



La fertilité des sols : L'importance de la matière organique



Avec le concours financier de :



HUBER Gérald
SCHAUB Christiane
Service Environnement-Innovation
Décembre 2011

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	1
PARTIE I : L'IMPORTANCE DE LA MATIERE ORGANIQUE	2
I Propriétés des matières organiques.....	2
II Rôles des matières organiques.....	2-3
1. L'humus, un terme à bien différencier de la MO.....	3
2. Le complexe argilo-humique	3
a) L'humus « protège » l'argile et stabilise la structure du sol.	3
b) L'argile favorise l'humification et ralentit la minéralisation de l'humus	3
III L'humification de la matière organique	4-5
1. Acide fulvique.....	5
2. Acide himatomélanique	5
3. Acide humique.....	5
4. Humine	5-6
IV Chaque année le sol s'appauvrit.....	7-8
V Quelques rappels et définitions utiles.....	8
1. Le rapport C/N.....	8
2. La CEC : capacité d'échange cationique	8
3. Le K1 (Hénin et Turc, 1957)	9
4. L'Indice de Stabilité Biochimique (I.S.B., Linères et Djakovitch, 1993)	9
5. La caractérisation biochimique de la matière organique (C.B.M., Robin, 1997)	9
6. Le nouvel indice ISMO (AFNOR) remplace l'ISB/CBM	9-10
7. Conclusion	10
VI Les acteurs de la vie du sol	10
1. L'activité microbienne	10-11
a) Miser sur les engrais verts pour optimiser l'activité microbienne.....	11-12
b) Les engrais verts pour la stabilité structurale	12
2. Les vers de terre	12
a) Les vers de terre épigés.....	13
b) Les vers de terre endogés	13
c) Les vers de terre anéciques.....	13
d) Le rôle des lombriciens dans le sol.....	13-14
e) Les vers de terre : bons indicateurs des pratiques agricoles	14
3. Les champignons	14
a) Les mycorhizes	15-16

VII	Un comparatif sur 10 ans sur différentes sources de MO.....	16-17
	1. Les composts de déchets verts et d'écorces	17
	2. Les fumiers	17
	3. Le compost de tourteau de café enrichi en fumier de bergerie	18
VIII	Méthode Bourguignon : Vers une nouvelle approche de la fertilisation des sols agricoles	18
	1. La dynamique du sol.....	18
	2. La naissance du sol	18-19
	3. La maturité du sol.....	20
	4. La mort des sols.....	20
	5. La biologie du sol.....	20-21
	6. Les végétaux ont la particularité de se nourrir dans deux milieux : l'air et le sol.....	21
	a) L'alimentation atmosphérique des plantes	21
	b) L'alimentation des plantes dans le sol	21-22
	7. Vers une nouvelle approche analytique des sols agricoles.....	22
	a) Analyse physique d'un sol agricole	22
	b) Analyse chimique d'un sol agricole.....	22
	c) Analyse biologique d'un sol agricole.....	22
	8. Le rôle du sol dans la typicité des produits agricoles.....	23
IX	Méthode BRDA-Hérody.....	23
	1. Observer de près le profil cultural.....	23
	2. Déterminer la composition de la roche-mère.....	24
	3. Comprendre le climat et le comportement de la matière organique.....	24-25
	4. Optimiser la fertilité du sol.....	25
	5. Doser l'apport organique	26
	6. Evaluer les besoins en chaulage.....	26
	7. Choisir ses engrais	26

PARTIE II : LE COMPOST

I	Compostage et législation	27-28
II	Le compostage.....	29
	1. Les 4 phases du processus.....	29-30
	2. Les avantages du compostage.....	30-31
	3. Inconvénients et limites du compostage	31
	4. Les composts de fumiers	31
	5. Les différentes méthodes de compostage	32
	6. Les composts de déchets verts.....	32
	a) Comment utiliser l'analyse de compost de déchets verts ?	33
	7. Utilisation des composts dans différentes situations	33

PARTIE III : LE CHOIX DE L'AMENDEMENT ORGANIQUE.....	34
I Les principaux critères permettant de comparer les amendements organiques	34
II La réglementation NFU des matières organiques	35
Production de compost de déchets verts de la région Alsace	36
Amendements organiques disponibles en Alsace.....	37-40
Contacts des fournisseurs	41
Bibliographie	42

INTRODUCTION

La modernisation de l'agriculture, basée sur une énergie fossile accessible et bon marché, a engendré un travail du sol agressif occultant souvent le fonctionnement biologique du sol en général et le rôle fondamental de la matière organique. La fertilité d'un sol ne se limite pas à sa consistance en tant que support de culture et à sa teneur en éléments minéraux, mais à un ensemble de pratiques agricoles dépendantes du milieu et des choix de l'agriculteur.

Pour entretenir la performance de ce milieu, qui semble être la principale source de production de denrées alimentaires, il est essentiel d'alimenter l'ensemble des constituants physiques, biologiques et chimiques.

L'objectif de ce guide est de permettre à chaque prescripteur-agriculteur de comprendre l'intérêt de « nourrir le sol pour nourrir la plante ». Les matières organiques sont en grande partie responsables de la vie biologique d'un sol. Cette réponse simple et complexe à la fois permet à ce guide d'aborder les premiers éléments pour s'intéresser et mieux comprendre les facteurs intervenant sur le fonctionnement d'un sol.

Un inventaire des principaux produits organiques commercialisés en Alsace permettra au lecteur de se faire une idée des choix possibles sans occulter que les effluents d'élevage restent la source principale disponible et souvent la plus adaptée aux différents types de sol.

La Chambre d'agriculture du Bas-Rhin vous souhaite une bonne lecture et reste à votre disposition pour tout renseignement complémentaire.

