souvent la macroporosité du sol et les avantages écologiques peuvent prendre plusieurs années à se manifester. Les grands lombrics sont favorisés ainsi que les limaces et les escargots. Comme ces méthodes impliquent presque toujours l'utilisation d'herbicides, elles sont peu utilisées en agriculture biologique. Plusieurs agriculteurs ont intégré des pratiques de travail réduit sans herbicides, mais sans ces derniers, le non-travail n'est souvent pas au point et mène à des problèmes de mauvaises herbes. Utiliser de telles méthodes en climat frais rajoute aussi des contraintes supplémentaires car en situation nordique, travailler le sol le réchauffe, ce qui a souvent des effets positifs sur l'activité biologique et le rendement.

Un développement détaillé dépasse le cadre de la présente brochure mais retenons les principes suivants :

- Un labour aux 3-4 ans est beaucoup moins perturbateur qu'un labour annuel;
- Les outils qui n'inversent pas le sol sont à privilégier autant que possible;
- On vise à obtenir un profil correct pour le fonctionnement du sol et le développement des cultures, sans zones compactes; le travail doit toujours être accompagné de vérifications qui confirment que les conditions sont propices;
- Les pratiques qui laissent des résidus en surface ont des avantages pour la faune épiquée, la protection contre l'érosion, la rétention de l'humidité, mais le maintien d'un sol frais ralentit souvent la décomposition et la minéralisation des matières organiques;
- Pulvériser la structure du sol est nocif pour l'activité biologique du sol; on doit réduire les passages et éviter les outils très agressifs;
- Sous-soler les sols compacts peut être utile dans certains cas et peut être effectué dans des engrais verts ou du foin en croissance (Weill, La France, 2015);
- Dès que possible implanter une plante après un travail de sol pour le garder couvert et colonisé par des racines;
- Le climat humide du Québec complique l'accès au champ; la prudence dans les décisions de circulation réduit la compaction, et souvent, les besoins de travail de sol;

Des systèmes innovateurs, comme par exemple la culture sur billons, l'alternance travail-minimum/soya sur seigle roulé, le soya sur seigle roulé intercalaire, le travail en bandes dans des couvre-sols, l'agriculture à circulation contrôlée, les planches permanentes mécanisées en culture légumière (La France et al., 2012, Leblanc 2015), (voir photo) sont favorables à la biodiversité mais ne sont pas très répandus.

Dans la majorité des profils de sols travaillés, on observe un sol meuble dans les premiers centimètres et un sol plus dense, même compacté en dessous, avec réduction de la pénétration racinaire et de la circulation de l'eau. Certains se résignent en disant que ce problème est incontournable. Si on arrivait à obtenir une meilleure structure on aurait de meilleurs rendements et des conditions plus propices à la biodiversité. Il faut travailler à instaurer une meilleure verticalité dans nos sols.



Sol travaillé en planches permanentes, Photo D. La France

La culture de plantes pérennes comme le foin permet d'éliminer le travail pendant une période de la rotation. Les fermes combinant grande culture et fourrages auront plus de facilité à développer un sol vivant, plus riche en matière organique et en diversité, notamment en faune tellurique. Mais un travail important est nécessaire lors du retour en culture si on veut éviter les herbicides.

Drainage

Améliorer le drainage est essentiel dans la majorité des sols du Québec. Sinon l'accès au champ se trouve souvent restreint avec le climat humide. Si on y circule sur des sols trop humides, la compaction causera une série de problèmes, nuisant à l'enracinement et aux fonctions effectuées par la diversité des organismes vivants des sols.

Rotations

La généralisation des grandes cultures a mené à une forte diminution des rotations dans le Sud du Québec. Les superficies de fourrages vivaces, légumineuses et graminées, ont beaucoup régressé. Maïs et soya dominent et leur superficie dans l'assolement fluctue selon les prix du marché, pas selon un système de rotation. Il est clair que c'est une cause majeure de la diminution de la biodiversité. Dans les régions plus fraîches, le soya a été adapté graduellement, et plus récemment on commence à faire du maïs en plasticulture; le déchet de plastique est tout simplement abandonné à se dégrader au champ.

Quand on compare la situation des grandes cultures dans diverses régions du monde, on remarque souvent une tendance à la monoculture ou à des systèmes très simples. Douze céréales sont cultivées dans le monde, les 3 qui dominent étant le maïs, le riz et le blé. (90 % des calories consommées proviennent de 30 espèces de plantes.) Environ 30 % des terres agricoles sont cultivables, le reste étant en herbages et pâturages ou en cultures ligneuses (Altieri, 2004). À cause de l'aménagement des rizières inondables, le riz est souvent cultivé en monocultures. Fréquemment en monocultures aussi : le blé, le maïs, le coton, le soya.

En grande culture biologique on trouve habituellement une rotation plus systématique et plus diversifiée. (La France 1995) Le choix classique est maïs-soya-céréale (avec engrais vert associé ou dérobé.) Depuis peu les céréales d'automne, seigle et blé, sont plus cultivées, ce qui est avantageux parce que, au-delà du risque

hivernal, elles sont plus faciles à réussir, notamment pour la lutte aux mauvaises herbes, et développent de meilleurs systèmes racinaires, laissant plus de matière organique pour nourrir la vie du sol. Et elles protègent le sol durant l'hiver. Plusieurs les sèment à la volée juste avant la chute des feuilles de soya. Elles laissent une fenêtre de croissance post-récolte plus longue pour maximiser les engrais verts. Certains sèment du trèfle blanc nain en même temps que la céréale, ce qui augmente les effets positifs sur le sol.

Une stratégie pour améliorer la biodiversité temporelle est d'ajouter des nouvelles cultures et de rallonger la rotation. Parmi les choix actuels en grandes cultures on voit : tournesol, chanvre, pois fourrager pour semences d'engrais verts, diverses céréales secondaires, lin, haricot, luzerne, et sarrasin. Peuvent s'ajouter à cela les légumes de transformation : pois de conserve, carotte, brocolis, chou-fleur, haricots. On a déjà récolté des semences de trèfle au Québec. Certains développements seraient possibles avec du travail d'adaptation : féverole, canola d'hiver, lupins, chia, kernza.

Ajouter une séquence de foin dans la rotation est un des meilleurs choix pour rétablir la fertilité d'un sol et réduire la pression des mauvaises herbes. La non-perturbation du sol pendant quelques années permet à la faune de se reconstituer, dont les vers de terre.

Cependant Garland et al (2021) suggèrent que sur 10 ans, la présence quasi permanente de plantes vivantes, cultures, engrais verts et fourrages a plus d'impacts sur la diversité microbienne et ses fonctions dans le sol, ainsi que sur les rendements, que la diversification des espèces annuelles en rotation.

De la diversification des cultures découle une variation des périodes libres de cultures et des dates des travaux : implantation, entretien, récoltes, travaux des sols, engrais verts, ce qui est favorable à la biodiversité. Pour pouvoir effectuer des travaux un peu plus tôt en saison, certains agriculteurs choisissent un cultivar un peu plus précoce (Altieri, 1999).

Importance des racines

Les racines sont considérées comme les premiers ingénieurs des sols, créant le milieu de vie pour tous les autres êtres vivants, en collaboration avec les vers de terre, les fourmis et quelques autres organismes (Jones, 1994).

La majorité du renouvellement de la matière organique des sols provient des racines, pas des résidus aériens, ni des fumiers, ni des apports extérieurs à la ferme. Les résidus de surface seraient 5 ou 6 fois moins efficaces à produire de la matière organique stable dans le sol que les biomasses racinaires (Rasse et al., 2005 ; Avera et al., 2020 ; Sokol et al., 2019a ; Bird et Torn, 2006 ; Fulton-Smith et Cotrufo, 2019).

Pour augmenter la biodiversité dans le sol il faut lui offrir un habitat qui convient et l'approvisionner en nourriture. Depuis quelques décennies, la recherche sur la matière organique du sol, les racines et la rhizodéposition a révolutionné notre compréhension des sols.

Facteur négligé, avec un impact majeur sur la biodiversité, en cours de croissance une fraction importante de la photosynthèse est injectée par les racines dans la rhizosphère, et est utilisée par des microbes utiles aux cultures, puis éventuellement par la faune du sol. Cette zone de proximité des racines est la plus riche en diversité microbienne dans le sol. Dans un gramme de sol de la rhizosphère on peut trouver de quelques milliers jusqu'à un million d'espèces, surtout de bactéries. Jusqu'à un milliard d'individus, parfois plus (Lakshmanan et al, 2017). Les bactéries sont mangées par des prédateurs, surtout protistes et nématodes, mais aussi les vers de terre qui en absorbent avec les 300 tonnes/ha de terre et de MO consommées chaque année. Les microbes mangent aussi d'autres microbes ce qui fait qu'une matière d'origine végétale sera éventuellement transformée à répétition par la chaîne trophique du sol. À chaque étape il y a un déchet, cadavre et excrément, qui devient en partie une MO stable dans les sols.

À la différence des mycorhizes actives dans la rhizosphère, les champignons saprotrophes décomposent surtout des matières organiques de poids moléculaire plus élevé (lignine, cellulose) que celles exsudées dans la rhizosphère.

Deuxième constatation qui révolutionne notre compréhension de la matière organique des sols, les chercheurs considèrent que souvent 50 % des matières organiques stables du sol sont constituées de nécromasse microbienne (cadavres). Les premières sources de nourriture des microbes sont la rhizodéposition et les résidus de racines mortes. Les résidus des parties aériennes, les fumiers et les amendements organiques complètent leur alimentation. Toutes ces MO sont produites par des plantes via la photosynthèse. Pour maximiser le développement microbien on va d'abord maximiser les apports de matières organiques, le plus diversifiée possible, ajoutées au sol en provenance de la photosynthèse.

