

Pachamama

L'agroécologie en pratique

- Livret technique -





Principes fondamentaux de l'agroécologie

Définition de l'agroécologie

Chez Pour une Agriculture du Vivant, l'agroécologie est une démarche de progrès vers des systèmes agricoles dans lesquels c'est le Vivant qui assure au maximum la fertilité du sol, la nutrition des plantes et la protection des cultures.

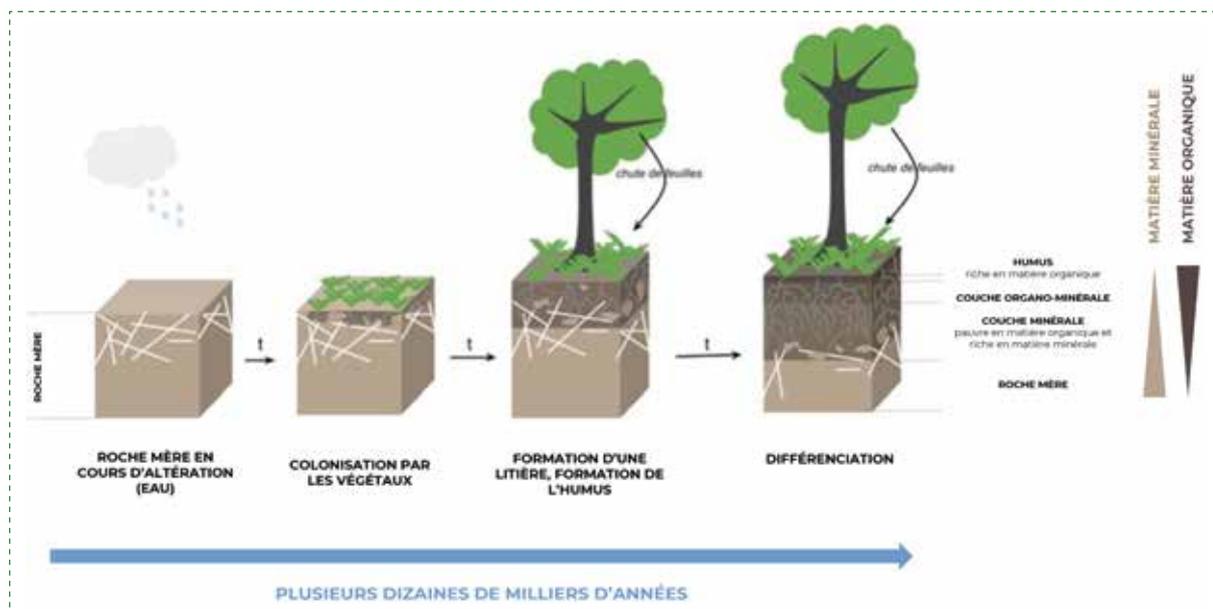
Concrètement, cela se traduit par des pratiques qui permettent de réduire le travail du sol et de le couvrir au maximum, afin d'en maximiser l'activité biologique, et d'apporter de la diversité pour favoriser les auxiliaires et ainsi renforcer la régulation naturelle.



Les sols : clé de voûte de la fertilité d'un écosystème cultivé

Un sol : qu'est ce que c'est ?

Un sol est le résultat de l'altération d'une roche mère par l'action des éléments (vent, pluie) et des végétaux. Ce processus dure plusieurs dizaines de milliers d'années. Le sol est donc une couche plus ou moins épaisse selon son âge et sa situation géographique, constitué d'un mélange de matière organique (issue du vivant) et de matière minérale.



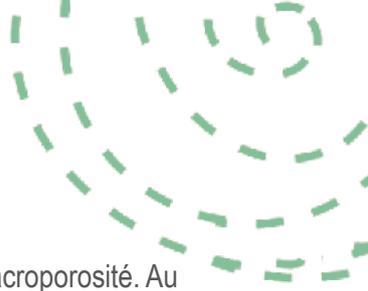
Un sol en bon état est constitué de 50% de vide, c'est-à-dire de pores remplis d'eau et d'air. La fraction minérale issue de la roche-mère représente environ 45%. Les 5% restants sont cruciaux en agroécologie : c'est la fraction organique, souvent appelée "matière organique", issue des déjections d'animaux, des débris végétaux, des racines, des vers de terre, des champignons, des bactéries... Dans cette catégorie organique, seuls 5% sont occupés par les organismes vivants. La fertilité biologique repose donc sur 0,25% de ce qui constitue un sol.



La fertilité des sols repose sur un triptyque : fertilité physique, fertilité chimique et fertilité biologique.

La fertilité physique correspond à la structure du sol

Un sol bien structuré doit contenir 50% de vide. Naturellement, la porosité est créée par différents mécanismes : l'alternance du gel/dégel, le sec et surtout l'activité biologique. Celle-ci crée une porosité stable, appelée microporosité. Elle est constituée de galeries creusées par les racines, les vers de terre et les autres micro-organismes du sol. Des colles biologiques sont sécrétées par les organismes vivants dans le sol (mucus de vers de terre, glomaline des champignons), qui assemblent les agrégats, et participent à



la stabilité du sol. Sinon, la porosité peut être créée mécaniquement, on parle alors de macroporosité. Au contraire de la porosité biologique, celle-ci n'est pas stable dans le temps. En revanche, elle est rapide à créer. C'est pourquoi la période de transition d'une porosité mécanique à une porosité biologique est délicate. Il faut réussir à favoriser la porosité biologique mais chaque passage de travail du sol aura tendance à la détruire.

Afin de mesurer l'état structural du sol, il existe plusieurs méthodes : le profil de sol, le mini profil 3D ou le test bêche (méthode VESS).

La fertilité chimique concerne la quantité et la disponibilité des nutriments utiles à la croissance des plantes

Les nutriments utiles à la croissance des plantes sont divisés en plusieurs catégories :

- l'eau,
- les macro-éléments (N, P, K, Mg, S, Cl, Na),
- les oligo-éléments (Mn, Fe, Z, Cu, Mo, Ni, Co, Se, I).

Un sol fertile sera donc un sol capable de stocker mais aussi de rendre disponibles l'eau et les minéraux aux plantes.

L'eau est stockée par la micro et mésoporosité (invisible à l'œil nu). Ces porosités sont influencées par :

- la texture,
- la teneur en matière organique,
- le travail du sol,
- l'activité biologique.

La macroporosité, elle, permet au sol d'améliorer sa capacité à absorber un grand volume d'eau rapidement, mais l'eau ne fera que passer par ces capillaires et ne sera pas retenue.

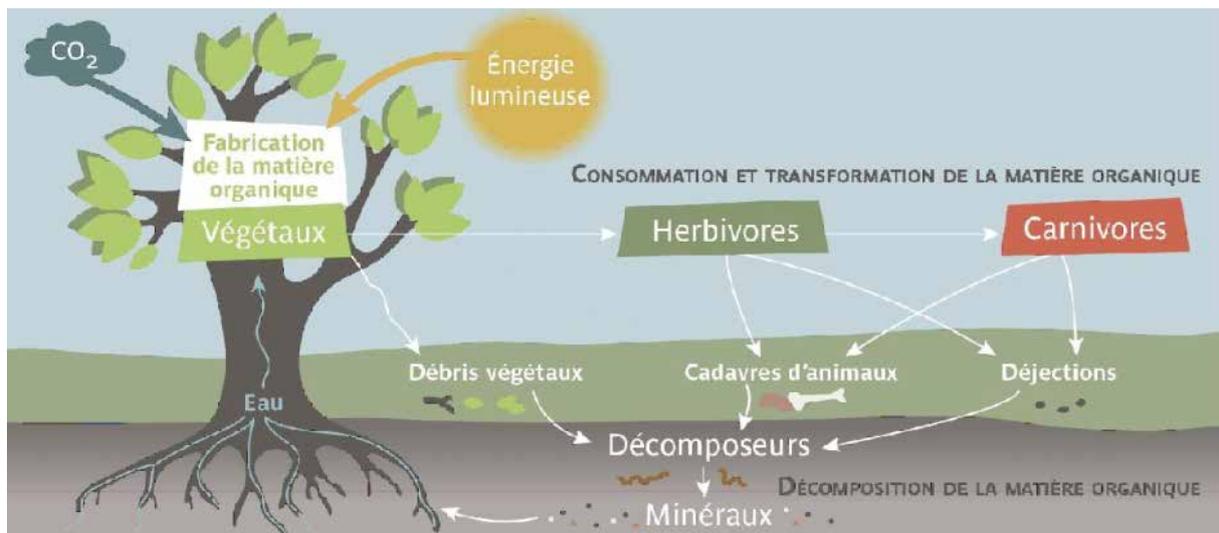
Les éléments minéraux sont issus de la roche mère et de l'action de certains micro-organismes et sont fixés dans le sol par le complexe argilo-humique. La capacité de fixation des minéraux dépend donc de la quantité et du type d'argile, du taux de matière organique et du pH (l'acidité du sol la réduit).

Les plantes n'absorbent les minéraux qu'en solution dans l'eau. L'exploration racinaire, favorisée par une macroporosité organisée verticalement, permet à la plante d'atteindre de façon directe l'eau et les minéraux se trouvant dans la mésoporosité.