PARTIE I : L'IMPORTANCE DE LA MATIERE ORGANIQUE

I. PROPRIETES DES MATIERES ORGANIQUES

Un sol prend naissance dès lors que la vie végétale et animale vient s'installer dans les débris de la décomposition d'une roche mère. A la mort de ces êtres vivants, leur matière s'incorpore au sol, se mélangeant aux substances minérales. Ils représentent alors les « constituants organiques » ou « matières organiques » (SOLTNER).

Par rapport à une approche plus fonctionnelle, nous pouvons classer différents types de matières organiques pour différentes fonctions (laboratoire CELESTA : gestion MOS) :

Type de MO	Fonctions
Matière organique vivante : végétaux et animaux vivants	Transformation/minéral
Matière organique fraîche : débris végétaux et animaux	Substrat énergétique et croissance/fertilité chimique
Matière organique transitoire : matières évoluées (cellulose réduite, lignine, protéines)	Substrat énergétique/fertilité physique (structure du sol)
Matière humique : lignine, cellulose, matières azotées microbiennes	Fertilité physique (stabilité à long terme)

II. ROLES DES MATIERES ORGANIQUES

	Action	Bénéfice
Rôle physique = cohésion	Structure, porosité	<ul style="list-style-type: none"> - pénétration de l'eau - stockage de l'eau - limitation de l'hydromorphie - limitation du ruissellement - limitation de l'érosion - limitation du tassement /compactage - réchauffement
	Rétention en eau	- meilleure alimentation hydrique
Rôle biologique = énergisant	Stimulation de l'activité biologique (vers de terre, biomasse microbienne)	<ul style="list-style-type: none"> - dégradation, minéralisation, réorganisation, humification - aération - croissance des racines
Rôle chimique = nutritif	Dégradation, minéralisation	- fournitures d'éléments minéraux (N, P, K, oligo-éléments...)
	CEC	- stockage et disponibilité des éléments minéraux
	Complexation ETM	- limitation des toxicités (Cu par exemple)
	Rétention des micropolluants organiques et des pesticides	- qualité de l'eau

Les matières organiques jouent un rôle important dans le fonctionnement global du sol au travers de ses composantes physiques, biologiques et chimiques, qui ont des conséquences majeures pour la fertilité des sols.

1. L'humus, un terme à bien différencier de la MO

L'humus est de la matière organique ayant subi une altération, appelée humification, poussée essentiellement par l'action combinée des animaux, des bactéries et des champignons du sol. Dans le sol, l'humus est la partie la plus active biologiquement.

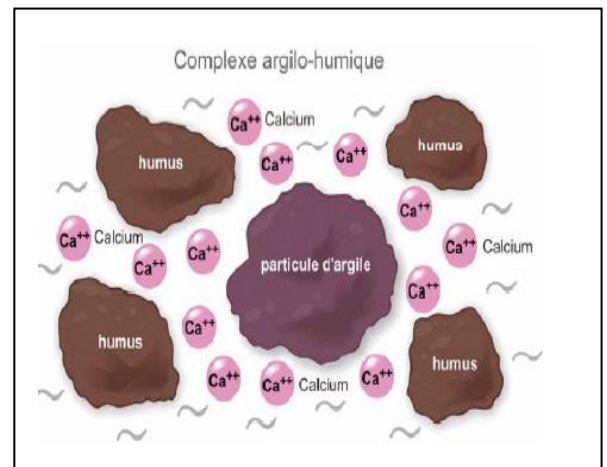
L'humification sera plus profondément abordée dans une prochaine partie.

2. Le complexe argilo-humique

a) *L'humus « protège » l'argile et stabilise la structure du sol.*

Les micelles d'humus, porteuses d'une charge résultante négative, comme celle de l'argile minéralogique, devraient se repousser plutôt que s'attirer. Pourtant argile et humus sont associés en un complexe, cette liaison étant rendue possible par trois mécanismes.

- La liaison argile-humus par l'intermédiaire des cations Ca^{2+} formant un « pont » entre l'argile et l'humus. Ce mode de fixation, particulièrement énergétique, explique la stabilité des agrégats terreux formés en sol calcaire. Par stabilité, entendons :
 - la résistance à la dispersion par l'eau,
 - la résistance à la minéralisation de l'humus.
- La liaison argile-humus par l'intermédiaire du fer Fe^{3+} . Ce mode de liaison caractérise les « sols bruns ». Cette liaison est cependant moins stable que celle qu'assure le calcium.
- La liaison argile-humus par fixation directe de l'humus. Dans cette association argile-humus, les micelles d'humus forment autour de celles d'argile une enveloppe protectrice. Divers mécanismes physiques aboutissent à un résultat que tout agronome et agriculteur a pu constater : alors qu'un agrégat d'argile pure de sous-sol se laisse immédiatement humidifier, ce qui amène son délitement, son éclatement, un agrégat d'une terre de surface, mélange d'argile et d'humus, s'humidifie plus lentement, et d'autant plus qu'il est humifère. Résultat, il ne se délite pas ou peu.



On dit que l'humus stabilise la structure, c'est-à-dire qu'il forme, avec l'argile, un « ciment » qui permet la construction d'agrégats solides, résistants à la dégradation par l'eau.

Cette caractéristique du complexe argilo-humique est tellement essentielle qu'elle sera la base de l'étude de la structure et de la stabilité structurale.

b) *L'argile favorise l'humification et ralentit la minéralisation de l'humus.*

L'argile liée à l'humus le protège contre l'attaque microbienne. On remarque en effet qu'en sol suffisamment argileux et bien pourvu en calcium, l'humification est favorisée par la liaison à l'argile, liaison réalisée notamment dans le tube digestif des vers de terre. C'est ce qui explique aussi qu'en sols sableux, le manque d'argile et souvent une réaction acide ne favorisent pas l'humification, ni la formation d'un complexe argilo-humique.