La première stratégie à la ferme qui permet d'augmenter la production de MO du sol, en sus des apports usuels d'amendements et de résidus, est la présence presque constante de racines vivantes; on va choisir des espèces et des cultivars dotés de puissants systèmes racinaires et, pour avoir encore plus de racines, ajouter des plantes en complément de la culture principale sans faire de concurrence à celle-ci, soit en association ou en intercalaire. Et viser à toujours avoir des racines présentes dans le sol.

On doit donc maximiser la culture de plantes à enracinement profond, en particulier les engrais verts, et les fourrages vivaces qui laissent le plus de matière organique racinaire. La matière organique localisée en profondeur contribue à l'approfondissement des sols, à l'augmentation de leur épaisseur, à l'accroissement de l'activité biologique par une meilleure nutrition et à une zone fertile et vivante plus grande ce qui résulte en un meilleur enracinement des cultures subséquentes.

Et plus les racines sont profondes, plus la MO qu'elles laissent sera durable. La façon la plus simple de séquestrer du carbone est de le placer dans des zones profondes avec moins d'oxygène.



Racines de dactyle et fétuque élevée, photo Denis La France

Amendements

Fumier

Dans les climats tempérés, avec la stabulation on accumule le fumier, ce qui offre une ressource pour nourrir la vie des sols et fertiliser les cultures. En grande culture on utilise souvent des fumiers à teneur concentrée en nutriments ou des lisiers à faible teneur en litière. La conséquence est une baisse des apports de matières organiques (MO) comparée aux fumiers solides moins riches, mieux pourvus en litière et appliqués à doses plus élevées. De plus, un lisier faible en litière perdra beaucoup plus d'azote à l'entreposage et à l'épandage. Lors de l'épandage il faut incorporer immédiatement les fumiers et lisiers non-compostés pour limiter les pertes d'azote ammoniacal qui sont très importantes tout juste après l'épandage. L'azote étant le premier constituant des protéines, ces pertes entraînent une baisse de la capacité des fumiers de soutenir la vie. Les animaux élevés sur litière accumulée comme les moutons, les chèvres, certains bovins et certains porcins donnent des fumiers plus riches en carbone, qui fournissent

plus d'énergie aux êtres vivants ce qui améliore l'activité biologique des sols. Les fumiers de ruminants plus riches en graines de mauvaises herbes sont parfois moins prisés malgré leur apport supérieur en MO. Dans la majorité des cas, le fumier avec son carbone aura plus d'effets pour nourrir la diversité des organismes des sols qu'un engrais de synthèse qui n'apporte pas de carbone.

Apporter le fumier avant le semis d'un engrais vert pour fertiliser la culture suivante est aussi une bonne façon d'augmenter la vie du sol.

Compost

Le compostage agricole a été développé par les pionniers de l'agriculture biologique Ehrenfried Pfeiffer et Sir Albert Howard il y a 100 ans. Il y a 40 ans la technique s'est généralisée dans la gestion des déchets organique. Selon les matériaux de départ, la technique utilisée, le respect des règles de base et la durée du processus, le produit obtenu peut être extrêmement variable avec des effets pas toujours prévisibles sur les sols et leur activité biologique, et sur les cultures. Il est très important d'utiliser des composts de grande qualité mais on retrouve de tout dans le commerce. L'auteur est d'avis qu'il est préférable d'éviter les composts à base de mousse de tourbe, un matériau très stable et peu nourrissant pour la vie des sols.

Le fumier et le lisier sont modérément pourvus en souches microbiennes des sols. Le compostage réduit la diversité microbienne dans sa phase thermophile mais, après quelques semaines, un compost est colonisé par un microbiote et une faune beaucoup plus diversifiée que ce qu'on retrouve dans le fumier. Les travaux du pionnier Hoitink ont démontré de nombreux impacts positifs des composts sur la protection des cultures contre leur ennemis, notamment des organismes qui survivent dans le sol comme *Pythium ultimum*, *Fusarium oxysporum*. Apporter des composts riches en biodiversité à nos champs inocule de nouvelles espèces et renforce la résistance naturelle aux ennemis des cultures soit en appuyant l'immunité naturelle des plantes cultivées, soit en modifiant l'écosystème du sol de diverses façons mais avec le résultat global que les niches disponibles pour les ennemis se trouvent réduites et que les dommages diminuent. On parle de rendre les sols suppressifs aux ennemis des cultures. Par exemple, un agriculteur aux prises avec des pressions importantes de *Fusarium spp.*, *Pythium spp.*, et *Phytophthora spp.*, a fortement réduit les infestations en combinant trois composts différents de grande qualité (y compris des lombricomposts) à des doses de 15 m3/ha chacun. (La France, non-publié)

Noter que le compostage des fumiers y réduit la présence de graines de mauvaises herbes, ce qui est avantageux quand on veut éviter les herbicides.

Les méthodes de microbiologie moléculaire démontrent que les microbiotes des composts varient énormément d'un à l'autre. (Michel, 2020, ci-dessous) Appliquer des composts de sources variées sera avantageux pour la diversité.

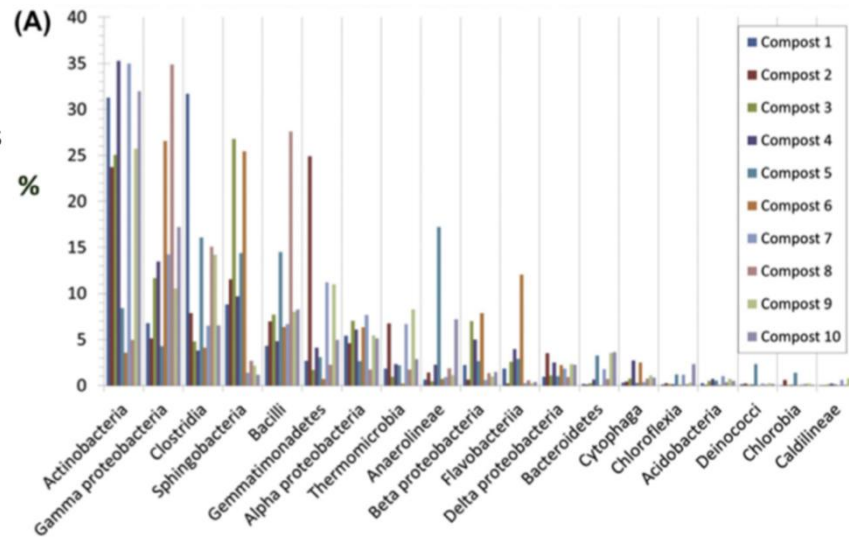
Les vermicomposts bien faits, malgré qu'ils soient très coûteux à l'achat, ont démontré des impacts sanitaires appréciables sur les sols et les cultures.

Il faut éviter l'erreur de pratiquer un compostage trop long. Un compost jeune de 2 ou 3 mois ne sera que partiellement décomposé et la décomposition et la minéralisation dans le sol auront un impact salubre sur les êtres vivants des sols et les cultures. Les composts très murs ont une valeur comme inoculant microbien mais leur carbone a majoritairement été consommé par les décomposeurs qui s'en nourrissent en cours de compostage et leur potentiel de nourrir la vie des sols s'en trouve réduit.

Il faut être prudent avec le compost car le non-respect des règles de base du compostage peut entraîner des problèmes sérieux qui peuvent nuire aux sols et aux cultures. Éviter les composts à base de mousse de tourbe, un substrat résistant à la décomposition, donc peu nutritif pour les êtres vivants des sols, et produisant une matière organique de faible qualité dans le sol.

Certains agriculteurs pulvérisent sur les sols ou les cultures des extraits liquides de compost (communément appelés « thé de compost »). Il est reconnu que les apports de compost sont une façon plus certaine d'introduire de la biodiversité dans le sol car la réussite de la colonisation est plus imprévisible avec des extraits liquides. Voir Michel ci-dessous (in Rynk 2022)

Bactéries
de 10 composts



On

peut se référer aux cours de l'auteur et au chapitre 5- Le compostage à la ferme dans wikimaraicher.ca.



Compostage de fumier sur une ferme laitière, photo D. La Franc

Chaulage

Au Québec où le climat humide et frais lessive chaque année quelques centaines de kg de calcium/ha, il est nécessaire de chauler régulièrement dans presque toutes les situations, sinon l'état calcique a tendance à se dégrader. Apporter fréquemment des doses modérées de chaux est préférable à retarder les apports pour faire des correctifs plus importants. Dans ce dernier cas on observe des effets négatifs sur l'équilibre biologique des sols et leur biodiversité.

Comme le chaulage stimule l'activité biologique, qui consomme la matière organique du sol pour se nourrir, il faut bien gérer cette dernière pour assurer son renouvellement ou mieux son enrichissement. Sinon le chaulage peut accélérer la baisse de la matière organique.

Mais comme il accroît généralement les rendements, si les résidus sont bien gérés il peut avoir un effet positif sur la MOS.

Pâturage

Au Québec dans nos choix d'industrialisation de l'agriculture on a décidé de confiner les animaux toute leur vie à l'intérieur. Sauf dans de rares exceptions, ou en agriculture biologique où le pâturage est obligatoire. La présence d'animaux aux champs transforme la situation de la biodiversité. Le retour de certaines parties des plantes, de fumier et d'urine directement au sol soutient un microbiote et une faune très différents. Y compris dans le microbiote animal qui ne sera pas le même en confinement. Les animaux consomment des plantes en faisant des choix, y compris dans les bordures. Et comme pour le foin, une période de repos des sols en alternance avec les cultures est très favorable notamment à l'enrichissement en matière organique source d'énergie pour la vie des sols. Bien effectuée, la gestion des pâturages présente aussi des avantages économiques.