La fertilité physico-chimique est liée à la fertilité biologique : au travers de la mycorhization, les champignons font le lien entre les racines des plantes et le sol et rendent accessible un plus grand volume de sol aux plantes.

La fertilité biologique est l'aptitude du sol à améliorer la fertilité chimique et physique par l'action des organismes vivants du sol

L'ensemble des organismes vivants du sol contribuent à la dégradation de la matière organique qui entraîne la libération des éléments nutritifs nécessaires à la plante. Une fraction de la matière organique, facilement dégradable, participe à la fertilité du sol en nourrissant la biomasse microbienne qui elle-même participe à la nutrition des plantes en azote, phosphore... Une autre fraction dite « stable » a un rôle de structuration du sol.



L'équilibre du ratio entre dégradation et stabilisation de la matière organique détermine la fertilité biologique des sols.

Les organismes emblématiques de cette activité biologique sont les vers de terre dont la présence est un bio-indicateur de la fertilité du sol. Ils contribuent également à la stabilité de la structure du sol ou encore favorisent l'accès à l'eau et aux nutriments pour les plantes.

De plus, la fertilité du sol contribue à la protection des végétaux, à savoir qu'un sol fertile est un sol possédant une diversité importante d'organismes vivants qui peuvent aider à la régulation biologique de l'écosystème agricole.

L'activité biologique des sols influe la structure du sol et est encouragée par des pratiques telles que la rotation des cultures ou encore la mise en place de couverture végétale qui limite l'érosion en hiver.

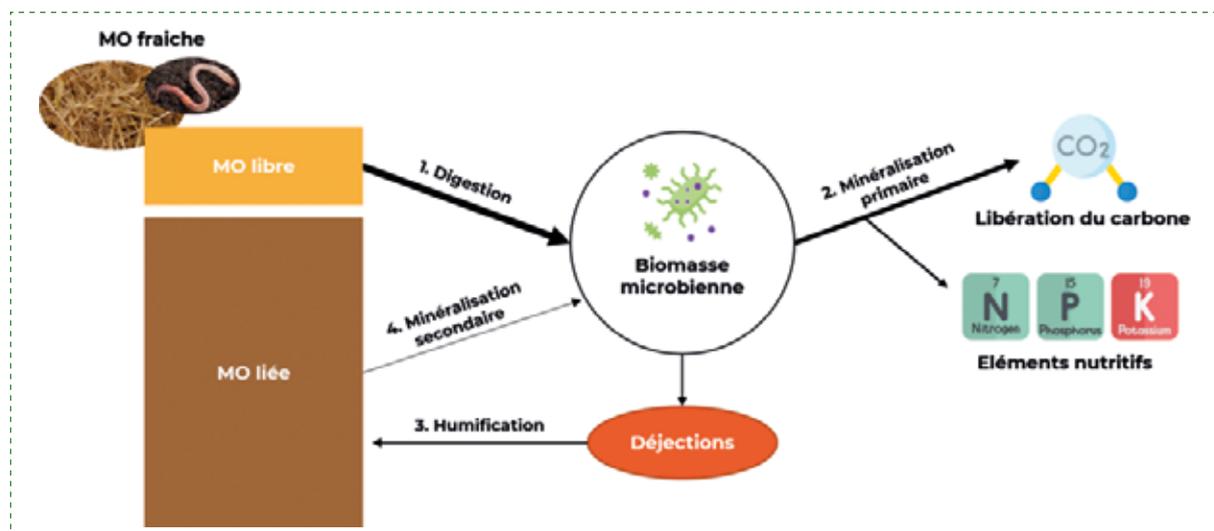
L'élément central : la matière organique

La matière organique (MO) est présente dans les sols sous différentes formes. Il y a d'une part les êtres vivants : racines des végétaux, micro-organismes (bactéries, champignons) et macro-organismes (vers de terre, insectes, etc.) ; et, d'autre part, les matières organiques mortes ou inertes : débris végétaux, déjections animales et microbiennes, colles biologiques, cadavres. C'est cette deuxième catégorie qui est considérée dans la mesure du taux de matière organique d'un sol.

Au sein de la matière organique, on différencie deux fractions : la matière organique libre et la matière organique liée. La matière organique libre (ou labile) est la nourriture des micro-organismes. En la consommant, ils vont libérer des éléments nutritifs pour les plantes. Cette MO est "fraîche", c'est à dire qu'elle n'a pas ou peu été transformée par d'autres organismes. La MO dite liée est le gîte, elle n'apporte pas de nourriture à la vie du sol mais confère au sol des propriétés structurantes et de stabilité à long terme et des propriétés d'échanges d'éléments minéraux. Ce sont les déjections de la biomasse microbienne lors de la digestion des MO libres qui créent cette fraction liée de la matière organique, appelée aussi humus. Cette MO est très liée aux matières minérales du sol et particulièrement aux argiles. Elle est donc très peu minéralisable au contraire de la matière organique libre. Les particules d'argiles et d'humus étant toutes deux chargées négativement, elles retiennent les cations (NH₄⁺, Ca⁺⁺, Mg⁺, K⁺, Na⁺...), éléments essentiels à la plante. Des échanges de cations ont lieu entre le complexe argilo-humique et la

solution du sol, ce que l'on appelle la capacité d'échange cationique (CEC). Plus elle est élevée, moins les cations seront lessivés : ils seront donc plus accessibles aux plantes.

Pour résumer, les MO libres apportent de la nourriture à la biomasse microbienne qui la minéralise en partie (libération de nutriments tel que l'azote et le CO₂) et dont les déjections viennent enrichir le sol en MO liée. La MO liée participe à la stabilité structurale à long terme du sol et à la CEC.



La matière organique joue un rôle fondamental dans la fertilité des sols. Il est admis qu'une augmentation du taux de matière organique améliore toutes les fonctions assurées par les sols (Pascal Boivin, 2018) :

- Porosité
- Rétention d'eau
- Aération
- Infiltration
- Portance
- Stabilité – résistance mécanique
- Activité
- Réserve de nutriments
- Biodiversité
- Thermique
- Epuration

Tous ces éléments expliquent pourquoi il est primordial de maximiser la production de biomasse végétale, puisqu'elle nourrit toute la chaîne trophique et qu'elle permet d'enrichir le sol en matière organique, favorisant ainsi sa stabilité structurale et le recyclage des nutriments.

La biodiversité : un outil de production

La biodiversité apporte de nombreux services aux cultures :

- pollinisation,
- prédation/parasitisme contre les ravageurs,
- décomposition de la matière organique,
- santé du système racinaire,
- fertilité biologique du sol.

La pollinisation

Près de 80% des espèces végétales, dont les arbres fruitiers, légumes, oléagineux et protéagineux dépendent des pollinisateurs pour assurer leur reproduction sexuée, dont découle la production de fruits et de grains.

Une étude (Garibaldi et al. 2014) a montré que lorsque la pollinisation est assurée uniquement par des abeilles domestiques (*Apis mellifera*), les rendements des cultures plafonnent à environ 30% de leur potentiel, et que la présence de nombreux pollinisateurs sauvages est indispensable pour atteindre le potentiel de rendement maximum. Les pollinisateurs sauvages (abeilles, guêpes, bourdons, mouches, coléoptères, papillons...) ont à la fois besoin de ressources florales diversifiées et disponibles tout au long de leur période d'activité et de sites de nidification (sol non perturbé pour certains bourdons, arbres, tiges creuses, abeilles, murets, etc...). Par ailleurs, certains insectes comme les syrphes, les chrysopes ou encore les coccinelles, sont pollinisateurs au stade adulte et prédateurs au stade larvaire. Ils ont donc également besoin de proies à certains moments de l'année.

La prédation et le parasitisme

Maintenir une biodiversité au verger vise à obtenir un équilibre dans les populations d'auxiliaires et de ravageurs pour contrôler les populations de nuisibles sous le seuil de nuisibilité.

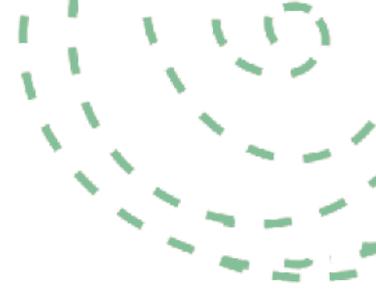
Deux exemples de ravageurs majeurs en arboriculture nécessitent un haut niveau de biodiversité pour être maîtrisés : les punaises et les pucerons cendrés.



© INRAE Jean-Claude Streito



© CTIFL GIRAUD M



Plusieurs leviers sont actionnables :

- maintenir les auxiliaires toute l'année dans le verger et intensifier leur présence,
- perturber les ravageurs.

Favoriser la biodiversité utile

Les aménagements paysagers (haies et alignements d'arbres, couverts végétaux fleuris, nichoirs à rapaces et chauve-souris, nids à mésanges, tas de bois et tas de pierres, mares et fossés...) peuvent avoir plusieurs rôles :

- habitat et site nourricier principal ou secondaire pour les auxiliaires,
- plante hôte pour proies de substitution pendant tout le cycle des auxiliaires,
- refuge,
- reproduction,
- repos pour l'hivernage.

Maintenir des plantes de services ou des aménagements paysagers dans ou autour des parcelles arboricoles va favoriser les auxiliaires et/ou gêner les ravageurs.