III. L'HUMIFICATION DE LA MATIERE ORGANIQUE

Divers composés issus de ce processus améliorent significativement la situation interne du sol et le processus vital créant la fertilité naturelle et par conséquent la productivité. Sans humus, on ne pourrait pas parler de « sol » mais uniquement de « terre ».

L'humus peut être défini comme un composé organique amorphe, sombre, cohésif et hydrophile, avec un poids moléculaire compris entre 500 et 300 000 daltons (Rosell, 1993). Toute la microbiologie (bactéries, champignons, ...) et la faune du sol (vers de terre, ...) participent à sa formation. L'humus de haut poids moléculaire (humines) est plus résistant à la biodégradation, étant donné qu'il est insoluble dans les acides, les alcools et les bases du sol, et qu'il peut s'assembler avec les argiles par un pont cationique avec un haut potentiel électrique. Plus la micelle d'argile est fine, plus la capacité de rétention est grande, ce qui favorise la stabilité de l'humus.

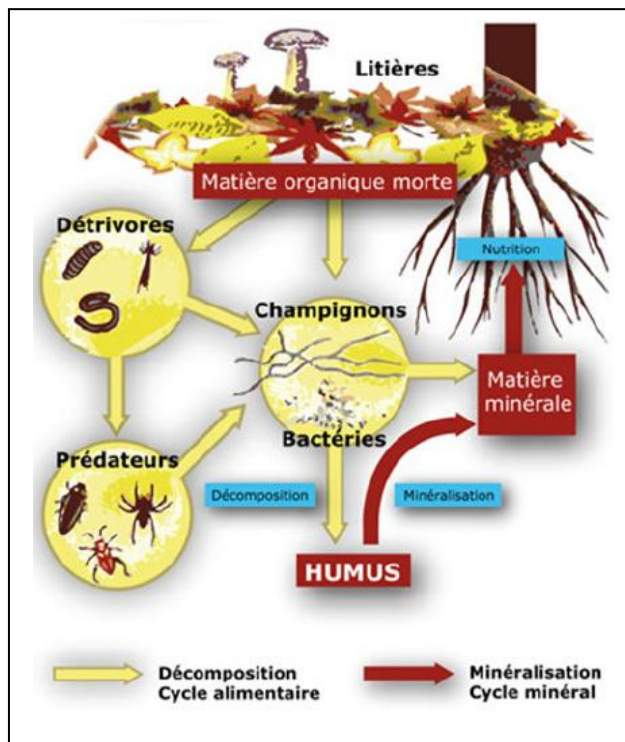
Le labour augmente l'oxydation de l'humus puisqu'il laisse la matière organique exposée aux facteurs internes et externes dégradant le sol. La minéralisation oxyde en premier lieu les acides fulviques. La perte de ce composé humique dépend de facteurs externes comme la température, l'humidité et l'aération du sol. Sa minéralisation peut prendre 1 à 3 ans.

Dans un second temps, se produit la minéralisation de l'humus « stable », qui est lente puisque les composés humiques comme les acides humiques et les humines sont plus résistants à la minéralisation. En labour conventionnel, dans les régions tempérées, 1 à 3 % d'humus « stable » peuvent être perdus annuellement, alors qu'en non labour moins de 0,5 % est minéralisé (Rosell, 1993). Le non-labour favorise la productivité et la biomasse des cultures à moyen terme, et retarde aussi les processus d'oxydation. Tout ceci restitue partiellement les caractéristiques originelles du sol.

Bien que l'humus ne constitue pas réellement un nutriment pour les plantes, il est très important pour le sol. Il se comporte comme un « conditionneur » important du sol, en particulier du fait de sa très faible épaisseur, et lui confère des propriétés physiques exceptionnelles qui améliorent l'état général du sol.

Même si le processus de formation humique dans les sols est absolument naturel, la présence permanente de résidus est indispensable pour que ce phénomène se réalise. La dégradation des résidus en humus peut être un processus plus ou moins rapide selon les types de sols, de climats et de résidus. Les résidus les plus rapides à se décomposer sont ceux qui ont un rapport C/N faible, comme ceux des légumineuses. L'état végétatif des plantes incorporées au système est lui aussi important. Si les plantes sont coupées avant leur maturité physiologique, leur décomposition sera plus rapide et en conséquence leur persistance à l'état humique dans le sol moindre.

Les plantes qui atteignent la maturité physiologique sont proportionnellement plus riches en lignine. Ce composé est très stable et durable dans le sol. Ainsi, il est plus important et plus économique d'un point de vue productif, à moyen terme, de permettre dans le sol une présence constante de matériel fibreux de plus lente décomposition. A la maturité, les plantes possèdent une plus grande quantité de carbone qu'à l'état vert ou non mature. Il est donc vital pour la physiologie du sol d'attendre la maturité physiologique des plantes étant donné que leurs résidus mettront à disposition de la microbiologie et la mésofaune du sol une source d'énergie (carbone) en plus grande quantité et plus persistante.



Le mot « humus » est générique et inclut quatre composés humiques. Pour mieux comprendre sa signification, il est important d'identifier chacun d'eux et de connaître leur origine. Ces composés se distinguent par leur poids moléculaire. Plus celui-ci est élevé, plus la stabilité et la permanence dans le sol sont grandes. Ces composés humiques, rangés par ordre de poids croissant, sont : l'acide fulvique, l'acide himatomélanique, l'acide humique et l'humine.