On peut augmenter encore davantage la biodiversité des pâturages en y introduisant des arbres. Ces systèmes sylvopastoraux sont rares au Québec mais la recherche en émergence, notamment aux États-Unis, a identifié plusieurs bénéfices écologiques de ces systèmes, tout en augmentant la productivité des animaux en les protégeant de la chaleur (Poudel, Pent & Fike, 2024). La recherche débute au Québec pour étudier ces systèmes (Rivest, communication personnelle).

Autres intrants

Certains intrants seront utiles pour favoriser la biodiversité et l'équilibre écologique de la ferme. On a mentionné ci-haut l'importation d'agents de lutte biologique.

Il y a aussi un nouvel intérêt pour l'utilisation de fertilisants végétaux comme la luzerne, (Giard-Laliberté 2025) ou des tourteaux de soya ou de tournesols par exemple, des algues, de la farine de maïs, qui favoriseront probablement dans le sol des organismes différents que si on utilise des fumiers ou des engrais de synthèse. Certains viseront même à commercialiser les produits sur le marché végan favorable à l'absence d'animaux sur les fermes.

Biofertilisants, biostimulants, biopesticides

Les biofertilisants visent à améliorer les processus de nutrition végétale au moyen d'organismes vivants. Ils incluent des organismes symbiotiques ou non-symbiotiques capables de fixer de l'azote comme *Rhizobium* et *Azotobacter*; de solubiliser du phosphore comme diverses mycorhizes, des champignons comme *Aspergillus*, *Penicillium*, *Trichoderma* mais aussi certaines bactéries; de solubiliser du potassium, du zinc, etc.

Tout un domaine de recherche porte en ce moment sur les biostimulants. De nombreuses espèces de bactéries ont des effets protecteurs ou stimulants pour la croissance des plantes. On s'intéresse en particulier à un groupe nommé en anglais « Plant Growth Promoting Rhizobacteria », comprenant *Pseudomonas*, *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Bacillus*, *Klebsiella*, *Enterobacter*, *Xanthomonas*, et *Serratia*. Les Français utilisent le concept d'éliciteurs, à cause de leurs facultés à susciter une réaction positive chez les plants cultivés. Un réseau a testé 200 produits en France. Des produits non microbiens comme les extraits d'algues, les humates, des acides aminés, la chitosane sont inclus aussi. Plusieurs sont vendues comme biostimulants mais elles sont souvent plus faciles à inoculer en laboratoire que sur le terrain où les résultats sont souvent aléatoires; il est souvent plus efficace de gérer les sols pour les faire proliférer naturellement.

Les biopesticides sont utilisés de longue date pour éliminer des ennemis des cultures; par exemple le *Bacillus thuringiensis* découvert en 1901. Avec le retrait de plus en plus fréquent de produits de synthèse dont on découvre des effets délétères, les entreprises du secteur offrent de plus en plus de produits microbiens visant à rendre le sol suppressif aux ennemis des cultures, ou à renforcer les défenses naturelles des cultures en suscitant une réaction de défense des plantes. Un exemple parmi d'autres, un bionémicide à base de *Purpureocillium lilacinum*.

Alors que ces trois types de produits visent surtout à introduire un organisme pour améliorer une fonction donnée, il y a actuellement un débat chez les chercheurs : serait-il mieux de développer des produits comportant une gamme beaucoup plus large d'organismes, pour profiter de leur complémentarité fonctionnelle? On sait que dans le sol l'immense biodiversité est une garantie de la bonne marche des fonctions.

Les principales difficultés rencontrées pour implanter ces êtres vivants sont souvent les conditions météorologiques ou environnementales non-idéales lors de l'usage au champ.

Agroforesterie

Certains innovateurs explorent des pratiques d'agroforesterie au Québec. Altieri cite des modèles agroforestiers traditionnels en milieu tropical qui comportent bien au-delà d'une centaine d'espèces végétales vivaces ou annuelles cultivées dans un champ donné. Elles fournissent fourrages, aliments, bois pour la cuisson et matériaux de construction, plantes médicinales, etc. Les systèmes agroforestiers occidentaux mécanisés n'atteindront jamais ces niveaux de diversité mais ils offrent un potentiel d'habitat pour une grande diversité d'espèces dans les zones boisées; de nombreuses espèces s'y installent spontanément en plus de celles qui y sont implantées.

Le défi reste de développer des modèles adaptés aux climats et aux systèmes de culture du Québec.



Une mosaïque de petits champs entrecoupés de bandes boisées optimise la connectivité écologique

Taille des champs

Souvent les espèces auxiliaires utilisent différentes parties du paysage pour satisfaire divers besoins. La complémentarité des habitats semi-naturels et des champs cultivés gagnera en importance si leur mosaïque est plus variée. Avec l'expansion des dernières décennies en grande culture, le matériel a grossi, les fermes sont plus grandes et la tendance a été de détruire des bordures, des fossés et de créer des champs très grands. Un oiseau insectivore qui se déplace va d'un arbre à l'autre pour sa protection et effectue peu de longs vols en milieu dégagé; un prédateur ou un parasitoïde qui passe une partie de sa vie dans les zones protectrices des bordures doit avoir accès à des proies dans l'ensemble du champ. Lorsque les champs sont trop grands ils atteignent difficilement les zones plus éloignées des bordures. Il est difficile de généraliser et de donner une dimension précise car ça varie selon les espèces. Pour les agriculteurs qui veulent mettre en place une approche agroécologique, il est bon de se questionner sur la dimension des champs cultivés. Un aménagement agroforestier intra-parcellaire avec ses bandes boisées présente de nombreux avantages à cet effet. Des parcelles longues et pas trop larges peuvent offrir une solution pour concilier mécanisation et accès des auxiliaires.

Chaintres, bandes tampon, fossés, chemins agricoles

Quatre façons assez simples d'aménager pour favoriser la biodiversité sont particulièrement intéressantes en culture biologique.

Les bandes tampon de 8m qui doivent assurer une distance entre les cultures certifiées biologiques et les champs voisins traités peuvent être aménagées pour favoriser l'équilibre écologique de la ferme. Souvent ces zones sont implantées en cultures non-certifiables qui ajoutent du travail non-productif et peu rentable.

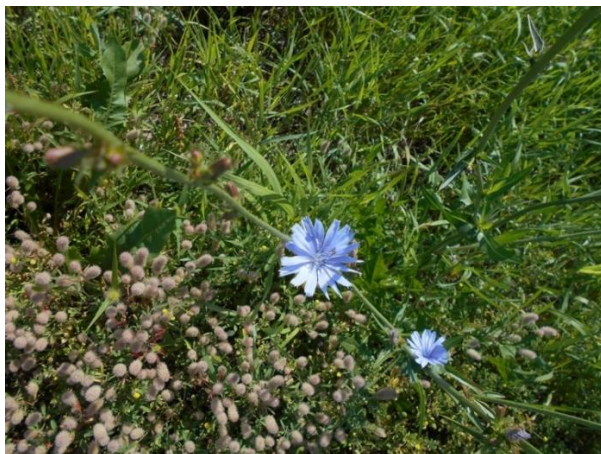
De même les chaintres, les zones de bout de champ où la machinerie vire (appelées aussi tournières), sont souvent utilisées plusieurs fois lors de la préparation des sols, des sarclages, des traitements, des récoltes. Souvent elles sont peu productives et compactées. On peut dans les chaintres et les bandes-tampon implanter des aménagements agroécologiques favorables à la faune ou permettant à des auxiliaires ou des espèces des sols comme les vers de terre ou les carabes de recoloniser les champs voisins. Le CETAB+ propose un mélange préparé par RDR Grains et Semences : une prairie florifère semée à 15 ou 20 kg/ha : 20 % Trèfle blanc 'Huia', 10 % lotier corniculé, 15 % luzerne, 10 % mélilot, 20 % fétuque élevée, 10 % dactyle, 10 % festulolium, 5 % chicorée fourragère. On peut y semer juste avant l'hiver un peu de fleurs indigènes, au taux de 20 g/ha chacune : *Epilobium angustifolium*, *Aster novae-angliae*, *Rudbeckia hirta*, *Agastache foeniculum*, *Monarda fistulosa*, *Heliopsis helianthoides*. Les fermes de fruits et légumes où on circule beaucoup autour des champs peuvent utiliser un tel mélange. Il offre aussi une certaine protection contre l'érosion hydrique.

Les fossés et les bords de chemins sont des zones négligées qui offrent un immense potentiel de diversification, particulièrement pour des vivaces. Le plus simple est d'y tolérer les espèces qui nous rendent service, notamment en les laissant fleurir le plus longtemps possible. Par contre il peut être nécessaire de faucher certaines espèces potentiellement envahissantes comme le laiteron ou le rumex.

On peut aussi sursemencer du trèfle blanc nain et du lotier dans les chemins de ferme. Vous y verrez des abeilles et divers insectes.

Fleurs sauvages dans des fossés : dans l'ordre : Achillée mille-feuilles, tanaisie, chicorée et trèfle pied-de-lièvre, verge d'or, sureau et plantes diverses :





Doit-on tolérer des mauvaises herbes?