Auxiliaires	Ravageurs prédatés	Favorisés par
araignées	pucerons, cicadelles	structures pérennes
chrysopes	thrips, pucerons, acariens	carotte sauvage, trèfle blanc, chénopode (pollens consommés)
punaises prédatrices	thrips, pucerons, aleurodes	végétation dense et sèche (phacélie, bleuet, luzerne)
syrphes	pucerons	apiacées (carotte), astéracées (achillée millefeuille), fabacées
cécidomyies prédatrices	pucerons, chenilles	noisetier, chrysanthèmes, orties
coccinelles	pucerons, acariens, cochenilles	fêverole, luzerne, tanaïs
carabidés	limaces	corridor herbacé
vers luisants	escargots, limaces	
staphylin	limaces, larves	corridor herbacé
micro-hyménoptères	spécialisé	garder les plantes avec les momies, avoir des plantes relais (orties), plantes sources de nectar (luzerne), végétation dense et sèche (lamier, luzerne)

© Flor'insectes

Les vertébrés sont aussi des auxiliaires qui ont une grande importance dans la régulation des populations de ravageurs (hérissons, renards, chauve-souris, mésanges, etc.)

Quelques chiffres © Flor'insectes :

- Le hérisson consomme 50g par nuit d'invertébrés divers (limaces, escargots, larves...).
- Le renard consomme près de 3000 campagnols par an.
- La chauve-souris mange environ 3000 insectes par nuit (carpocapses, tordeuses, moustiques...).



**L'agroécologie :
par où commencer ?**

En pratique, il s'agit toujours de trouver le bon compromis entre production et préservation du sol et de l'écosystème. Il est recommandé de tester des pratiques sur de petites surfaces et de s'assurer de les maîtriser avant de les déployer. Se former et consulter des retours d'expérience d'agriculteurs (1, voir p.31) sont autant de facteurs clés de succès pour réussir sa transition vers l'agroécologie.

Faire un diagnostic

L'Indice de Régénération

Pour se positionner, identifier ses leviers de progression et rendre visible les bonnes pratiques agroécologiques, l'association Pour une Agriculture du Vivant a créé un outil : l'Indice de Régénération (2, voir p.31).

Véritable boussole agronomique reconnue scientifiquement, l'Indice de Régénération est construit sur 5 axes qui couvrent le sol, le paysage en passant par la plante.

Il mesure objectivement et rapidement la progression des fermes dans leur diversité, sans juger des techniques, des moyens et des outils de production.



	Grandes cultures	Arboriculture & Viticulture
Intensité de travail et couverture du sol	/ 36 pts	/ 40 pts
Taux annuel de couverture du sol Type et nombre de passage d'outils		
Cycles du carbone et de l'azote	/ 24 pts	/ 24 pts
Rapport taux de matière organique / taux d'argile Entrées annuelles de Carbone Formes de fertilisation azotée		
Gestion Phytosanitaire	/ 15 pts	/ 16 pts
Indice de Fréquence de Traitement Stratégies de réduction de l'IFT		
Biodiversité et Agroforesterie	/ 20 pts	/ 16 pts
Infrastructures de biodiversité Diversité cultivée Projets agroforestiers et entretien des haies		
Acquisition et partage de connaissances	/ 5 pts	/ 4 pts
Formation agronomique / Participation à des groupes d'échange et de progrès		



Le test bêche

Le test bêche a pour objectif d'évaluer rapidement la structure d'un sol et son activité biologique sur le terrain. Il est basé sur la caractérisation de la structure du sol via l'assemblage et l'état interne des mottes de terre. Cette caractérisation se fait à l'aide d'un prélèvement à la bêche d'une motte de sol, en conditions ni trop sèches, ni trop humides, puis d'une analyse des agrégats sur une bâche. Le diagnostic (3, voir p.31) permet de classer la structure du sol en 5 classes, en fonction de son degré de compaction.

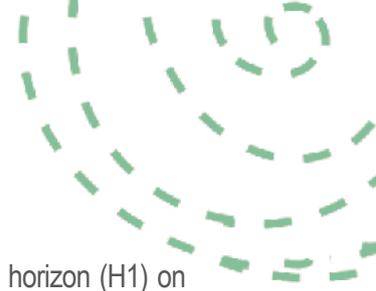
Qualité de la Structure	Apparence générale	Taille	Racines	Porosité Visible*	Apparence après extraction : même sol mais travail du sol différent	Traits distinctifs	Apparence des agrégats* ou fragments* de ≈ 1.5 cm de diamètre	
Sq1 Friable Agrégats* se désagrègent très facilement avec les doigts	Pas de motte fermée*	La plupart des agrégats* < à 0.6 cm.	Les racines colonisent l'ensemble du bloc : les racines sont bien présentes à l'intérieur et autour des agrégats*	La plupart des agrégats* sont TRES poreux		Agrégats* très fins et poreux	 Agrégats* très poreux, composés de plus petits maintenus ensemble par les racines. Ils sont pour la plupart directement obtenus lors de l'extraction du bloc.	
Sq2 Intact Agrégats* se désagrègent facilement entre les doigts		Mélange d'agrégats* arrondis de 2mm à 7cm		La plupart des agrégats* sont poreux.		Forte porosité des agrégats*	 Agrégats* arrondis, fragiles, poreux qui se cassent facilement.	
Sq3 Ferme La plupart des agrégats* se désagrègent facilement entre les doigts	Présence possible de mottes fermées*	Mélange d'agrégats* de 2 mm-10 cm. Moins de 30% <1cm.		Présence possible de pores grossiers visibles* et de fentes de retrait*		Faible porosité des agrégats*	 Agrégats* avec peu de pores visibles et plutôt arrondis.	
Sq4 Compact Assez difficile de briser les mottes fermées* avec une seule main	Principalement mottes fermées* sub-angulaires	moins de 30% des mottes sont de taille <7cm ; structure lamellaire possible.		Pas ou peu de racines à l'intérieur des fragments*. Les racines présentes sont concentrées autour des mottes fermées, dans les « pores grossiers visibles »* et les fissures*	Peu de « pores grossiers visibles »* et peu de fissures*		Racines dans les pores grossiers visibles*	 Ces fragments* de forme cubique à bords anguleux et fissures internes sont faciles à obtenir sur sol humide.
Sq5 Très Compact Très difficile de briser les mottes fermées* avec la main	Principalement mottes fermées* angulaires	mottes angulaires >10cm, très peu de taille <7cm.		Très peu de « pores grossiers visibles »* et de fissures*. Anoxie* possible.	Très peu de « pores grossiers visibles »* et de fissures*. Anoxie* possible.		Couleur gris-bleu possible	 Ces fragments* à bords anguleux peuvent être difficiles à obtenir même sur sol humide.

© INRA & HEPIA

Suite au diagnostic, différentes actions peuvent être entreprises pour faciliter l'activité biologique à recréer une structure ou prendre des décisions mécaniques (en cas de tassement, une décompaction mécanique est souvent nécessaire). Si une problématique est identifiée, des analyses plus approfondies comme un profil cultural peuvent être envisagées.

Sur cette motte extraite du sol et disposée sur la bâche, on observe clairement 3 horizons. Dans le 3^{ème} horizon (H3), aucune racine n'est présente. Un problème de compaction est identifié. Il faudra alors entreprendre des actions de décompaction et limiter à l'avenir des interventions qui pourraient reproduire la même situation.





Le même test bêche avec les mottes triées par état de compaction montre que dans le 1^{er} horizon (H1) on observe une majorité de mottes gamma indiquant une bonne structure et porosité créées par l'action du système racinaire. Dans le 2^{ème} horizon (H2) la proportion de mottes compactées est plus importante ce qui impacte négativement la prospection racinaire de l'enherbement. Cependant, certaines mottes compactées commencent à retrouver une porosité grâce à l'activité biologique favorisée par les vers de terre ou les racines.

Le comptage de vers de terre

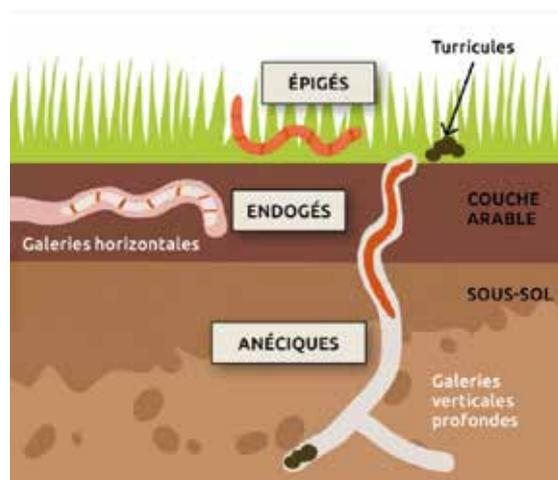
Les vers de terre digèrent et brassent la matière organique, leurs galeries favorisent l'aération du sol, la circulation de l'eau et la prospection racinaire. Ils sont par ailleurs sensibles aux perturbations induites par les activités humaines. Ils sont donc d'excellents indicateurs de la santé d'un sol !

L'objectif du comptage de vers de terre est d'observer, comprendre et estimer l'impact des pratiques agricoles sur la biodiversité du sol.