1. Acide fulvique

L'acide fulvique se caractérise par son poids moléculaire relativement bas et son association avec les polysaccharides présents dans le sol. Il est soluble dans les réactions acides et basiques. Du fait de son plus grand taux en acide carboxylique, il a une grande capacité intrinsèque à dissocier les minéraux originels du sol, ce qui influence la genèse de ce dernier. Les colloïdes anioniques peuvent former des complexes stables avec des cations polyvalents comme Fe^{3+} , Al^{3+} , Cu^{2+} , etc... (Labrador, 1996). Cette exceptionnelle fonction édaphique diminue la fixation du phosphore et augmente donc sa disponibilité.

2. Acide himatomélanique

L'acide himatomélanique est un mélange complexe de composés humiques tels que l'acide fulvique et l'acide humique, soluble dans les bases et l'alcool (Labrador, 1996).

3. Acide humique

L'acide humique se trouve dans le sol en plus grande quantité que les autres composés humiques. Il est insoluble dans les acides et les alcools, et a un poids moléculaire intermédiaire. Il est constitué de couches très fines et planes liées entre elles, formant un matériel réticulaire spongieux (Labrador, 1996), cette caractéristique physico-chimique de l'acide humique est importante puisqu'elle améliore notablement la rétention d'eau dans le sol : l'acide humique peut en retenir l'équivalent de 16 fois son propre poids. Il lui est également attribué une augmentation de la CEC, et il régule les processus d'oxydo-réduction du système édaphique améliorant ainsi la disponibilité en oxygène pour les racines des plantes.

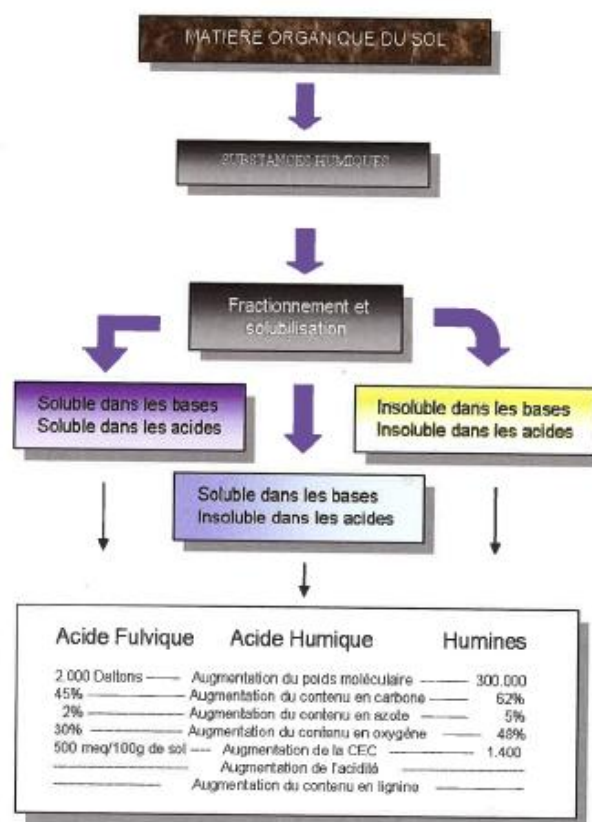
Par un processus similaire à celui de l'acide fulvique, l'acide humique peut former des composés avec des ions métalliques. Selon Schnitzer (cité par Labrador, 1996), l'acide humique est le principal facteur de la genèse des sols, de la formation d'une bonne structure et d'une plus grande disponibilité de nutriments pour les plantes ; de plus, l'acide humique est important pour la dégradation des produits chimiques comme les pesticides dans le profil du sol.

L'expérience des sols en non-labour de Chequén indique que la persistance moléculaire des herbicides systématiques, et en particulier ceux qui sont fortement résiduels, est plus courte, comparée au même produit dans les sols en labour traditionnel. Dans ces circonstances, ces herbicides se dégradent plus vite du fait de la physiologie du sol plus active, impliquant la présence de composés humiques et d'acides organiques.

4. Humine

L'humine est le composé humique le plus stable dans le sol, du fait de son haut poids moléculaire qui atteint 300 000 daltons. Elle est insoluble dans les divers agents chimiques de dégradation (acides, alcools et bases) et perdure fortement unie aux colloïdes minéraux les plus fins du sol comme les argiles. Cette caractéristique lui permet de persister dans le profil plus longtemps, si celui-ci n'est pas altéré par le labour. La composition chimique et structurelle de l'humine provient de la lignine des résidus de récoltes, en quantité particulièrement importante dans les sols forestiers (Rosell, 1993).

L'épuisement des réserves organiques du sol est synonyme de dégradation des composés humiques. L'oxydation du carbone organique du sol affecte la stabilité de ces colloïdes à base d'humines en particulier ceux de plus bas poids moléculaire. Le schéma ci-dessous explique la transformation de la matière organique en tel ou tel composé humique en fonction du poids moléculaire et de la solubilité relative des molécules. Puisque l'acide fulvique a le plus faible poids moléculaire (2 000 daltons), il est le moins résistant à la biodégradation, donc il a une courte durée de vie dans le sol. L'acide humique a un plus grand poids moléculaire (plus de 100 000 daltons), il est soluble dans les bases mais insoluble dans les acides. Finalement, l'humine est la fraction la plus résistante étant donné qu'elle est insoluble dans tous les agents dégradants, grâce à son poids moléculaire de plus de 300 000 daltons. C'est le composé humique le plus recherché du fait de sa grande stabilité mais aussi de sa haute capacité d'échange cationique (CEC) ; de plus elle possède un grand pouvoir électrostatique négatif.



*Caractérisation du carbone organique en termes de stabilité et de transformation.
Collins et al., 1997.*

D'après Hérody, les différentes phases de l'humification de la matière organique précédemment présentées sont les résultats de la méthode d'extraction lors de l'analyse au laboratoire de la fraction organique.