Altieri, le pionnier de l'agroécologie, a documenté (2004) une série d'avantages à la présence d'un niveau acceptable de mauvaises herbes dans les cultures. En particulier parce que nombre d'entre elles attirent des ennemis des cultures, les éloignant de celles-ci, et soutenant la colonisation d'auxiliaires, parasites et prédateurs. Tout en reconnaissant leurs effets nuisibles pour les cultures, il propose la gestion des mauvaises herbes plutôt que leur contrôle et surtout leur destruction massive au moyen d'herbicides. Notamment, il suggère de caractériser la période où elles doivent être absentes pour ne pas affecter les rendements, et les périodes où elles peuvent être tolérées pour leurs effets bénéfiques. Par exemple il a démontré que la moutarde des oiseaux attirait les altises des crucifères (*Phyllotreta cruciferae*) au point de réduire fortement leurs dommages sur du collard; ou de la moutarde sauvage semée après la transplantation de brocolis qui réduisait les dommages de pucerons sur la culture en les attirant. Cependant ce genre de solution est spécifique à chaque site et il faut apprendre à gérer de telles méthodes sans bâtir la banque de graines qui pourrait hypothéquer les cultures à venir. Généralement on va broyer les plantes avant la maturité des graines.

On sait aussi que le maintien du sol nu par l'application d'herbicides peut favoriser l'érosion, la dégradation de la structure du sol tout en réduisant la production de nouvelles matières organiques, avec des effets délétères sur la biodiversité.

Exemples de gestion active

En Californie on implante des bandes de luzerne dans les champs de fraises et on passe un aspirateur qui détruit les punaises ternes concentrées autour de la luzerne; l'efficacité est supérieure aux traitements insecticides. Cependant une telle technique n'a pas réussi au Québec car nous n'avons pas la même espèce de punaise terne et les champs de fraises sont plus petits, ce qui permet à la punaise terne de s'abriter dans les bordures pour recoloniser les champs.

En serre on hiverne des plantes-hôte qui maintiennent des populations d'insectes, ce qui permet aux auxiliaires de se maintenir et d'être prêts à se reproduire s'il y a prolifération d'ennemis.

On utilise des plantes piège pour y déplacer des ennemis qui les préfèrent à la culture principale. Par exemple la courge Blue Hubbard très aimée des chrysomèles rayées du concombre.

GESTION ACTIVE DES VERS DE TERRE – LA BIOINGENIERIE ARTISANALE !

22 espèces de vers de terre ont été identifiées à date au Québec. Environ une quinzaine sont plus actifs dans les agroécosystèmes et, fait peu connu, ce sont exactement les mêmes qu'au Royaume-Uni. L'auteur a réussi à démontrer qu'il est possible d'atteindre un niveau de diversité élevé d'espèces sur un site donné. Reynolds, La France, 2022

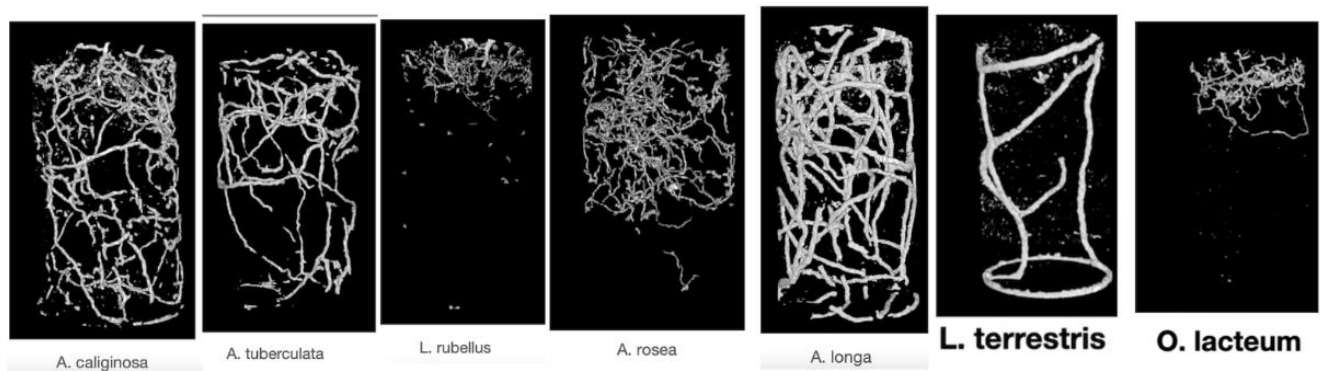
La question de l'utilité d'une diversité minimale dans un agroécosystème se pose, bien qu'elle ait suscité peu d'intérêt chez nous. L'auteur avance qu'elle est absolument fondamentale. Pourquoi? Les espèces ont des comportements différents, notamment dans leurs habitudes de bioturbation (zones de fouissage, de dépôt des déjections, types et diamètre de galeries, création d'agrégats, préférences alimentaires, quantité proportionnelle de terre ingérée, microbiote intestinal, impacts sur le mouvement de l'eau, etc.)

Malgré l'affirmation de Charles Darwin « On peut se demander s'il existe d'autres animaux qui ont joué un rôle aussi important dans l'histoire du monde que ces créatures humblement organisées. », la recherche sur les vers de terre est un parent pauvre chez nous. Heureusement on peut profiter des travaux effectués dans des contrées où on juge ces animaux importants. Par exemple les travaux d'Yvan Capowiez et de ses collaborateurs, qui étudient le travail de bioturbation de diverses espèces dans des mésocosmes avec l'aide d'images par tomographie. Quand on regarde les images on comprend que dans un champ cultivé ça prend le travail combiné d'un minimum d'espèces si on veut profiter pleinement de tous les services que nous rendent les vers de terre sur une ferme.

Ça prend donc au moins l'un des deux anéciques (action entre la surface et la profondeur) *Lumbricus terrestris* ou *Aporrectodea longa*; une ou deux espèces d'endogés (comme *Ap. tuberculata* ou *Ap. turgida*, les plus abondants sur les fermes) qui vivent dans le sol de surface, fouissent peu en profondeur, mangent beaucoup de terre et répartissent leurs déjections entre la surface et le sol derrière eux, des agents majeurs de création d'agrégats stables. Plus rares en agriculture, la présence d'un épigé qui vit dans la litière est un atout; souvent on verra *Lumbricus rubellus*, un épi-endogé qui circule entre la surface et le sol cultivé et qu'on retrouve fréquemment sur les fermes.

Voici une image de 7 espèces présentes sur une ferme en Mauricie qui illustre bien leur comportement complémentaire potentiel. Images issues des publications d'Yvan Capowiez.

Bioturbation : Travail complémentaire potentiel de 7 espèces de vers sur une ferme en Mauricie (Y. Capowiez)



Si on veut pouvoir gérer les espèces présentes sur notre ferme il faut d'abord les identifier. C'est une dépense qu'il faut considérer comme un investissement car elle nous permettra d'améliorer notre sol de façon récurrente. Pour ce faire il faut effectuer des collectes dans les différents champs, un peu comme une analyse de sol. Ce n'est pas facile car les vers vivent en îlots, ne se déplacent que de quelques mètres par année.

Voici la procédure : On prélève de 100 à 200 vers à divers endroits pour identifier les espèces présentes et on les fait identifier par : Dr. John W. Reynolds, 1250 Weber Street East, Unit 9, Kitchener, ON. N2A 4E1

1. Faites l'envoi en début de semaine qu'ils ne trainent pas longtemps. Conservez au frigo jusqu'à l'envoi.

2. Envoyez les vers par Xpresspost (moins de 15 mm d'épais) ou par courrier, (dans un peu de terre ou de mousse de tourbe légèrement humide, dans un contenant ou un sac plastique bien fermé). Attention, dans un sol trop mouillé ou très argileux les vers sont endommagés au transport.

3. Obtenez le numéro de suivi et communiquez-le par courriel à John.w.Reynolds1941@gmail.com

4. Identifiez la localité, la date, l'habitat de provenance et la personne qui a fait la collecte. Vous pouvez écrire en français ou en anglais.

5. Vous serez facturé 25 \$ par espèce identifiée, sans taxe. Le rapport donnera le nombre de chaque espèce et leur maturité. Il est rare de trouver plus de 5 espèces.

6. Prière de payer sur réception du rapport. Ne pas faire trainer la facture svp.

Pour faciliter la collecte, le meilleur temps est quand les vers sont plus actifs près de la surface, lors de fortes pluies ou juste après. On les trouve alors plus facilement. On cherche d'abord sous les accumulations de débris organiques, sous les objets en surface du sol, appelés annexes, les sacs de plasticulture, les paillis, les balles rondes enrobées, les plastiques et objets qui traînent. Puis on creuse quelques trous à 20 cm de profondeur ici et là dans le sol de surface. Dans un grand champ on prélève dans diverses sections; dans un jardin, choisir les zones plus meubles près des cultures. Les grands lombrics sont en surface à la noirceur et difficiles à trouver à la lumière.



Dans l'ordre : une collecte de vers (photo S. Fortin), examen d'un échantillon par John Reynolds et La France (photo J. Masse), deux échantillons avant l'envoi (photos La France)

Comment améliorer l'impact des vers sur vos sols? Pour augmenter l'abondance et l'activité des vers sur un site donné, il faut leur offrir des conditions favorables. Mais pour équilibrer leur biodiversité?

Comme les vers vivent dans des îlots et se déplacent de quelques mètres par année, s'ils sont absents à un endroit et qu'on veut profiter de leurs services, on peut les introduire, puis travailler à les augmenter. (Pelosi 2024) Une intervention simple, qui peut se faire de façon artisanale. Mais ça reste une intervention de bio-ingénierie, pour modifier la biodiversité.

Il est bon de s'assurer qu'on a un assemblage équilibré d'au moins 3 à 5 espèces dans nos champs. Pour ce faire il faut les identifier. Et, selon le diagnostic, on peut en introduire, puis attendre qu'ils se répandent. La pratique a été appliquée à grande échelle en Nouvelle-Zélande, avec une hausse des rendements, (Nielsen 1951) et dans les polders de Hollande. (van der Werff, 1996)

Comme seules 4 espèces sont vendues, dont trois pour le compostage, il faut transférer des vers à partir d'un ou des sites bien pourvus en diversité. (Le plus simple est de les introduire un soir de pluie quand les prédateurs cessent leurs activités, en les couvrant d'un peu de terre ou de débris végétaux. Pour éviter de transférer des mauvaises herbes et des organismes indésirables, les laver et les laisser vider leurs intestins dans du papier mouchoir mouillé 24 heures au frais ou au frigo. Comme il peut y avoir quelques espèces, qu'ils doivent se trouver pour se reproduire, le mieux est d'en mettre 20 ou 30 au même endroit. 100 ou 200 vers permettent d'inoculer un champ. Une période fraîche et mouillée comme avril ou octobre est idéale.