Réalisation du comptage (janvier à avril) :

1. Prélever sur sol ressuyé (ni gelé ou en dégel, ni saturé en eau, ni trop sec).
2. Compter les vers issus du test bêche (cf ci-dessus).

! Ordre de grandeurs ! Sur la période 2005-2015, l'abondance lombricienne moyenne en France métropolitaine est de 264 individus / m² (Université de rennes1, UMR 6553 EcoBio, 2015)



1 à 5 cm - rouge sombre
en surface et dans les amas organiques
peu ou pas de galeries
Rôle : fractionnement de la matière organique

1 à 20 cm - rouge à gris clair
galeries temporaires horizontales
Rôle : créent la structure grumeleuse nécessaire à la rétention et l'infiltration de l'eau

10 à 110 cm - rouge, gris clair, brun avec gradient
occupent l'ensemble du profil - creusent des galeries permanentes
Matière organique récupérée la nuit en surface et enfouie dans les galeries. Rejettent les déjections en surface (turricules)
Rôle : brassage et mélange des matières organiques et minérales

Carence	Moyen	Abondance
Peu ou pas de galeries < 150 individus/m ² (<6 ind. / test bêche)	Quelques galeries de 150 à 300 individus/m ² (de 6 à 12 ind. par test bêche)	Nombreuses galeries > 300 individus/m ² (>12 ind. par test bêche)

Analyses de sol et de plantes

Analyse physico-chimique - (€ à €€)

L'analyse physico-chimique comporte en général une analyse de la granulométrie (argiles, limons et sables), du pH, de la capacité d'échange cationique et de la teneur en différents éléments : carbone

organique, azote total, calcaire, phosphore, potassium, calcium, sodium, et oligo-éléments. Cette analyse permet de caractériser les potentialités du sol en termes de réserve en eau et en éléments nutritifs.

Afin d'assurer une représentativité de la parcelle voici le plan de prélèvement à respecter :

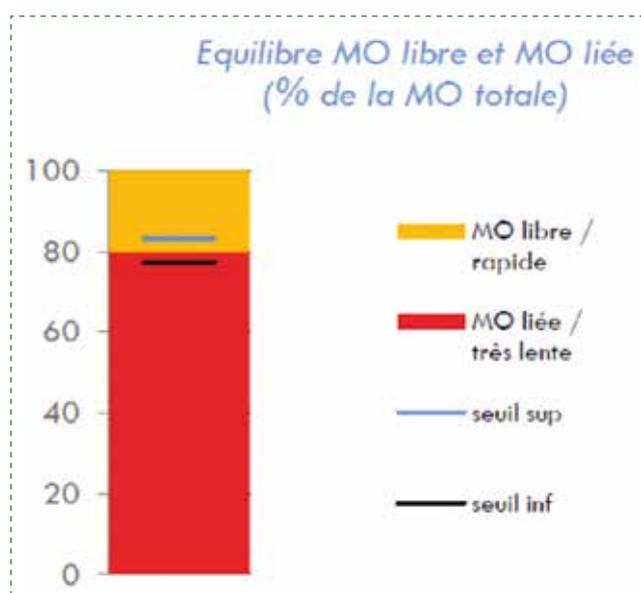
- **20 prélèvements** minimum sur **2-20cm de profondeur** ^{25 min}
- Répartition homogène des prélèvements sur la parcelle selon les **diagonales** ou selon **deux lignes parallèles****



© HEPIA, Agrigenève

Analyses biologiques - (€€€)

Les analyses biologiques caractérisent la matière organique des sols et leur dynamique. Les principales analyses biologiques réalisées en routine permettent notamment de situer le rapport entre les matières organiques libres et liées dans le sol. Cela permet de raisonner les apports de MO. Ci-dessous, le sol est équilibré entre matière organique libre et liée. Si le sol manque de MO libre, la biomasse microbienne sera faible et le recyclage des nutriments risque d'être mauvais. En cas de déficit en MO liée, l'habitat du sol n'est pas optimal pour accueillir les micro-organismes. Ce déficit pénalise particulièrement le fonctionnement du sol en sécheresse ou en excès d'eau car la MO liée agit comme un tampon climatique. Tout est histoire d'équilibre !



© Celesta Lab

Analyses de sève - (€ à €€)

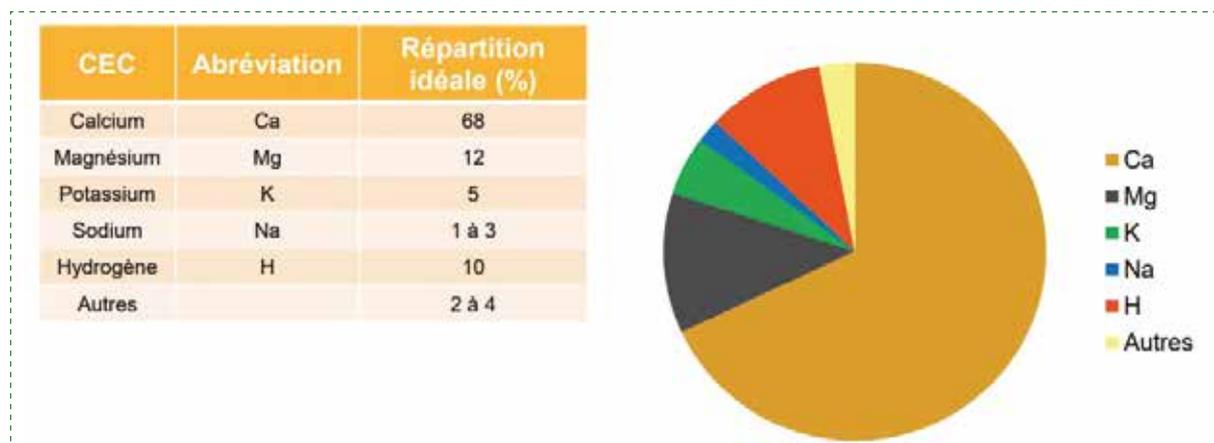
Les analyses de sèves permettent d'identifier les carences ou excès en éléments nutritifs au cours de la croissance de la plante. On la compare à une analyse de sang, elle situe l'état de la plante à un instant T. Il est possible de corriger les déséquilibres en apportant des éléments en foliaire.

Corriger les déséquilibres

Equilibres chimiques

Les propriétés biologiques et physiques du sol sont conditionnées en partie par les équilibres chimiques du sol. Afin de restaurer la fertilité des sols, il est important de se pencher sur ces équilibres. Le pH ne suffit pas pour piloter la fertilité chimique des sols. Il permet seulement d'informer sur l'acidité du sol, et donc sur la capacité d'absorption des nutriments (4, voir p.31) :

Afin de piloter les amendements, il est important d'analyser la répartition des cations sur la CEC. Le magnésium (Mg) agissant comme une "colle" sur les argiles, et le calcium (Ca) donnant de l'aération au sol, le rapport Ca/Mg est essentiel à surveiller pour favoriser le rapport air/eau optimal. Plus le sol sera doté en argile, moins il faudra de magnésium.

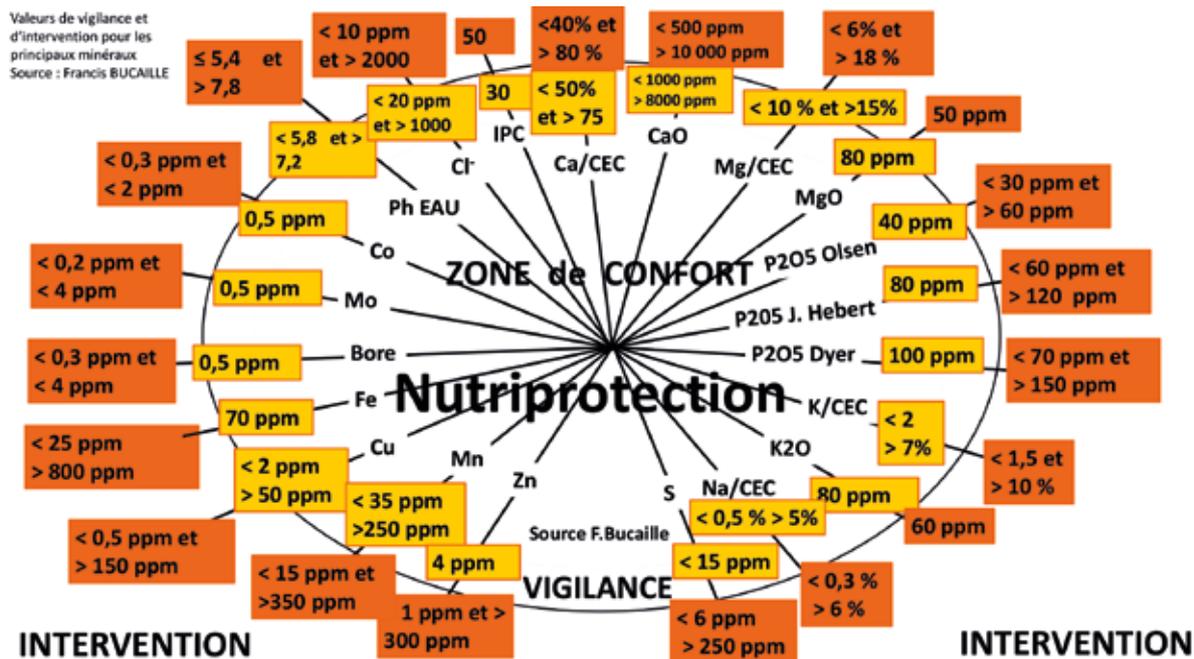


Source : William Albrecht (1888-1974)

En résumé, voici quelques règles à respecter pour corriger les équilibres minéraux du sol :

1. Équilibrer le ratio Ca/Mg.
2. Ajuster les éléments K⁺ et Na⁺.
3. Veiller au taux de soufre et de phosphore.
4. Corriger les oligo-éléments.