IV. CHAQUE ANNEE LE SOL S'APPAUVRIT

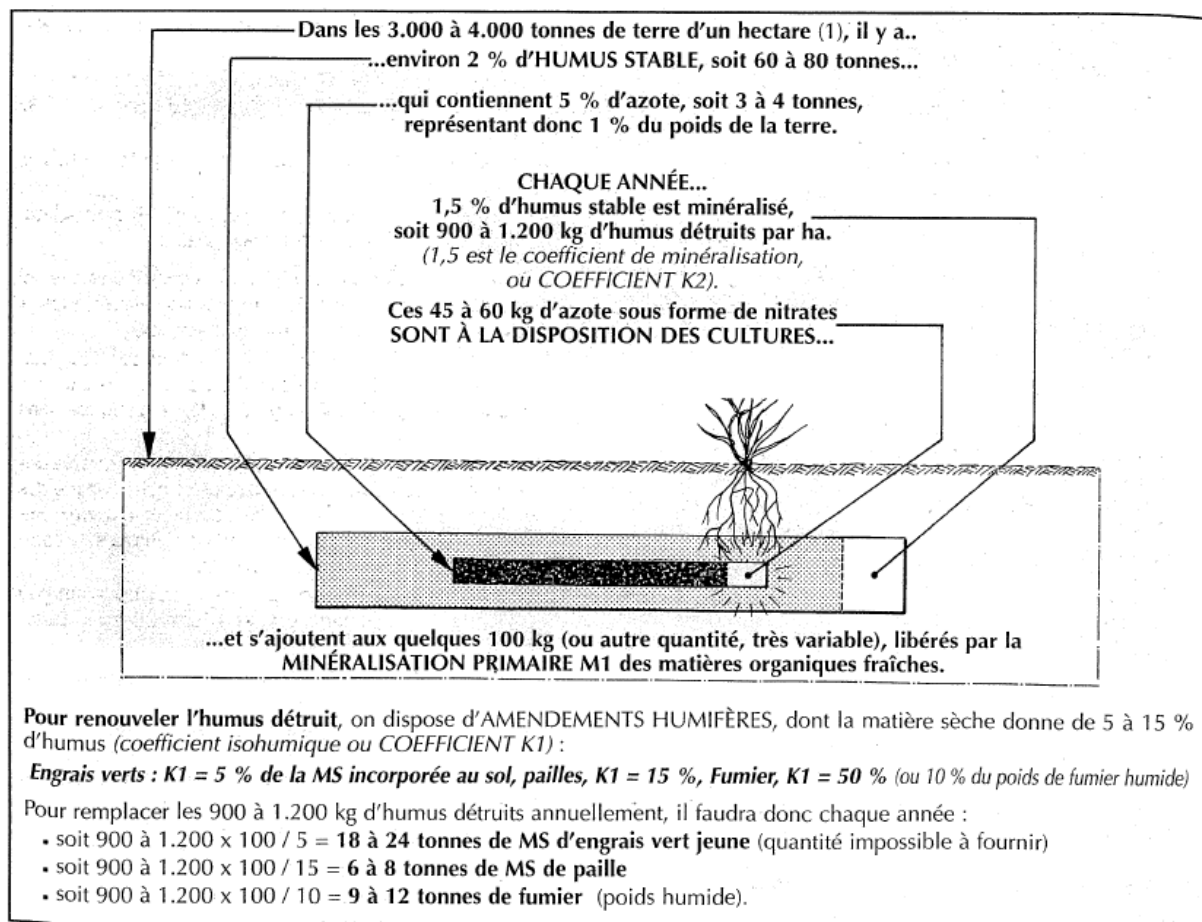
Chaque année, un hectare de terre connaît deux sortes de minéralisation :

- la minéralisation primaire M1 des matières organiques fraîches, résidus de cultures, fumures organiques. Cette minéralisation fournit des quantités très variables d'azote (et autres éléments) selon la quantité de matières organiques apportée au sol. Disons de quelques kilos à plus de 100 kg,
- la minéralisation secondaire M2 d'une partie du stock d'humus stable. Cette minéralisation fournit une quantité d'azote (et autres éléments) plus régulière, et indépendante des apports, qui ne dépend que de l'activité biologique du sol s'attaquant au stock d'humus stable. Pour que ce stock ne s'épuise pas, il faut chaque année le renouveler.

L'agriculteur se pose alors trois questions :

- quelle quantité d'humus stable est minéralisée par hectare et par an ?
- quelle quantité d'azote est fournie par la minéralisation M2 de cet humus ?
- quelle quantité de matière organique apporter chaque année pour remplacer cet humus détruit ?

A ces trois questions, le calcul suivant permet de répondre :



Soltner, Tome I le sol et son amélioration, activités biologiques.

Le coefficient de minéralisation de l'humus K2 dépend :

- surtout du type de sol : de 2,5 % par an en sol sableux, il descend à 1,5 % en sol limoneux, et 1 % en sol argileux. Et si le sol est calcaire, il chute encore davantage : 0,5 % par an. En effet, le calcaire a un effet « incrustant » pour l'humus, le mettant à l'abri de la biodégradation,

Types de sols		Taux annuel de destruction
Non calcaire ou calcaire < 15 %	Sableux	2,5 %
	Sableux-limoneux	2,0 %
	Sableux-argileux	1,5 à 1,2 %
	Limoneux	1,5 à 1,2 %
	Argilo-sableux	1,5 à 1,2 %
	Argileux	1,0 %
Calcaire	15 % < CaCO ₃ < 50 %	0,8 à 0,6 %
	CaCO ₃ > 50 %	0,5 à 0,4 %

- de l'intensité de la culture : plus le sol est travaillé, plus la minéralisation de l'humus tend à augmenter. En effet, le travail du sol active la minéralisation par oxygénation, d'où une meilleure conservation de l'humus dans les sols travaillés superficiellement par les techniques sans labour,
- des « activateurs », ce peut être par exemple des engrais verts apportant des sucres solubles et de l'azote, des engrais organiques apportant de l'azote et d'autres éléments (y compris des oligo-éléments), des fumiers et composts apportant de nouveaux ferments.