Le grand lombric (*L. terrestris*) est un cas particulier. C'est le ver le plus important pour les sols cultivés chez nous. Difficile à trouver le jour, il amasse des débris dans des monticules en surface, à l'entrée de ses galeries. Si on voit ces amas, pas besoin de l'introduire. Sinon il est vendu comme appât, dans des magasins de « chasse et pêche ». 500 à 700 millions sont récoltés sur des fermes au Sud de l'Ontario chaque année. Il est conservé dans des frigos et disponible toute l'année. En ce moment, la saison achève et on peut en acheter à bon prix. Par exemple, un agriculteur en a acheté à 125\$ les 500 à l'automne 2024. Les petites quantités sont plus chères. Introduire à la pluie, le soir, en surface, tout juste couverts, par groupes de 10 au moins. Ils s'installent à proximité les uns des autres pour se reproduire. Rapidement, les services qu'ils vous rendront couvriront les coûts.



Photo T. Vinet

Une fois qu'ils sont présents, comment favoriser l'action des vers dans les sols agricoles? Voici les principales mesures favorables. Réduire ou éliminer le travail du sol, espacer les labours et éviter les appareils rotatifs, éviter les pesticides, apporter fréquemment des fumiers (Whalen 1998) et des matières organiques riches, chauler régulièrement, cultiver des engrais verts, laisser les résidus de culture au sol, maintenir le sol couvert, assurer la présence d'humidité, faire une rotation des cultures et y intégrer des cultures pérennes, préféablement en mélanges (Thivierge, en préparation), ameublir les sols compacts, maximiser les plantes à enracinement profond, associer une plante intercalaire à la culture principale.(Pelosi et al, 2024) On peut même ajouter de l'argile à un sol sableux sec (Reynolds, La France 2022).

AVANTAGES DE LA CULTURE BIOLOGIQUE

L'agriculture biologique faisait une large place aux mesures favorables à la biodiversité bien avant que le terme soit inventé. Un rapport exhaustif a démontré la contribution positive de l'agriculture biologique au Québec, notamment à la biodiversité (Boutin, 2011).

Dans une étude réalisée sur 205 fermes en Europe et en Afrique, où les champs sont plus petits qu'en Amérique, l'abondance de biodiversité intra-parcellaire est supérieure sur les fermes biologiques (Schneider et al, 2013). La différence est moindre quand on considère les espaces non-cultivés, c'est-à-dire qu'en culture conventionnelle plusieurs organismes absents des champs se réfugient dans les espaces sauvages. Les populations totales sont tout de même plus élevées en culture biologique.

Dans une revue de littérature recensant 528 études comparant 2816 paires de fermes biologiques et conventionnelles, entre 1990 et 2018, Sanders et Hess, 2019 concluent qu'«en moyenne le nombre d'espèces sur les terres arables était 95 % plus élevé en gestion biologique, ainsi que 61 % plus élevé pour la banque de semences de plein champ et 21 % plus élevé pour la végétation de bordure des champs. Dans le cas des oiseaux des champs, le nombre d'espèces était 35 % et l'abondance moyenne 24 % plus élevés pour l'agriculture biologique... et pour les insectes visitant les fleurs, respectivement à 23 % et 26 % de plus. (...) Pour la flore et la faune, 86 % et 49 % des comparaisons étaient à l'avantage du bio. Deux études sur 75 ont trouvé des effets négatifs de la gestion biologique dans 12 des 312 couples de fermes comparées. (...) la structure du paysage a un impact significatif sur la biodiversité, (...) et peut se superposer dans une large mesure aux effets de l'utilisation des terres.»

Une méta-analyse de 94 études comparant l'agriculture conventionnelle et l'agriculture biologique, a conclu que la diversité des plantes, des microbes, des arthropodes et des oiseaux est en moyenne 30 % plus élevée en culture biologique. Les avantages sont plus visibles dans les cultures annuelles que les vivaces (Tuck, 2014). On observe depuis longtemps qu'après une certaine période en culture biologique, le nombre d'espèces de plantes adventices (mauvaises herbes) dans les champs a tendance à augmenter; mais des pratiques de gestion non-chimiques très intensives peuvent en réduire les espèces (Van Elsen, 2000). De telles différences entre les approches ne sont pas toujours visibles. Il y a une grande diversité de systèmes de culture entre les fermes tant biologiques que conventionnelles, tant à l'intra-parcellaire que dans les zones de bordure.

Sur la base de deux méta-analyses comparant les agricultures biologique et conventionnelle, Muneret et al (2018) concluent qu'il y a moins de dommages de pathogènes en bio; des dommages d'insectes supérieurs ou équivalents en culture biologique, (supérieurs en cultures annuelles et en parcelles; mais semblables dans les cultures vivaces et sur les fermes, et dans l'ensemble équivalents); et que l'infestation de mauvaises herbes est fortement supérieure en bio, entraînant une baisse de rendements. Cependant il est possible que la biodiversité supportée par l'abondance des mauvaises herbes ait des impacts positifs sur l'équilibre biologique des insectes.

Bender et al. 2016 suggèrent qu'en développant l'ingénierie écologique des sols on pourra réduire de façon appréciable les différences de rendement entre l'agriculture biologique et l'agriculture intensive qui tient peu compte de la vie des sols. Par exemple, pourrait-on sélectionner des protistes qui activeraient la boucle de rétroaction (Geisen 2018) et augmenteraient l'azote minéralisé en sols froids en début de saison ou les années froides au Québec?

Table 1: Effects of organic farming on the diversity and abundance of different species and functional groups compared to conventional farming^[9,10,16,21,24,25,26]

Groups	Cropping systems	Abundance	Species diversity
Plants	Arable land	++	++
	Grassland		+ (=)
	Viticulture	+	+
Birds	Various cropping systems	+ (=)	+
Mammals/bats	Various cropping systems	+	+
Earthworms	Arable land	+	=
	Viticulture	+ (=)	=
Spiders	Arable land	+	+
	Viticulture and fruit production	+	+
Beetles	Various cropping systems	= (+)	= (+)
Wild bees	Various cropping systems	+ (=)	+ (=)
Butterflies	Various cropping systems	+	+ (=)
Soil microbes	Various cropping systems	+*	
Mycorrhizal fungi	Arable land	+	+
Pollinators (functional groups)	Various cropping systems	++	++
Beneficial organisms (functional groups)	Various cropping systems	+	+
Decomposers (functional groups)	Various cropping systems	+	+

Positive '+', no difference '=', in some instances '()' compared to conventional farming

*Microbial biomass

Pfiffner, Stoeckli, 2023

Lampkin et Pearce 2020 démontrent clairement les avantages de la culture biologique pour la biodiversité (30 % de plus que les pratiques conventionnelles, en moyenne) et encouragent les autorités politiques à la soutenir à cause de ses contributions positives à la nature et à la société. Reconnaisant ces contributions, les autorités européennes visent 25 % du territoire agricole en bio pour 2030.

Voir leur tableau synthèse ci-après.