A partir de certains seuils résumés dans le schéma ci-dessous, il sera nécessaire d'intervenir. Par exemple, le rapport Ca / CEC est optimal entre 50% et 75%. S'il devient < 40% ou > 80%, il faudra venir le corriger par des apports.



© Francis Bucaille

Choix des amendements organiques

La matière organique (MO) est un pilier essentiel pour assurer la fertilité et la résilience d'un sol. On peut améliorer le taux de MO par plusieurs moyens :

- la mise en place de couverts végétaux,
- des apports de MO exogènes.

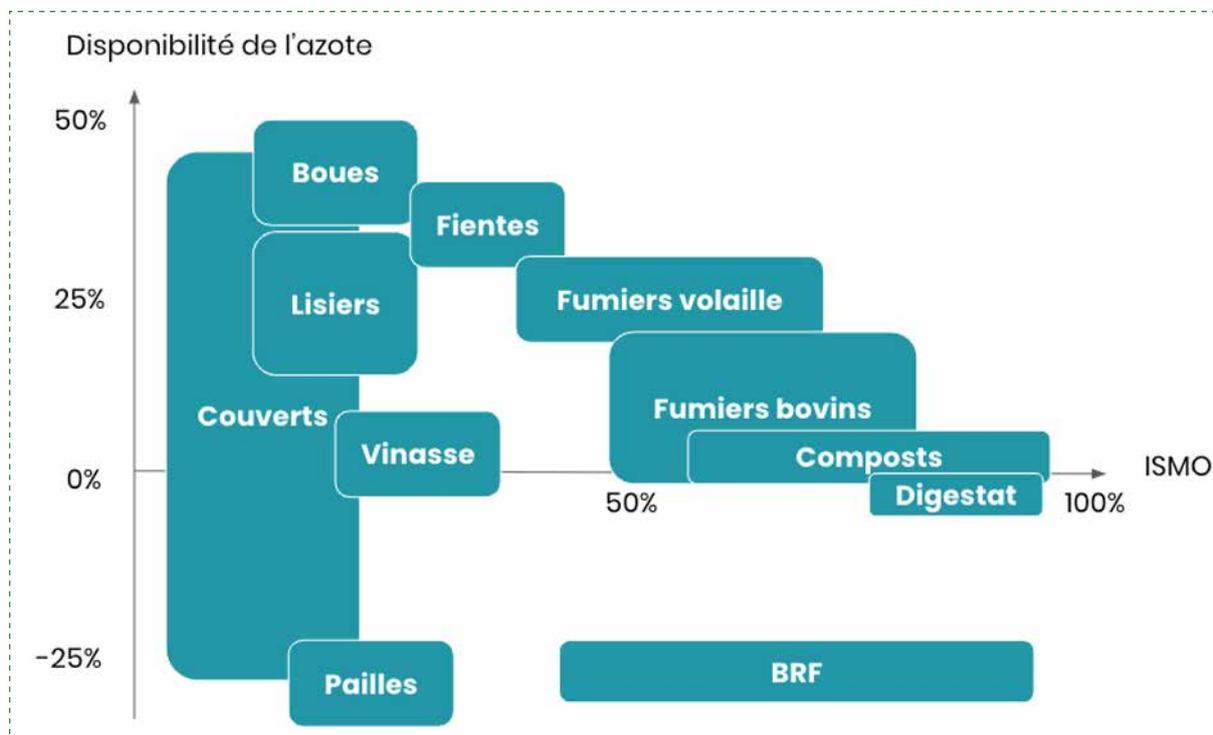
Il faut alors choisir le type de MO apporté selon ses objectifs.

On distingue 2 types d'apports de MO exogène : ceux qui ont un rôle d'amendement (compost, broyat de déchet vert, etc.) et ceux qui ont un rôle fertilisant (digestat, lisier, fient, etc.).

Afin de caractériser les apports organiques, il y a 2 indicateurs : le C/N et l'ISMO.

- Le C/N est le rapport entre la quantité d'azote et de carbone présent dans le produit organique. Si le rapport C/N est de 25, cela signifie qu'il contient 25 fois plus de carbone que d'azote. Le rapport C/N conditionne la rapidité à laquelle l'azote du produit sera disponible aux cultures. En effet, plus il y a de carbone, plus la biomasse microbienne aura besoin d'azote pour le digérer.
- L'ISMO est l'Indice de Stabilité de la Matière Organique. Il permet de caractériser la fraction facilement dégradée de la MO apportée. Plus la MO est fraîche (= non transformée), plus l'ISMO est faible. C'est le cas des fientes, lisier, etc. Au contraire, les MO qui ont été digérées par des micro-organismes sont très stables et n'apportent pas à manger à la vie du sol. Elles ont un ISMO élevé (compost, digestat, etc.) et améliorent la fraction liée de la MO du sol.

Une analyse de fractionnement de la MO du sol permet d'identifier les besoins du sol. En résumé, si un sol manque de MO libre, il faut apporter des composés très digestibles, des MO fraîche (fientes, lisiers et surtout débris végétaux de cultures et de couverts). En revanche, si le sol manque de matière organique liée, il faudra se tourner vers des apports de MO stable (compost, broyats de déchets verts, etc.).



© Celesta-Lab

Équilibres biologiques

Le ratio champignon/bactérie conditionne le devenir des matières organiques dans les sols et donc la séquestration du carbone et le transfert de nutriments vers la plante. Dans un sol de forêt, il y a 60% de champignons et 40% de bactéries. Dans nos sols cultivés il y a seulement environ 10% de champignons. Cela est dû aux faibles apports de matière organique riche en carbone, à la forte aération des sols par le travail mécanique qui booste l'activité des bactéries et détruit les réseaux mycorhizien des champignons, et au fait de laisser le sol nu pendant les intercultures, car les champignons sont extrêmement sensibles à l'exposition aux UV et à la sécheresse.

Dans l'idéal, il faudrait arriver à équilibrer ce ratio pour aboutir à 50% de champignons et 50% de bactéries.

Un couvert végétal « jeune » (avant floraison), avec un C/N encore assez bas, aura pour conséquence d'activer la microbiologie du sol (principalement les bactéries). A contrario, un couvert végétal « plus mûre » (fin floraison ou après floraison), avec un C/N plus élevé, aura pour conséquence de nourrir plus de champignons et les lombrics.



**Agroécologie
& arboriculture**

Itinéraire de replantation de verger

Les problématiques de sol avant verger ou entre deux plantations sont souvent les mêmes : manque de matière organique, activité biologique faible et souvent déficiente (« fatigue de sol »), compaction etc.

Entre 2 plantations d'arbres, il n'est pas rare d'avoir 2 à 3 ans de "repos" des parcelles. Comment mettre à profit ce temps là pour régénérer les sols ?

- implantation de couverts végétaux,
- apport massif de matière organique,
- travail du sol dans de bonnes conditions.

Couverts végétaux : le choix des espèces

Pour les couverts végétaux avant plantation, il s'agit pour l'agriculteur de choisir selon la panoplie des espèces disponibles :

- les graminées (seigle forestier, sorgho fourrager, avoine) pour enrichir le sol en carbone,
- les légumineuses (vesce, pois fourrager, féverole) pour enrichir le sol en azote,
- les crucifères (navette fourragère, radis fourrager, moutarde) pour lutter contre les nématodes,
- les composées, comme le tournesol, ou d'autres espèces comme la phacélie, pour nourrir la biodiversité qui sera intéressante pour le verger.