V. QUELQUES RAPPELS ET DEFINITIONS UTILES

1. Le rapport C/N

Le rapport C/N est un des indices de qualité des produits. Un produit organique au C/N élevé (> 15-20, compostage incomplet) peut entraîner un risque de « faim d'azote » pour les plantes, car les micro-organismes du sol utiliseront l'azote du sol disponible pour la minéralisation du produit en question. Utilisé seul, ce critère de qualité a ses limites : deux produits ayant le même C/N peuvent avoir des actions différentes sur l'évolution de la teneur en MO du sol. Le C/N est donc considéré comme un indicateur partiel de qualité à compléter par d'autres informations (type de proportions des constituants, niveau de compostage...). Les recherches menées à l'INRA de Reims (NICOLARDOT et al., 1998) montrent que la disponibilité de l'azote dépend davantage de la localisation de cet élément dans les différentes fractions biochimiques (solubles, hémicellulose, cellulose, lignine) que du rapport C/N global du produit.

2. La CEC : capacité d'échange cationique

La capacité d'échange en cations d'un sol correspond à la quantité totale de cations que le sol est capable de stocker et de restituer dans des conditions de pH bien définies. Elle s'exprime en centimoles de charges positives par kilogramme de terre fine.

La CEC résulte des charges électriques négatives situées à la surface des argiles et des matières organiques. On admet, de façon générale, qu'un gramme de matière organique contribue à cinq fois plus à la CEC d'un sol qu'un gramme d'argile (BAIZE, 1988).

En analyse de routine, la CEC est déterminée avec une solution à pH 7 (CEC méthode Metson). Toutefois, la CEC effective du sol varie en fonction de son pH. Notamment, elle est inférieure à la CEC mesurée à pH 7, lorsque le sol est franchement acide. La détermination de la valeur de la CEC au pH du sol (méthode à la cobaltihexamine) devrait devenir plus fréquente. Les référentiels d'interprétation restent néanmoins à établir.

En-deçà de pH 5,5 et au-delà de pH 7,5, l'écart relatif entre la valeur de la CEC effective et la CEC à pH 7 augmente rapidement. Dans ces cas, la CEC Metson n'est plus un bon indicateur de la CEC effective du sol.

3. Le K1 (Hénin et Turc, 1957)

Le coefficient isohumique K1 est l'expression de la quantité d'humus formée en fonction de la quantité de matière sèche du produit organique apportée au sol.

$$K1 = QH/MS$$

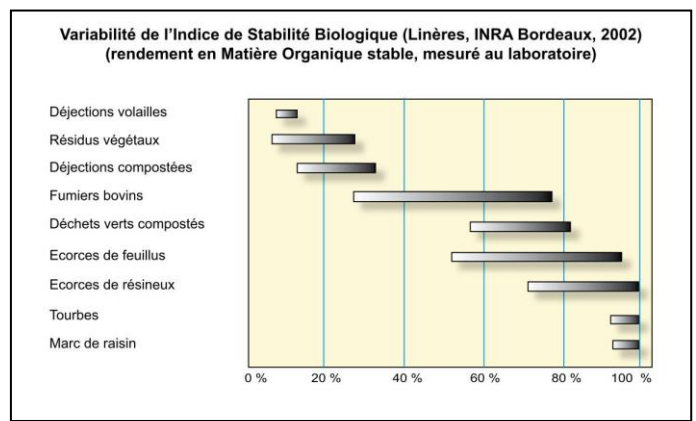
QH = quantité d'humus générée par le produit par an

MS = quantité de matière sèche du produit apportée par an

La détermination du K1 est longue, coûteuse (essai de 3 ans au champ) et sa valeur varie avec les conditions pédoclimatiques. Les coefficients K1 qui sont proposés dans la littérature ou par des fournisseurs d'amendements organiques doivent être utilisés avec précaution car les conditions d'obtention de ces coefficients sont rarement données (climat, type de sol, etc...).

4. L'Indice de Stabilité Biochimique (I.S.B., Linères et Djakovitch, 1993)

L'ISB représente la proportion de l'amendement de départ la plus résistante aux dégradations microbiennes, et donc susceptible de se stabiliser dans le sol. Sa valeur, exprimée par rapport à la matière sèche de l'amendement varie entre 0 et 1. Plus l'ISB est élevé, plus l'amendement est stable dans le sol.



5. La caractérisation biochimique de la matière organique (C.B.M., Robin, 1997)

Cette méthode est directement inspirée de l'I.S.B.

C'est un procédé chimique qui sépare les constituants de la matière organique et mesure la teneur en composés ligno-cellulosiques (précurseurs d'humus). Cette caractérisation permet de classer les produits étudiés en termes d'usage agronomique et d'estimer le potentiel humique du produit.

Que l'on utilise l'approche I.S.B. ou C.B.M., les principes de bases sont identiques et les limites sont les mêmes. Une limite générale de ces méthodes, c'est qu'elles reposent implicitement sur une hypothèse d'additivité ; or les différents constituants biochimiques des matières organiques ne sont pas accolés, mais le plus souvent en interaction étroite. Un autre paramètre à prendre en considération est la granulométrie du produit. Il est clair que plus un amendement organique est broyé fin, plus sa surface de contact avec le sol est importante, d'où une stimulation de la dégradation. Les méthodes biochimiques et les incubations biologiques sont appliquées à des produits finement broyés, pour des raisons de représentativité d'échantillon et d'efficacité des extractions. Les résultats représentent donc un potentiel à long terme plutôt qu'un comportement en temps court.