Practice	Biodiversity impact	Key assumptions
Mixed farming	↑↑	Collaboration between crop and livestock enterprises leading to reduced use of manufactured fertiliser through use of manure on holding and enhanced system diversity (Watson <i>et al.</i> , 2005; Rodrigues <i>et al.</i> , 2006; Wilkins, 2008; Scialabba and Müller-Lindenlauf, 2010; Knox <i>et al.</i> , 2011; Lemaire <i>et al.</i> , 2014; Soussana and Lemaire, 2014; Lampkin <i>et al.</i> , 2015; Smith, Williams and Pearce, 2015; Altieri and Nicholls, 2017)
Use of diverse rotations	↑↑↑	A range of crop types used to promote soil health by improving the diversity of root architecture and reduce disease/pest burdens (Marcroft <i>et al.</i> , 2004; Ball <i>et al.</i> , 2005; Beckie, 2006; Smith <i>et al.</i> , 2008; Stobart, 2011; McDaniel, Tiemann and Grandy, 2014; Gaudin <i>et al.</i> , 2015; Lynch and Wojciechowski, 2015; Maltais-Landry and Frossard, 2015; Preissel <i>et al.</i> , 2015; Venter, Jacobs and Hawkins, 2016; Altieri and Nicholls, 2017)
Manure and compost as fertiliser	↑	Home-produced manure and compost replacing manufactured NPK fertiliser (Smith <i>et al.</i> , 1998; Gunapala and Scow, 1998; Chambers, Smith and Pain, 2000; Sharpley and Moyer, 2000; Fließbach and Mäder, 2000; Blair <i>et al.</i> , 2006; Flavel and Murphy, 2006; Rigolot <i>et al.</i> , 2010; MacLeod <i>et al.</i> , 2010; Hjorth <i>et al.</i> , 2011; Hartmann <i>et al.</i> , 2015a; Neher, Weicht and Dunseith, 2015; Hijbeek <i>et al.</i> , 2018)
Ruminants predominantly forage fed	↑↑	Assumes forage-based diet for ruminants (e.g. grass and clover), i.e. feeding less/minimal amounts of grain or compound feed (Bailey <i>et al.</i> , 2003; Lee, Isenhardt and Schultz, 2003; Nevens and Reheul, 2003; Hancock and Wilson, 2003; Parish and Sotherton, 2004; Berry, Ogilvy and Gardener, 2004; Ros, Klammer, <i>et al.</i> , 2006; Ros, Pascual, <i>et al.</i> , 2006; Carvell <i>et al.</i> , 2007; Tejada <i>et al.</i> , 2008; Wilkins, 2008; Smith, 2009; Tejada, Hernandez and Garcia, 2009; Dougherty <i>et al.</i> , 2009; Borin <i>et al.</i> , 2010; Dalal <i>et al.</i> , 2010; Smith <i>et al.</i> , 2011; Diacono and Montemurro, 2011; Tuomisto <i>et al.</i> , 2012a, 2012b; Soussana and Lemaire, 2014; Van Zanten <i>et al.</i> , 2014; Smith, Williams and Pearce, 2015; Benton <i>et al.</i> , 2017; Salou, Le Mouél and van der Werf, 2017; DEFRA, 2017)
Mechanical weed control	↑↑	Removing weeds by soil surface cultivation, including spring-tine harrowing, inter-row cultivation, finger weeding (Watson, Huggins and Jones, 2008; Bajgai <i>et al.</i> , 2015; Crittenden <i>et al.</i> , 2015; Smith, Williams and Pearce, 2015; Melander <i>et al.</i> , 2017; Pesticide Action Network, 2017)
The use of leys in arable rotations	↑↑	The inclusion of a 1-3 year legume or grass ley in the arable rotation to build soil fertility and biological activity. (Watson <i>et al.</i> , 2005; Wilkins, 2008; Knox <i>et al.</i> , 2011; Döring <i>et al.</i> , 2012; Moss and Lutman, 2013; IBERS, 2014; Loaiza Puerta <i>et al.</i> , 2018; Sanders and Hess, 2019)
Encouraging natural predators (outdoors)	↑↑↑	Devotion of farm area(s) to conservation for promotion of natural predators, including planting/maintaining wildlife areas (e.g. beetle banks, species-rich field margins) to encourage natural predators for pest control (Carlsson and Huss-Danell, 2003; Hovi, Sundrum and Thamsborg, 2003; Doyle and Topp, 2004; Edwards, 2005; Eriksson <i>et al.</i> , 2005; Halberg <i>et al.</i> , 2010; Dekker <i>et al.</i> , 2012; Tuomisto <i>et al.</i> , 2012b; Lampkin <i>et al.</i> , 2015; Steinfeldt and Hammershøj, 2015; Vogeler, Vibart and Cichota, 2017)
Use of green waste compost	↑	Compost produced from landscaping and garden green waste applied to fields as a valuable soil amendment, reducing fertiliser use and improving soil health, whilst also reducing landfill (Leighty, 1938; Power, 1990; Latif <i>et al.</i> , 1992; Liebman and Dyck, 1993; Nemecek <i>et al.</i> , 2008; Lassaletta <i>et al.</i> , 2014)
Animals provided with maximum possible outdoor access year-round	*	Outdoor access year round for livestock, including loafing yards and sacrifice fields (Savory and Butterfield, 1998; Smith, Williams and Pearce, 2015; Garnett <i>et al.</i> , 2017; Muller <i>et al.</i> , 2017)
Diverse/herbal sward	↑↑↑	Use of diverse species mixes in grassland, which could include clovers, lucerne, sainfoin, legumes, ryegrass, timothy, cocksfoot, fescue and chicory, among others (Storkey <i>et al.</i> , 2011; Döring <i>et al.</i> , 2012; Lampkin <i>et al.</i> , 2015)
Increasing use of legumes in crop rotations	~	There are two main types of legumes: seed/grain legumes and perennial forages as green manure. The impacts within this assessment are focussed on the former category, i.e. the use of grain/seed legumes in crop rotations. (Lassaletta <i>et al.</i> , 2014; Voisin <i>et al.</i> , 2014; PGRO, 2017; Stagnari <i>et al.</i> , 2017)
Novel forages (e.g. chicory)	↑↑	Inclusion of forage crops such as lucerne, sainfoin and chicory within pasture areas on livestock farms. (Marley <i>et al.</i> , 2006; Dawson, Huggins and Jones, 2008)
Undersowing of leys in crops	↑↑↑	Sowing a ley sward during or after the sowing of a crop, usually cereal, allowing the ley to establish while the main crop is still in the ground (Watson <i>et al.</i> , 2005; Wilkins, 2008)

Importance de la collaboration

Si les agriculteurs d'une localité ou d'une région travaillent conjointement à instaurer des mesures et des pratiques culturelles favorables, leurs efforts auront plus d'impact que des initiatives individuelles. Les améliorations à l'échelle de la ferme favorisent les taxons peu mobiles comme les vers de terre et les plantes, alors que les aménagements à l'échelle du paysage vont profiter aux taxons mobiles, syrphes, bourdons, oiseaux, etc. (Piffner 2019). Notamment, comme mentionné ci-haut, la connectivité des habitats semi-naturels est très importante et gagne à être aménagée par une communauté de voisins.

Notons le travail important réalisé par le **Centre d'expertise et de transfert en agriculture biologique et de proximité** en collaboration avec des agriculteurs et des agricultrices, et notamment ses essais à la ferme de **l'Institut national d'agriculture biologique** du Cégep de Victoriaville (ci-dessous).



CONCLUSION – PLUSIEURS PETITS MARTEAUX

Comme beaucoup de gens aujourd'hui, de nombreux agriculteurs recherchent des solutions simples aux problèmes auxquels ils font face. Devant la complexité de la nature, une approche globale et diversifiée est beaucoup plus appropriée et donnera à terme les meilleurs résultats.

Revenons aux petits marteaux cités ci-dessus:

« Les populations de mauvaises herbes peuvent être régulées par des ensembles concertés de tactiques de contrôle et d'interactions écologiques dont les effets individuels sont faibles mais dont les effets cumulatifs empêchent la croissance de la population et la compétition contre les cultures. Liebman et Gallandt (1997) ont appelé ce concept « plusieurs petits marteaux », pour le contraster avec les approches conventionnelles de gestion des mauvaises herbes qui mettent l'accent sur des « gros marteaux » uniques (par exemple, les herbicides). Ils ont suggéré que des rotations de cultures diversifiées étaient susceptibles d'offrir les meilleures opportunités d'exploiter divers ensembles de tactiques et de processus écologiques pour supprimer les mauvaises herbes » (Westerman, 2005).

Favoriser la biodiversité et l'équilibre écologique reste la meilleure façon d'assurer une coexistence fructueuse entre la nature et les êtres humains qui en font partie. Et en reflet de la diversité des êtres vivants, on va appliquer des mesures diversifiées et complémentaires pour assurer la réussite de nos pratiques agricoles. Les agriculteurs et les agricultrices d'aujourd'hui doivent s'impliquer dans le développement des nouveaux modèles qui à l'avenir vont remplacer les modèles réductionnistes actuels, beaucoup basés sur les biocides, trop souvent destructeurs de la vie.

Au lieu de rechercher un petit nombre d'interventions majeures, adopter une approche de multiples interventions mineures. On constate quand on se penche sur la redondance fonctionnelle dans le monde vivant, que chaque besoin est comblé par plusieurs éléments et chaque élément remplit plusieurs fonctions.

Donc une approche globale qui aborde les solutions aux problèmes à partir de points de vue multiples sera de mise pour assurer la survie de la multitude d'êtres vivants nécessaires au bon fonctionnement de nos fermes. Donc une approche globale qui aborde les solutions aux problèmes à partir de points de vue multiples sera de mise pour assurer la survie de la multitude d'êtres vivants nécessaires au bon fonctionnement de nos fermes.

Gros défi collectif! Mais n'est-ce pas ce qui rend notre travail si intéressant? Serons-nous à la hauteur ?



Références

- <https://inpn.mnhn.fr/informations/biodiversite/definition>
- Altieri MA (1999) The ecological role of biodiversity in agroecosystems. *Agric Ecosyst Environ* 74:19–31
- Altieri, M.A. et C.I. Nicholls. 2004. *Biodiversity and Pest Management in Agroecosystems*. The Harworth Press, NY. (2e édition)
- Anthony, Mark A ; Bender, S Franz ; van der Heijden, Marcel G A, 2023, Enumerating soil biodiversity, *PNAS*. Vol.120 (33)
- Bacon, M.-H., Vandelac, L., Gagnon, M.-A., Parent, L., 2023, Poisoning Regulation, Research, Health, and the Environment: The Glyphosate-Based Herbicides Case in Canada. *Toxics* 2023, 11, 121.
- Banerjee, S., Walder, F., Büchi, L., Meyer, M., Held, A. Y., Gattinger, A., et al. (2019). Agricultural intensification reduces microbial network complexity and the abundance of keystone taxa in roots. *ISME J.* 13, 1722–1736.
- Banerjee,S., van der Heijden, MGA, 2023, Soil microbiomes and one health. *Nat. Rev. Microbiol.* 21,6–20
- Bardgett, R.D. and van der Putten, W.H. (2014) Belowground biodiversity and ecosystem functioning. *Nature* 515, 505–511
- Bedoussac L, Journet EP, Hauggaard-Nielsen H, et al. (2015) Ecological principles underlying the increase of productivity achieved by cereal- grain legume intercrops in organic farming. A review. *Agron Sustain Dev* 35:911–935
- Bender SF, Wagg C, van der Heijden MGA., 2016, An Underground Revolution: Biodiversity and Soil Ecological Engineering for Agricultural Sustainability. *Trends Ecol Evol.* 31(6):440-452.
- Bergeron, E., 2024, communication personnelle
- Berteaux, D., N. Casajus, S. de Blois, 2014, *Changements climatiques et biodiversité du Québec*, PUQ, Québec
- Marie Bipfubusa, Julie Anne Wilkinson, Gilles Gagné, Michel McElroy , François Gendreau-Martineau, 2024, *Cultures de couverture dans le soya: expérimentation d'espèces et effets agronomiques et agropédologiques*, Rapport final
- Bouché, M.B., 2014, *Des vers de terre et des hommes. Découvrir nos écosystèmes fonctionnant à l'énergie solaire*, Actes Sud
- Boutin, D., R. Sanscartier, J.A. Brunelle, M. Richardson, G. Debailleul, 2011, *Contribution des systèmes de production biologique à l'agriculture durable*, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, Québec, 152 p.
- Capowiez, Y, Decaëns, T. Botinelli, N., Marchan D. F., 2023, Let earthworms be functional - Definition of new functional groups based on their bioturbation behavior., *Soil Biology and Biochemistry*, 188:109209