Exemples de mélanges selon les saisons :

Sortie d'hiver	Radis fourrager + vesce velue (€)
Printemps	Mélanges Biomax 12 espèces (€€€) ou Avoine de printemps + pois fourrager + vesce velue (€)
Fin de printemps	Sorgho fourrager + vesce velue (€)
Automne	Seigle fourrager + vesce commune + féverole + moutarde brune (€€)



Couvert pré-plantation radis-vesce semé en novembre 22 et photographié en mai 23

Le choix des amendements organiques

Avant replantation, il est souvent nécessaire de faire un apport massif (>100t/ha) avec un mélange de différentes matières :

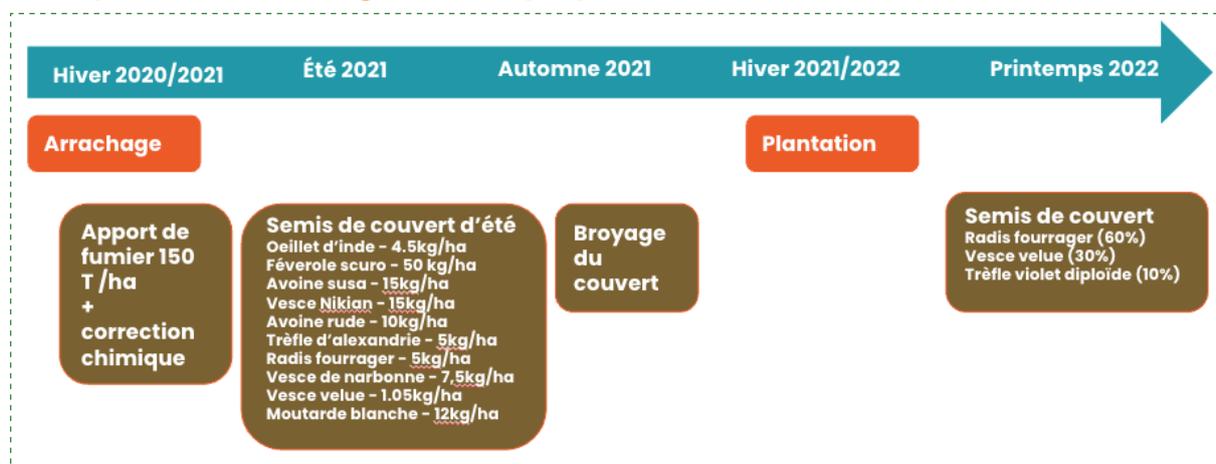
- les matières carbonées comme le BRF (Bois Raméal Fragmenté) ou le broyat de déchets verts pour activer les micro-organismes du sol,
- les matières azotées comme le fumier pour éviter la faim d'azote liée à l'apport de beaucoup de carbone,
- les matières stables comme le compost ou le digestat.

Ces mélanges de matières organiques sont à définir en fonction des analyses de sol et du taux de matière organique cible souhaité.

Travail du sol dans de bonnes conditions

Pour maximiser la régénération des sols durant cette période de "repos" entre 2 plantations, il est impératif de limiter le passage d'engins agricoles en conditions humides. Parfois, décaler la date de plantation peut s'avérer judicieux. Le mois de septembre est généralement une bonne période : ni trop sèche, ni trop humide.

Exemple d'itinéraire régénératif : proposé dans le sud-ouest de la France



Améliorer sa gestion des inter-rangs

L'arboriculteur doit choisir ses espèces selon ses objectifs :

- Restituer du carbone dans le sol, source d'énergie,
- Favoriser la biodiversité auxiliaire.

Maximiser les apports de carbone grâce à l'inter-rang de mon verger

La première étape est d'identifier les moments sans passage d'engins pour permettre l'implantation de couverts annuels.

Pour les couverts d'hiver, généralement, le semis peut s'effectuer après la date de récolte, la destruction interviendra fin mai/début juin afin d'obtenir une biomasse suffisante. Attention cette période dépend de la variété et des interventions qui peuvent être différentes (récolte par exemple).



Couvert d'hiver en inter-rang de pommiers (féverole, vesce, Seigle), prise de vue début juin 2023



Couvert d'été en inter-rang de pommiers (Sorgho Piper, Vesce, Tournesol) prise de vue août 2022.

Exemple d'itinéraire de couverts végétaux annuels en pommier :



Favoriser la biodiversité auxiliaire

Pour favoriser la biodiversité utile, il est préférable d'avoir des inter-rangs fleuris en automne et en mars pour assurer de la nourriture aux syrphes, parasitoïdes, chrysopes et coccinelles.

Semis des couverts végétaux

Les trois principes clés de la réussite du semis de couvert végétal sont :

- la préparation du sol,
- la disponibilité de l'eau,
- la densité de semis.

La préparation du sol

Elle doit garantir un lit de semence qui présente suffisamment de terre fine pour assurer un bon contact terre-graine et une bonne pousse des premières racelles. Le sol doit également être exempt de semelle de travail ou d'une zone plus largement compactée.

En effet, il est souvent visible à 15-25 cm de profondeur une zone plus compacte en inter-rang en arboriculture, qui est préjudiciable à la croissance racinaire du couvert et donc à sa production de biomasse.

Le passage d'un outil à dents en conditions ressuyées, type décompacteur, pour passer sous la zone compactée afin de créer la porosité mécanique nécessaire au passage des racines du couvert sera alors nécessaire.

La disponibilité de l'eau

L'eau est une ressource essentielle à la croissance du couvert. Cependant, un semis en période trop humide peut avoir des répercussions défavorables sur le couvert (les racines qui baignent, une croûte de battance qui se forme etc). Il est donc important de passer en conditions ressuyées pour éviter ces risques.

De plus, la levée du couvert doit être sécurisée. Semer dans un sol frais garantit la levée. Si le sol est sec, prévoir de semer avant la pluie. Enfin, si le sol est sec et qu'aucune pluie n'est prévue, il est préférable de sécuriser la levée par un tour d'irrigation, ou bien de repousser le semis plus tard dans la saison si vous n'avez pas de possibilités d'irrigation.

La densité de semis

Elle est déterminante sur plusieurs aspects : le rendement de biomasse, l'équilibre des fonctions du couvert (apport de carbone, d'azote, ressource pour la biodiversité, tuteur pour des espèces grimpantes etc), la propreté du couvert. Pour cela, il faut réfléchir à la densité de semis en fonction du nombre de pieds par hectare souhaités et du poids des mille grains (PMG) de chaque espèce. Il faut compléter cette donnée avec le type de sol et la saison de semis.



En effet, il faudra parfois par exemple augmenter les densités de semis de 10 à 15% sur sol battant ou si on sème tardivement dans l'automne.

Photo : Autoconstruction d'un semoir direct par un groupe d'agriculteurs pilote du projet PACHAMAMA.

Prix total de l'équipement : 5 000€



Destruction des couverts végétaux

Il existe 3 modes de destruction de couverts végétaux : le broyage, le roulage, le fauchage.

1/ le broyage : il permet de bien nettoyer la parcelle et facilite l'intégration du couvert au sol et donc facilite un semis futur. L'inconvénient est qu'il fait perdre beaucoup d'eau au couvert.

2/ le roulage et le fauchage : ces deux techniques ont l'avantage de créer un mulch et donc d'éviter les repousses ainsi que l'évaporation du sol. Cependant, ces techniques peuvent rendre plus difficile un éventuel semis futur si vous ne disposez pas du bon matériel.

La destruction (stade et méthode) doit intervenir en fonction des objectifs fixés notamment avec l'analyse de sol et la qualité des matières organiques.

Coupler le stade de destruction et la méthode de destruction permet ainsi de bien orienter l'objectif de son couvert pour piloter ses performances et ce que l'on en attend.

Aménager des infrastructures paysagères favorables à la biodiversité utile

Haies

Pour bien choisir ses essences, il faut respecter ces 5 règles :

- préférer des essences locales adaptées au sol et au climat,
- éviter les hôtes de ravageurs. En verger de pommier, il vaut mieux éviter les pommiers, les aubépines, les amandiers, les pruniers ainsi que les rosacées, les cognassiers et les chênes qui peuvent abriter les tordeuses,
- éviter les familles proches des espèces cultivées,
- maximum 10-15 espèces différentes.

Lisières de haies

Quant aux bordures de haies, il est préconisé :

- une largeur de 50cm à 2m,
- une fauche en alternance afin de conserver habitats et nourritures pour les auxiliaires,
- une flore adaptée au sol et au climat - fougère et plantes à floraison précoce au Nord et plantes des prairies au Sud.

Bandes fleuries autour des parcelles

Le choix des bandes semées va s'adapter aux auxiliaires à favoriser et se raisonne de la même manière que dans les inter-rangs.

Le pâturin des prés, la vesce, la stellaire, le fenouil, la bourrache, la mauve, le sarrasin, la sauge, le coquelicot sont autant d'espèces qu'il peut être intéressant d'avoir à proximité des arbres en production.

Exemples d'aménagements en verger de pommiers

- inter-rang fleuris en automne et en mars pour les auxiliaires : syrphes, parasitoïdes, chrysopes et coccinelles. Il peut être à base de mélilot blanc, caryophyllacées, moutarde, alysse, achillée, carotte, sarrasin, cosmos, rudbeckia, tanaïsie,
- luzerne en bordure ou inter-rang en automne pour favoriser les parasitoïdes du puceron et de la punaise,
- mauve et orge qui sont des plantes hôtes de proies de substitution pour les parasitoïdes du puceron cendré,
- haies à base de noisetier, charme et laurier-tin.

Exemple de mélange d'inter-rang attractif pour la biodiversité auxiliaire:

Espèce	Densité
Luzerne	25 kg
Sainfoin	10 kg
Achillée millefeuille	100 g
Camomille	100 g
Trèfle incarnat	500 g
Moutarde	1 kg
Mélilot	2.5 kg
Mauve	1.5 kg
Lin des Alpes	300 g
Sauge	500 g



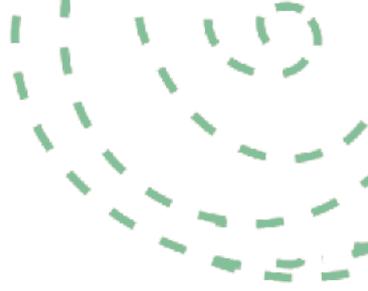
Bande fleurie implantée au printemps.

Itinéraire technique :

1/ Rotovateur "scalpeur" (5cm de profondeur).

2/ Semis à la volée.