6. Le nouvel indice ISMO (AFNOR) remplace l'ISB/CBM

Le nouvel indice permettant de caractériser la stabilité de la matière organique, l'ISMO, remplace désormais l'ISB/CBM, qui s'avérait obsolète, au regard de la multiplicité des produits organiques mis sur le marché. La norme expérimentale XP U 44-162 de «Caractérisation de la matière organique par fractionnement biochimique et estimation de sa stabilité biologique » (ISMO), remplaçant celle de septembre 2005 (ISB) a été publiée par l'AFNOR en décembre 2009, et est parue le 14 janvier 2010.

L'ISMO a été testé sur la base d'études de minéralisation longue afin de mieux estimer les phénomènes intervenant sur le long terme. Il se différencie de l'ISB/Tr par une cinétique de minéralisation du carbone à trois jours, qui entre en compte dans le calcul. L'ISMO est donc calculé à partir des résultats de la méthode de fractionnement biochimique et la minéralisation du carbone à 3 jours (ct3) décrite en XP U 44-162. Cependant, la transposition au champ doit toujours être réalisée avec précaution.

A titre d'information, le tableau ci-dessous détaille le calcul des trois méthodes :

ISB	$ISB = 2,112 - 0,02009.SOL - 0,02378.HEM + 0,0084.LIC - 0,02216.CEW$	- soluble à l'eau bouillante (EAU) - soluble à l'eau bouillante + réactif NDF (SOL)
CBM	$CBM = 0,32.SOL - 0,72.HEM + 0,67.CEL + 1,89.LIC + 0,003.MIN$	- équivalente hémicellulose (HEM) - équivalente cellulose (CEW)
ISMO	$ISMO = 44,5 + 0,5*SOL - 0,2*CEL + 0,7*LIC - 2,3*Ct3$	- équivalente lignine + cutine (LIC) - C minéralisé en 3 jours d'incubations (Ct3)

7. Conclusion

Il est indispensable d'avoir plus clairement à l'esprit ce que l'on attend des matières organiques, afin de faire des choix agronomiquement judicieux. Ceci va de pair avec une interprétation correcte des résultats des mesures biochimiques, ce qui n'est pas toujours le cas actuellement. On assiste en effet depuis quelques temps à un engouement du marché (producteurs et consommateurs) pour les produits les plus stables. Implicitement, plus la valeur de l'ISB (ou du K1) est élevée, meilleur serait le produit. Or, pour la majorité des usages des matières organiques, il s'agit là d'un contresens agricole. Cependant, avec l'instauration du nouvel indice (ISMO) les choses vont se clarifier et permettre une meilleure vision des amendements organiques.

VI. Les acteurs de la vie du sol

La biomasse dans le sol est formée par la microflore et la faune du sol ; elle représente jusqu'à 5 % de la matière organique du sol.

1. L'activité microbienne

Une seule et même source organique ne peut permettre d'assurer l'ensemble des fonctions recherchées (physiques, chimiques et biologiques). De plus, un produit stable ne sera valorisé que s'il est utilisable par le sol. Cette utilisation est principalement dépendante des conditions de sol (aération, humidité, vie microbienne). L'activation de la vie microbienne nécessite la présence de matière organique facilement dégradable qui lui servira de nourriture. Ce sont les interactions entre les différentes propriétés du sol qui lui donnent sa capacité de nourrir la plante sur le long terme. Le sol est une structure vivante et dynamique. Les apports organiques favorisent la vie microbienne. En retour ceux-ci permettent la transformation, le stockage et la libération des éléments nécessaires à la plante.

Conditions favorables à l'activité microbienne	Comment l'agriculteur peut-il intervenir ?
<p>Température</p> <ul style="list-style-type: none"> - Le froid et le sec limitent l'activité microbienne. - Le vent modifie les vitesses de transfert humide/sec. 	<ul style="list-style-type: none"> - Aménagement du paysage (bocage, coupe-vent, terrasses, murs). - Exposition des plantations. - Tunnels (maraîchage).
<p>Air et sol</p> <ul style="list-style-type: none"> - Porosité du sol : les alternances des niveaux d'eau (ressuyage) fonctionnent comme une pompe à oxygène ; trop d'eau est plutôt négatif ; trop d'air est souvent limitant. - L'équilibre est réglé par la structure du sol plus que par la texture. 	<ul style="list-style-type: none"> - Travaux du sol adaptés. - Favoriser la structure du sol par des travaux et des apports dans l'optique du fonctionnement optimal des microbes. - Travaux du sous-sol (très techniques) en sol jeune. - Maîtrise hydraulique (irrigation, drainage, bocage).
<p>Nourriture des microbes</p> <p>Elle doit comprendre de l'énergie et de l'azote. L'énergie vient soit des racines (molécules relarguées), soit du sol (matières organiques). L'azote vient de la minéralisation des MO, de la fixation directe pour certaines espèces, plus rarement des échanges avec les plantes (acides aminés, peptides).</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Apport de formes adaptées au type de sol. Matières organiques agricoles faciles à décomposer, équilibrées en énergie et azote, libérables à la même vitesse (flux d'énergie et d'azote). L'énergie permet une meilleure agressivité des microbes vis-à-vis des minéraux du sol.
<p>Bases alcalino-terreuses</p> <p>Les organismes vivants construisent des acides et cela demande une neutralisation en flux discontinu. Les bases sont le calcium et le magnésium. Ils doivent être dans l'équilibre 10/1 environ pour être efficaces.</p>	<p>Les apports riches en calcium facilement mobilisables, doivent être conjugués avec les autres apports dans le respect des équilibres permis par le sol et son complexe organo-minéral.</p>