- Cappelli, S. L., Domeignoz Horta, L. A., Gerin, S., Heinonsalo, J., Lohila, A., Raveala, K., Schmid, B., Shrestha, R., Tiusanen, M. J., Thitz, P., & Laine, A.-L. (2024). Potential of undersown species identity versus diversity to manage disease in crops. *Functional Ecology*, 38, 1497–1509.
- Clarholm M., 1985, Interactions of bacteria, protozoa and plants leading to mineralization of soil nitrogen. *Soil Biol Biochem* 17:181–7
- Domeignoz-Horta, et al., 2024, Plant diversity drives positive microbial associations in the rhizosphere enhancing carbon use efficiency in agricultural soils, *Nature Communications* | (2024)15:8065
- Duelli, P. (1997). Biodiversity evaluation in agricultural landscapes: an approach at two different scales. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 62, 81–91.
- Eglin T., Blanchart E., Berthelin J., de Cara S., Grolleau G., Lavelle P., Richaume-Jolion A., Bardy M., Bispo A., 2010, La vie cachée des sols, MEEDDM, 20pp.
- Fahrig L, Baudry J, Brotons L, et al. (2011) Functional landscape heterogeneity and animal biodiversity in agricultural landscapes. *Ecol Lett* 14: 101-112.
- Fahrig L., Judith Girard, Dennis Duro, Jon Pasher, Adam Smith, Steve Javorek, Douglas King, Kathryn Freemark Lindsay, Scott Mitchell, Lutz Tischendorf, 2015, Farmlands with smaller crop fields have higher within-field biodiversity, *Agriculture, Ecosystems & Environment* (200), 219-234,
- FAO, ITPS, GSBI, CBD and EC., 2020, *State of knowledge of soil biodiversity - Status, challenges and potentialities, Report 2020*. Rome, FAO.
- FAO and ITPS. 2021. Recarbonizing global soils – A technical manual of recommended management practices. Rome,
- M. R. Finckh, S. M. Junge, J. H. Schmidt and O. D. Weedon, 2019, Disease and pest management in organic farming: a case for applied agroecology, In Köpke, U., *Improving Organic Plant Cultivation*, Burleigh-Dodds
- Frazão, J. et al., 2017, Earthworm communities in arable elds and restored field margins, as related to management practices and surrounding landscape diversity. *Agric. Ecosyst. Environ.* 248, 1–8
- Fry, G., 1995, Landscape Ecology of Insect Movement in Arable Ecosystems. In: Glen, D.M. (Ed.), Wiley, Bristol, UK, pp. 236–242.
- Garland, Gina; Edlinger, Anna; Banerjee, Samiran; Degruene, Florine; García-Palacios, Pablo; Pescador, David Sánchez; Herzog, Chantal; Romdhane, Sana; Saghai, Aurélien; Spor, Ayme; Wagg, Cameron; Hallin, Sara; Maestre, Fernando T; Philippot, Laurent; Rillig, Matthias C; van der Heijden, Marcel G A (2021). Crop cover is more important than rotational diversity for soil multifunctionality and cereal yields in European cropping systems. *Nature Food*, 2(1):28-37
- Geisen, S., E. A. D. Mitchell, S. Adl, M. Bonkowski, M. Dunthorn, & F. Ekelund (2018): Soil protists: a fertile frontier in soil biology research. – *FEMS Microbiology Reviews* 42:293–323.
- Geisen, S, E. Lara, E. A. D. Mitchell, E. Völcker, V. Krashevskaya, (2020) “Soil protist life matters!” *Soil Organisms*, 92(3), pp. 189–196.
- Gentsch, N., J. Boy, J. D. Kennedy Batalla, D. Heuermann, N, von Wirén, D. Schweneker, U. Feuerstein, J. Groß, B. Bauer, B. Reinhold-Hurek, T. Hurek, F. Camacho Céspedes, G. Guggenberger, 2020, Catch

crop diversity increases rhizosphere carbon input and soil microbial biomass , *Biology and Fertility of Soils*, 56:943–957

- Giard-Laliberté, C. Effet de trois engrais verts fauchés et déplacés comme fertilisants sur le rendement de légumes et la santé des sols, CETAB+
- Giard-Laliberté, C., 2025, Les engrais organiques d'origine végétale : quel rôle pour la fertilisation biologique en serre?, CETAB+
- Gobat, J.-M., M. Aragno, W. Matthey, 2017, *Le sol vivant : base de pédologie, biologie des sols*, Presse polytechniques et universitaires romandes, Lausanne
- Hafiz Maherali et al., 2007, Influence of Phylogeny on Fungal Community Assembly and Ecosystem Functioning, *Science*, (316)1746
- Hallmann CA, Sorg M, Jongejans E, Siepel H, Hofland N, Schwan H, et al. (2017) More than 75 percent decline over 27 years in total flying insect biomass in protected areas. *PLoS ONE* 12 (10): e0185809.
- Hoitink, H., Ramos, L., 2004. Disease suppression with compost: history, principles and future. In: *International Conference Soil and Compost Eco-Biology*, Leon, Spain
- Insunza V, Alström S, Eriksson KB (2002) Root bacteria from nematicidal plants and their biocontrol potential against trichodorid nematodes in potato. *Plant Soil* 241:271–278
- Jeffery, S., C. Gardi, A. Jones, L. Montanarella, L. Marmo, L. Miko, K. Ritz, G. Peres, J. Römbke et W. H. van der Putten (eds.), 2010, *Atlas européen de la biodiversité du sol*. Commission européenne, Bureau des publications de l'Union européenne, Luxembourg.
- Jones, C.G.; Lawton, J.H.; Shachak, M., 1994, Organisms as Ecosystem Engineers. *OIKOS*, 69, 373–386
- Kay, B.D., L. J. Munkholm, 2011, Managing the Interactions between Soil Biota and their Physical Habitat in Agroecosystems, in K. Ritz, I. Young , *The Architecture and Biology of Soils: Life in Inner Space* 170 CAB International
- Kladivko, E.J. (2001) Tillage systems and soil ecology. *Soil and Tillage Research* 61, 61–76
- Kim, N., M.C. Zabaloy, K. Guan, M. B. Villamil, 2020, Do cover crops benefit soil microbiome? A meta-analysis of current research, *Soil Biology and Biochemistry*, 142
- Labrie, G., Estevez, B. et Lucas, E. 2016. Impact of large strip cropping (24 and 48 rows) on soybean aphid during four years in organic soybean. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 222 : 249-257
- La France, D., 1995, *La rotation des cultures*, 121p., C.D.A., CEGEP, Victoriaville
- La France, D, E. Maynard, 2006, *Intensification des cultures d'engrais verts en culture maraîchère*, 150 p., CDAQ, Longueuil
- La France, D., 2010, *La culture biologique des légumes*, Berger, Austin
- La France, D., M. Leblanc, P-A. Gilbert, G. Moreau, M. Lefebvre, A Weill, J. Painchaud, Y. Houle, 2012, Mise au point et validation d'un système de travail minimum du sol avec planches permanentes en culture maraîchère biologique, CETAB+, Victoriaville