3/ Rouleau de rappui.



Quelques résultats clés sur la biodiversité

Dans le cadre du projet Pachamama, plusieurs études biodiversité ont été conduites dont la réalisation de relevés entomologiques et une analyse pollinique pour étudier respectivement la présence d'auxiliaires et leurs comportements alimentaire.

Principaux résultats

- la flore spontanée environnante joue un rôle évident dans l'attraction et l'alimentation des syrphes adultes, notamment le coquelicot,
- le couvert semé a également permis d'attirer des syrphes mais celui-ci ne représente pas une part importante de leur alimentation (hormis la moutarde),
- il semble y avoir une corrélation entre hauteur du couvert et quantité d'auxiliaires présents dans les parcelles. Des hauteurs de couverts supérieures à 40-50 cm semblent favoriser la présence des auxiliaires,
- la diversité en auxiliaires relevée est interdépendante d'une certaine diversité en essences végétales dans les couverts végétaux.

Perspectives

- Le maintien des couverts végétaux jusqu'à la fin de l'automne et tout au long de l'hiver semble important afin de conserver à la fois les populations de pucerons et d'auxiliaires actifs comme les Hyménoptères parasitoïdes et les araignées, mais aussi d'éviter toute dégradation du sol (passage mécanique, semis, fauche, etc.) pour conserver les populations hivernantes dans le sol (œufs, larves ou pupes).
- Pour améliorer le potentiel de régulation des ravageurs par la biodiversité utile, il serait intéressant d'ajouter de nouvelles espèces de plantes à fleur, notamment des apiacées qui sont réputées pour attirer un grand nombre d'espèces de syrphes. On peut citer certaines espèces attractives pour les syrphes : fenouil, carotte, chicorée, achillée millefeuille, marguerite, bourrache, cerfeuil, aneth, bleuet, centaurée jacée, millepertuis, coquelicot, mauve...
- Il n'est pas nécessaire de mettre des plantes très mellifères (comme le trèfle incarnat) en grande proportion, pour ne pas que d'autres pollinisateurs plus voraces fassent trop concurrence aux syrphes.
- Mettre en place un système de rotation dans les rangs entre semis, fauche, labour, etc. Par exemple, effectuer un semis sur 30% des rangs tous les ans afin d'accomplir la rotation dans l'ensemble de la parcelle tous les 3 ans. Ce système permet de conserver dans de bonnes conditions une majorité du couvert végétal dans le temps.

A photograph of a wheat field at sunset. The sun is low on the horizon, creating a warm, golden glow. In the foreground, several wheat stalks are in focus, showing their grain heads. A dashed white spiral graphic is overlaid on the image, centered behind the text.

**Agroécologie en grandes
cultures et productions
légumières**

Choisir ses couverts végétaux

Choix des espèces

Dans la majeure partie des situations et dans une optique de maintien de la productivité, le sol a besoin d'apports de MO facilement digestible et qui ne mobilise pas trop d'azote pour la dégradation. C'est pourquoi on considère que les couverts végétaux doivent avoir un C/N compris entre 15 et 20.

Pour obtenir un tel C/N, il faut peu de graminées dans le couvert et le détruire au moment de la floraison. Le choix d'espèces tardives est important, puisqu'elle permet de détruire les couverts plus tard dans la saison. Voici quelques caractéristiques des principales espèces de couverts végétaux :

Graminées : apport de sucre au sol, capacité d'étouffement fort et système racinaire puissant. Attention à la gestion des repousses dans les cultures et des résidus souvent très carbonés.

Crucifères : Adaptées aux conditions sèches, facilité d'implantation, système racinaire pivotant et potentiel de biomasse important. Attention à la montée à fleur.

Légumineuses : fixation d'azote atmosphérique, systèmes racinaires diversifiés, dégradation rapide des résidus. Attention à la lenteur d'implantation.

Nyger, tournesol : effet structure, plante d'été par excellence, facile à détruire et gélif.

Phacélie : crée une structure très grumeleuse sur 10 cm, végétation "bouche-trou" et facilité de destruction.

Lin : germe facilement, pousse bien en conditions sèches et peu sensible aux limaces. Il n'est pas couvrant, à associer à d'autres espèces.

Sarrasin : Très adapté aux conditions d'été, germe facilement, fort pouvoir couvrant, effet allélopathique. Attention à la montée à graine dans les cultures de printemps.

Quelques conditions de réussite des couverts végétaux

1. Diagnostiquer la structure : une racine n'est pas un marteau piqueur. Si des traces de compaction sont présentes, il faut décompacter puis semer.
2. Ne pas dessécher le sol : un sol déchaumé évapo-transpire environ 4 mm/jour alors qu'un sol laissé en chaume évapo-transpire 0,6 mm/jour.
3. Être rapide à l'implantation : semer le plus tôt possible après la moisson. Respecter la règle "je travaille -> je sème" lorsque les conditions sont sèches. Le faux semis n'aura d'intérêt que lorsque les conditions d'humidité sont présentes.

Destruction du couvert végétal

La phase de destruction des couverts végétaux peut-être délicate, surtout avant les cultures de printemps. Pour rappel, voici les points clés d'une bonne destruction :

- conserver la porosité biologique du sol créée par le couvert,
- éviter les montées à fleur pour limiter l'augmentation du C/N,

- protéger les sols et nourrir la vie du sol pendant l'hiver,
- adapter la technique au contexte pédoclimatique de l'année : il n'y a pas de recette,
- favoriser les solutions mécaniques et économiques : faire avec les moyens du bord.

Afin de mesurer les résultats de son couvert végétal, la méthode MERCI peut être utilisée. Elle est disponible sur internet et permet de quantifier les éléments nutritifs restitués par le couvert.

Choisir son matériel

Lors de la transition vers l'agroécologie, plusieurs outils peuvent être utiles. Voici quelques exemples :



Le semoir de semis direct qui peut être à dents ou à disques.

A savoir que le semoir à dents permet de mieux réchauffer le sillon mais perturbe plus la surface du sol que le semoir à disques. Le semoir à disques est souvent plus efficace que le semoir à dents en été, puisque sa force de pénétration est supérieure et qu'il n'enfouit pas de paille dans le sillon.



Certaines cultures sont plus sensibles au réchauffement du sillon ou à la qualité du lit de semence que d'autres. C'est souvent le cas des cultures de printemps, qu'il convient de sécuriser au vu des coûts d'implantation. Il y a alors possibilité de s'équiper d'un strip-till, outil qui travaille le sol sur la ligne de semis seulement, qui peut être utilisé en amont du semis ou en combiné avec le semoir.



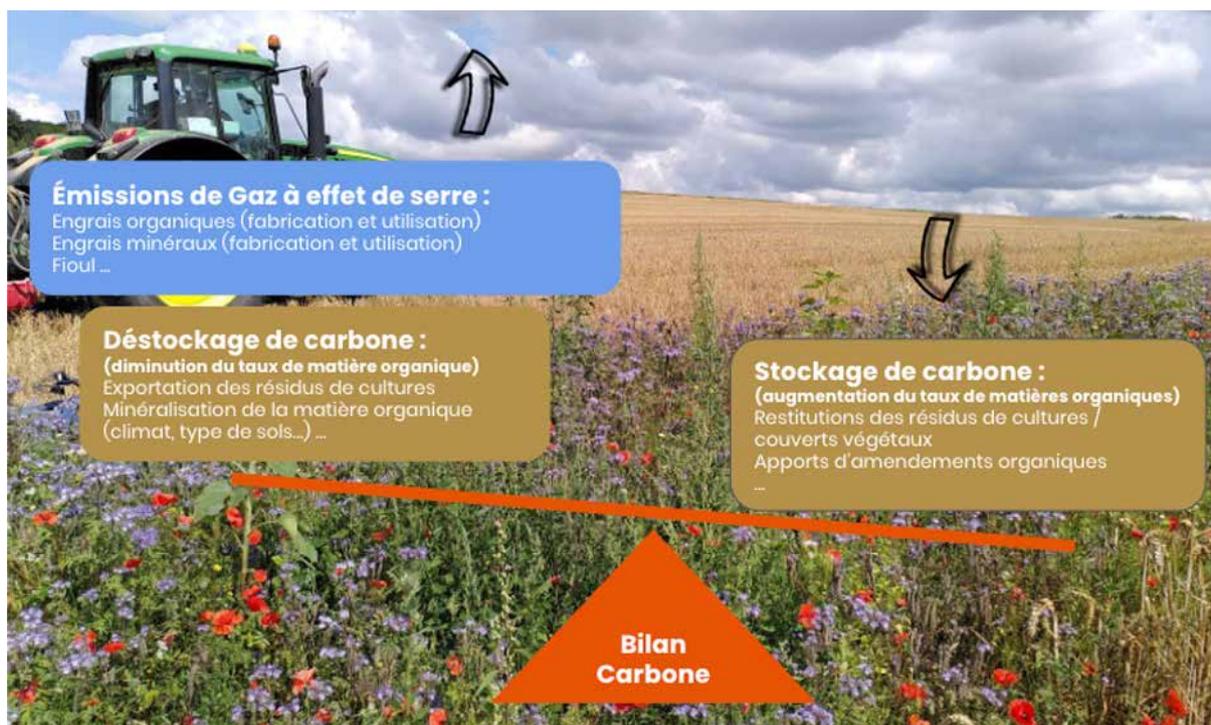
Le rouleau faca est utilisé pour détruire les couverts végétaux, soit durant l'hiver lors du gel pour les cultures de printemps, soit juste avant le passage de semoir pour les cultures d'automne. Il permet de réduire l'usage d'herbicide lors de la destruction des couverts végétaux

Résultats clés sur le Carbone

Carbone & Agroécologie

En agriculture, un bilan carbone c'est une balance entre des sorties de carbone et des entrées de carbone.