- La France, D., A. Comeau, 2016, Développement d'un seigle adapté au rôle de couvre-sol pour le semis direct sans herbicide, CETAB+, Victoriaville
- La France D., 2023 www.Wikimaraicher.ca, Chapitre 5 Le compostage à la ferme
- La France, D., Facebook Vers de terre Québec ou www.lesversetlaterre.bio
- <https://www.facebook.com/groups/244027801346660>
- Lakshmanan, V., Ray, P., and Craven, K. D. (2017). Toward a Resilient, Functional Microbiome: Drought Tolerance-Alleviating Microbes for Sustainable Agriculture. *Plant Stress Tolerance* 163, 69–84
- Lal, R. and Stavi, I. (2015) Achieving zero net land degradation: challenges and opportunities. *J. Arid Environ.* A 112, 44–51
- Lampkin, N., B. Pearce, 2020, Organic Farming and Biodiversity, IFOAM Organics Europe,
- Leblanc, M., M. Lefebvre, D. La France, A. Weill, L. Belzile, H. Grondine, L. Jochems-Tremblay, S. Préfontaine, 2015, Productions maraîchères biologiques en planches permanentes, IRDA, St-Bruno
- Liebman, M., E. Gallandt (1997) Many Little Hammers: Ecological Management of Crop-Weed Interactions, In *Ecology and Agriculture*, Ed: L.E. Jackson, Academic Press
- Liu X., S.E. Hannula, X. Li, M. P.J. Hundscheid, P. J.A. k. Gunnewiek, A. Clocchiatti, W. Ding, W. de Boer, 2021, Decomposing cover crops modify root-associated microbiome composition and disease tolerance of cash crop seedlings, *Soil Biology and Biochemistry*, 160,
- Madigan, M.T., Martinko, J.M., Bender, K.S., Buckley, D.H. & Stahl, D.A. 2015. *Brock biology of microorganisms (14th edition)*. Boston, USA. Pearson.
- MAPAQ, MDDELCC, 2016, Rapport du commissaire au développement durable, Chapitre 3, in Rapport du vérificateur général du Québec à l'Assemblée nationale pour l'année 2016-2017, Québec
- Margulis, L., R. Fester, 1991, Symbiosis As A Source Of Evolutionary Innovation, MIT
- Michel, F., 2020, non-publié, in Rynk, R., ed., 2022, *The Composting Handbook*, Academic Press
- Muneret, L., Mitchell, M., Seufert, V., Aviron, S., Djoudi, E. A., Pétilion, J., Plantegenest, M., Thiéry, D., Rusch, A. (2018). Evidence that organic farming promotes pest control. *Nature Sustainability*, 1, 361-368
- Nielsen, RL, (1951) Earthworms and soil fertility. *N Z J Agric* 83:433–435
- Nyfeler, D., O. Huguenin-Elie, M. Suter, A. Lüscher, 2011, Grass-legume mixtures can yield more nitrogen than legume pure stands due to mutual stimulation of nitrogen uptake from symbiotic and non-symbiotic sources, *Agriculture Ecosystems & Environment*, 140(1):155-163
- Nuutinen V, Nieminen M, Butt KR (2006) Introducing deep burrowing earthworms (*Lumbricus terrestris* L.) into arable heavy clay under boreal conditions. *Eur J Soil Biol* 42:S269–S274
- Orgiazzi, A., Bardgett, R.D., Barrios, E., Behan-Pelletier, V., Briones, M.J.I., Chotte, J-L., De Deyn, G.B., Eggleton, P., Fierer, N., Fraser, T., Hedlund, K., Jeffery, S., Johnson, N.C., Jones, A., Kandeler, E., Kaneko, N., Lavelle, P., Lemanceau, P., Miko, L., Montanarella, L., Moreira, F.M.S., Ramirez, K.S., Scheu, S., Singh, B.K., Six, J., van der Putten, W.H., Wall, D.H.(Eds.), 2016, *Global Soil Biodiversity Atlas*. European Commission, Publications Office of the European Union, Luxembourg. 176 pp.

- Paré, D., R. Boutin, G.R. Larocque, F. Raulier, 2011, Effect of temperature on soil organic matter decomposition in three forest biomes of eastern Canada, *CJSS* : 247-256
- Pelosi, C., L. Petit-Dit-Grezeriat, O. Ratsiatosika, E. Blanchart, 2024, Earthworm Contributions to Agricultural Sustainability, in Kooch, Y., Y. Kuzyakov, *Earthworms and Ecological processes*, Springer
- Pfiffner, L., L. Armengot, Biodiversity as a prerequisite of sustainable organic farming, in Köpke, U., 2019, *Improving organic crop cultivation*, Burleigh Dodds, Cambridge
- Pfiffner, I., S. Stoeckli, 2023, *Agriculture and biodiversity. Impacts of different farming systems on biodiversity.*, FIBL
- Philippot L, Spor A, Henault C, Bru D, Bizouard F, Jones CM, Sarr A, Maron P-A., 2013. Loss in microbial diversity affects nitrogen cycling in soil. *ISME Journal* 7: 1609–1619
- Poudel, S.; Pent, G. et Fike, J., 2024. Silvopastures: Benefits, Past Efforts, Challenges, and Future Prospects in the United States. *Agronomy* 14, 1369.
- Ratnadass Alain, Fernandes Paula, Avelino Jacques, Habib Robert. 2012. Plant species diversity for sustainable management of crop pests and diseases in agroecosystems: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 32 (1) : 273-303.
- Reynolds, J.W., D. La France, 2022, *Nouvelles espèces de vers de terre au Sud du Québec*, Megadrilogica, Vol 7, no. 2
- Rosenberg K.V., et al, 2019, Decline of the North American avifauna., *Science*, 366,120-124
- Rynk, R., *et al.*, 2022, *The Composting Handbook*, Academic Press (Elsevier) London
- Sackett, T. et al. (2010) Linking soil food web structure to above- and belowground ecosystem processes: a meta-analysis. *Oikos* 119, 1984–1992
- Sanders, Hess, 2019 *Leistungen des ökologischen Landbaus für Umwelt und Gesellschaft*, Braunschweig, J.H. von Thunen Institut, 364 p.
- Schneider, M. K. et al. Gains to species diversity in organically farmed fields are not propagated at the farm level. *Nat. Commun.* 5:4151
- Shipitalo MJ, Le Bayon RC (2004) Quantifying the effects of earthworms on soil aggregation and porosity. In: Edwards CA (Ed) *Earthworm Ecology* (2nd Edn), CRC Press, Boca Raton, pp 183-200
- Sponsel. E., 2001, *Human Impact on Biodiversity, An Overview*, Encyclopedia of Biodiversity, Vol 3
- Trap, J., M. Bonkowski, C. Plassard, C. Villenave, E. Blanchart, (2015) Ecological importance of soil bacterivores for ecosystem functions. *Plant Soil* 398, 1–24
- Tsiafouli MA, Thébault E, Sgardelis SP, de Ruiter PC, van der Putten WH, Birkhofer K, Hemerik L, de Vries FT, Bardgett RD, Brady MV, Bjornlund L, Jørgensen HB, Christensen S, Hertefeldt TD, Hotes S, Gera Hol WH, Frouz J, Liiri M, Mortimer SR, Setälä H, Tzanopoulos J, Uteseny K, Pižl V, Stary J, Wolters V, Hedlund K., 2015, Intensive agriculture reduces soil biodiversity across Europe. *Glob Chang Biol.*; 21(2):973-85.
- Vandelac, L., 2023, Existing Formulations of Pesticides: More Toxic Than Active Ingredients? in *Toxics Webinar*, https://www.youtube.com/watch?v=y37x7LieB3M&ab_channel=MDPI-webinar
- van der Burgt, Geert-Jan, Bart Timmermans, 2025, *Planty Organic evaluation 2012-2024*, Louis Bolk Instituut, Bunnik

- van der Heijden MG, Bardgett RD, van Straalen NM., 2008, The unseen majority: soil microbes as drivers of plant diversity and productivity in terrestrial ecosystems., *Ecol Lett.*, 11(3):296-310.
- van der Werff, P. A., Noordhuis, R., & Dekkers, T. B. M. (1996). Earthworm introduction in an organic stockless farming system. In Abstract 12th Int. Colloquium on Soil Zoology: Soil organisms and soil resource management. Dublin, Ireland (pp. 37)
- Vasseur, C., et al., 2012, The cropping systems mosaic: How does the hidden heterogeneity of agricultural landscapes drive arthropod populations? *Agric. Ecosyst. Environ.*
- Vaupel et al, 2024, Perennial flower strips in agricultural landscapes strongly promote earthworm populations, *npj Sustainable Agriculture* 2:31
- E. Vukicevich,, T Lowery, P Bowen, J R Úrbez-Torres, M. Hart, 2016, Cover crops to increase soil microbial diversity and mitigate decline in perennial agriculture. A review, *Agron. Sustain. Dev.* (2016) 36: 48
- Wassermann B, Müller H and Berg G (2019) An Apple a Day: Which Bacteria Do We Eat With Organic and Conventional Apples? *Front. Microbiol.* 10:1629. doi: 10.3389/fmicb.2019.01629
- Westerman, P.R., M. Liebman, F. D. Menalled, A. H. Heggenstaller, R. G. Hartzler, P. M. Dixon, 2005, Are many little hammers effective? Velvetleaf (*Abutilon theophrasti*) population dynamics in two- and four-year crop rotation systems, *Weed Science* 53(3), 382-392
- Widmer TL, Abawi GS (2000) Mechanisms of suppression of *Meloidogyne hapla* and its damage by a green manure of sudangrass. *Plant Dis* 84:562–568
- Wagg, C. , S. F. Bender, F. Widmer, van der Heijden MG, (2014) Soil biodiversity and soil community composition determine ecosystem multifunctionality. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 111, 5266–5270
- Wang, K., Peng, C., Zhu, Q., Zhou, X., Wang, M., Zhang, K. & Wang, G., 2017. Modeling global soil carbon and soil microbial carbon by integrating microbial processes into the ecosystem process model TRIPLEX-GHG. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 9: 2368-2384.
- Weill, A., D. La France, 2015, Sous-solage dans les prairies et engrais verts, CETAB+, Victoriaville
- Weill, A., D. La France, 2016, Essai sur les engrais verts d'automne et d'été en culture maraichère, CETAB+, Victoriaville
- Whalen JK, Parmelee RW, Edwards CA (1998) Population dynamics of earthworm communities in corn agroecosystems receiving organic or inorganic fertilizer amendments. *Biol Fertil Soils* 27:400–407
- Wiens JJ, (2023) How many species are there on Earth? Progress and problems. *PLoS Biol* 21(11): e3002388.
- Wilkinson, J.A., 2023, Cultiver la biodiversité : qualité agronomique et boulangère des variétés de blé cultivées en mélange, Colloque bio pour tous, CETAB+
- Wilkinson, J.-A, A. Comeau, E. Vachon, D. La France, 2023, Performance agronomique, résilience et qualité boulangère de mélanges de cultivars de blé adaptés à la régie biologique dans l'Est du Canada, CETAB+, Victoriaville

Bonnes pratiques culturelles favorisant la biodiversité

2025

Denis La France

Enseignant et expert en agriculture biologique,
Centre d'expertise et de transfert en agriculture biologique et de proximité,
Institut national d'agriculture biologique,
Cégep de Victoriaville.

Ce travail a été réalisé avec l'appui financier du Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec.

Il présente les idées de l'auteur.