Pour une Agriculture du Vivant a conduit une étude sur 51 fermes en grandes cultures de la moitié Nord de la France afin de mieux comprendre les dynamiques carbone sur les fermes en agroécologie (6, voir p.31).

Ces résultats sont mis en perspective avec une autre étude Carbon Think conduite par Terrasolis et Agrosolutions auprès de 88 fermes dans le Nord Est de la France.

	Carbon Think (88 fermes)	BDC Ademe (24 fermes)	CISV IR < 60 (19 fermes)	CISV IR > 60 (9 fermes)
Emissions GES	3,28	3,08	4,3	3,2
Stockage de C	-0,08	-0,11	0,4	1,5
Bilan C net	3,36	3,18	3,9	1,8
Indice de Régéné- ration moyen	NA	41	50	71

Cette étude met en évidence 2 résultats clés :

- Premièrement, les émissions de gaz à effet de serre augmentent sur les fermes en transition (IR <60), puis diminuent par la suite.

En début/milieu de transition, les agriculteurs tendent à apporter davantage de MO pour nourrir la vie du sol et/ou en améliorer la structure tout en maintenant les niveaux de fertilisation azotée minérale. Aux émissions de GES liées à la fertilisation minérale viennent donc s'ajouter les émissions GES liées à la fabrication et à l'utilisation d'effluents et d'amendements organiques, dont certains pèsent très lourd en termes d'émissions dans la méthodologie actuelle (compost de déchet vert notamment).

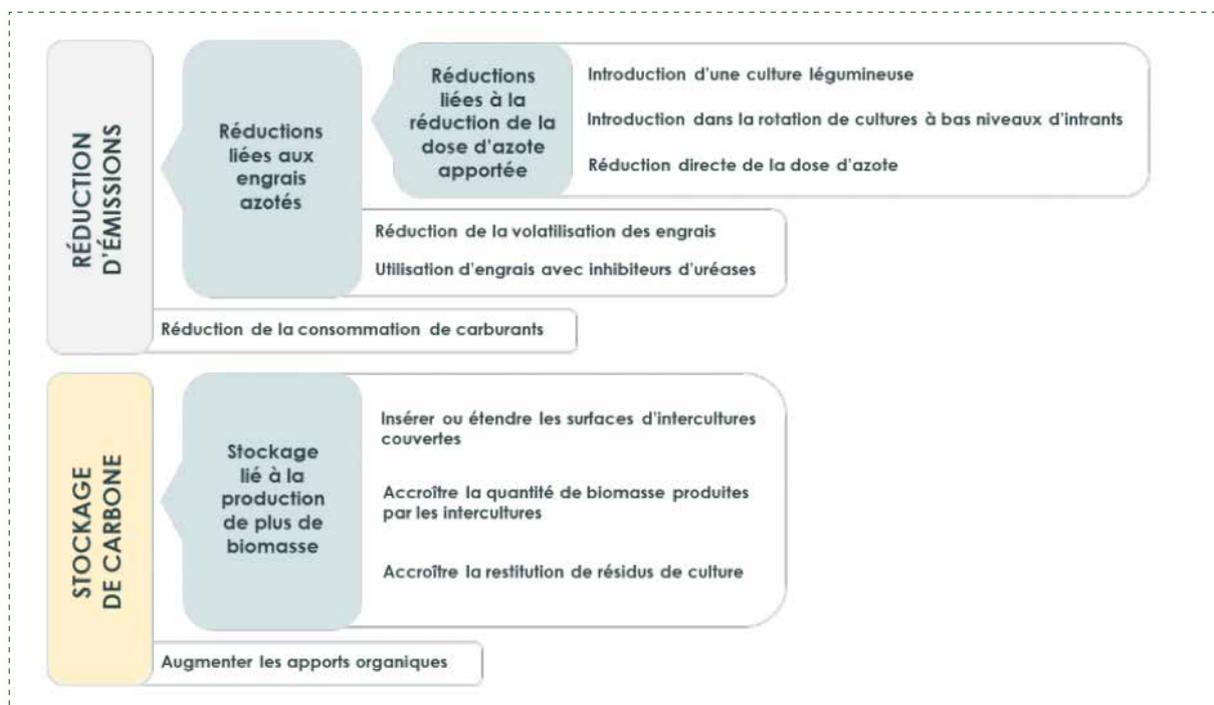
Le maintien de la fertilisation minérale s'explique par la nécessité de compenser la faible minéralisation du sol en cas de réduction de travail du sol, par la volonté de maximiser la production de biomasse, de maintenir les rendements et de permettre la dégradation des résidus par la vie du sol, qui a besoin d'azote pour cela. Agronomiquement parlant, c'est donc pour se donner les moyens de stocker de plus en plus de carbone dans le sol que les agriculteurs font des choix de fertilisation qui pénalisent de manière temporaire leur bilan carbone.

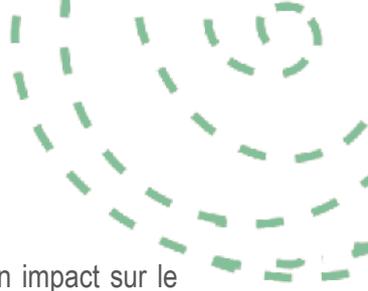
- Deuxièmement, le stockage de carbone dans les sols augmente fortement sur les fermes avancées dans la transition (IR > 60), ce qui améliore nettement le bilan carbone en compensant en partie les émissions de gaz à effet de serre.

Ainsi, les fermes pionnières ont un bilan carbone net inférieur de 46% à celui des fermes débutantes. Ce résultat très positif sera par ailleurs renforcé lorsque le bilan GES associé à l'épandage de composts de déchets verts aura été revu à la baisse (évolution méthodologique prévue pour 2023), car il pénalise aujourd'hui très fortement le bilan GES des nombreuses fermes engagées en agroécologie qui en épandent. Les données issues des fermes pionnières confirment donc que la mise en place de pratiques de régénération du sol permet d'augmenter fortement le stockage de carbone, tout en permettant une baisse des émissions de GES.

Les leviers d'amélioration du bilan Carbone

L'étude s'est également intéressée aux leviers d'amélioration du bilan carbone des fermes. Elle met en exergue que simuler des changements de pratiques pour améliorer son bilan carbone et bénéficier de financement (cf. schéma leviers) est facile à faire en théorie mais que dans la réalité il s'agit d'être prudent. En effet, il existe des antagonismes entre réduction des émissions de GES et augmentation du stockage de carbone qu'il convient de garder à l'esprit pour ne pas prendre de risques agronomiques.





Par exemple, la diminution des engrais ou leur changement de forme peuvent avoir un impact sur le rendement des cultures et donc sur la production de biomasse et de résidus (pailles, cannes, couverts) qui conduit à son tour à une diminution du stockage de carbone. Autre exemple : l'intégration de cultures de légumineuses (lentille, pois chiche) dans l'assolement en remplacement d'une céréale à paille permet de diminuer les apports de fertilisation azotée minérale et donc les émissions de GES, mais cela diminue la quantité de résidus qui peuvent être restitués au sol, et donc le stockage de carbone.

Par ailleurs, produire des intercultures à forte biomasse n'est pas forcément aisé et est fortement dépendant des conditions climatiques de l'année. Passer d'une situation initiale avec des couverts peu productifs (1 t de MS/ha) à une situation finale avec des couverts plus productifs (4 t de MS/ha) peut sembler être un levier intéressant en termes de stockage de carbone, mais c'est un levier qui contient une part de risque importante : meilleure maîtrise technique de l'implantation des couverts d'une part (ce qui peut prendre du temps et de nombreux essais) mais également de bonnes conditions climatiques pour que le résultat soit atteint (pas de sécheresse au moment du semis, pas de sécheresse hivernale, etc...). Des difficultés techniques et/ou des conditions climatiques défavorables peuvent conduire l'agriculteur à ne pas atteindre le résultat simulé, et donc à ne pas pouvoir bénéficier d'une partie des crédits alors que les coûts ont été engagés.

Pour aller plus loin :

(1) Consulter les retours d'expérience d'agriculteurs :

<https://agroecologie.org/retour-experience?tab=retours-experiences>

(2) Mesurer son indice de régénération : <https://agroecologie.org/>

(3) Protocole entier du test bêche : <https://www.progres-sol.ch/outils/vess.html>

(4) Comprendre la fertilité des sols : Livre *Revitaliser les sols* (Francis Buaille)

(5) Choisir ses séquences ligneuses : <https://auxilhaie.chambres-agriculture.fr/>

(6) Tout comprendre sur Agroécologie et bas carbone en grandes cultures :

<https://www.youtube.com/watch?v=B95rvISBGU0>



Pachamama

L'agroécologie en pratique

- Livret technique -