a) Miser sur les engrais verts pour optimiser l'activité microbienne

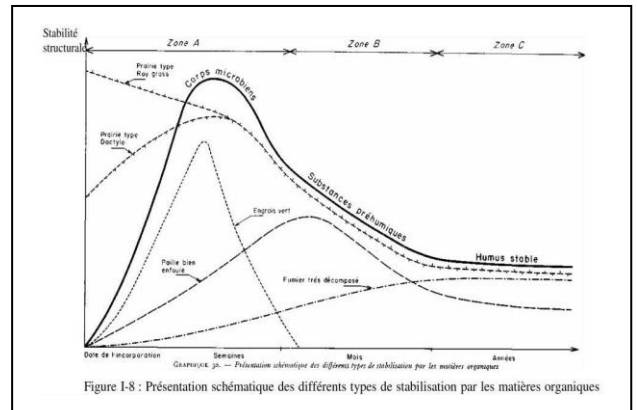
Les engrais verts contiennent du sucre, c'est-à-dire de l'énergie nécessaire aux microbes, et de l'azote. Ils prélèvent dans le sol les éléments dont ils ont besoin pour se développer, puis les libèrent en se décomposant. Une crucifère, par exemple, est capable de mobiliser une quantité importante du phosphore du sol. Si l'activité biologique est suffisante, les éléments libérés ne vont pas se précipiter.

Afin de bénéficier des éléments prélevés par les engrais verts/cultures intermédiaires pour la culture suivante, il faut enfouir :

- lorsque l'activité biologique est présente, c'est-à-dire au début du printemps quand les micro-organismes reprennent leur activité, plutôt qu'en hiver car à ce moment 70 % des micro-organismes sont morts.
- à un jeune stade. Ils doivent être détruits avant la floraison, stade auquel ils contiennent du sucre et de l'hémicellulose. S'ils sont détruits trop tardivement, ils se lignifient. Ils vont alors donner en se dégradant des matières organiques stables.

Ils ne doivent pas être détruits avec un herbicide total type glyphosate. C'est en effet un produit systémique qui empêche la formation des agrégats lors de la dégradation de l'engrais vert. Les plantes détruites par le glyphosate sont très difficilement décomposables et de plus prennent de l'azote pour se dégrader.

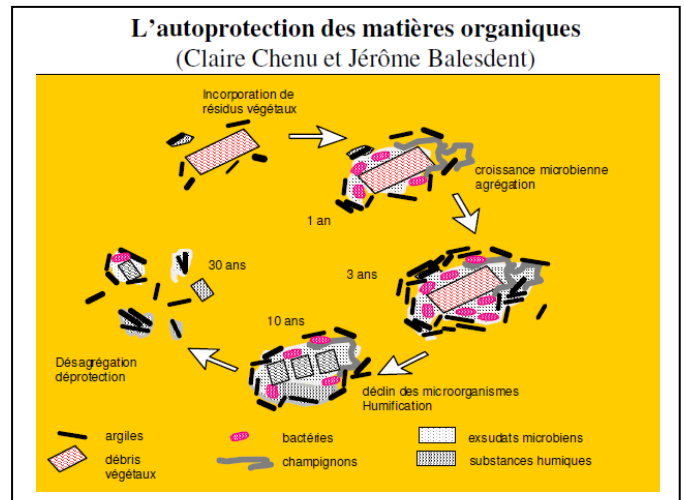
L'effet bénéfique de l'introduction de couverts peut se ressentir par l'augmentation du potentiel de rendement d'environ 10 % pour la culture suivante. Aussi, comme il l'a été abordé précédemment, l'implantation régulière de couverts a une action sur la matière organique et la vie du sol.



b) Les engrais verts pour la stabilité structurale

Lorsqu'un débris végétal atteint le sol, c'est le cas lors de l'enfouissement d'un engrais vert, il est rapidement colonisé par des bactéries et champignons. Les bactéries sécrètent des exsudats, qui jouent un rôle de colle pour les particules du sol, notamment les argiles (bâtonnets noirs du dessin). Au cours de la dégradation de l'engrais vert, on a ainsi formation de micro-agrégats, qui vont donner une structure grumeleuse à la terre. Si aucun autre apport de matières organiques n'est effectué, petit à petit les populations bactériennes vont décliner et les micro-agrégats vont disparaître, faute de bactéries pour produire la colle nécessaire à leur maintien.

On assiste alors à une désagrégation, se traduisant à l'échelle du terrain par une baisse de stabilité structurale, une diminution de la porosité, un tassement du sol. L'effet des engrais verts est très intense sur l'agrégation, mais plus fugace (quelques semaines à quelques mois) que celui d'un fumier ou d'un compost, car les tissus végétaux de l'engrais vert sont rapidement dégradés. L'agrégation provoquée par un enfouissement d'engrais verts est donc forte mais de courte durée.

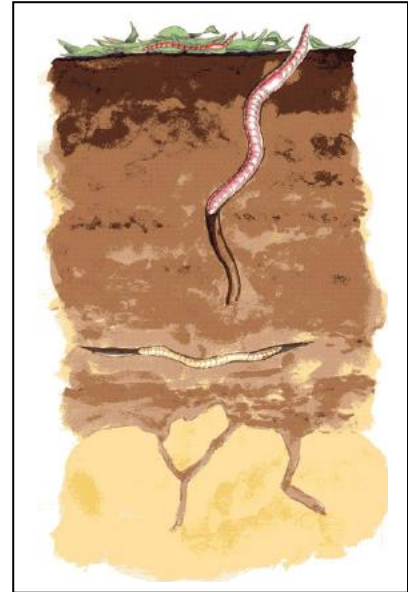


2. Les vers de terre

En fonction de leur mode de vie les vers de terre se répartissent en trois grandes catégories : épigés, anéciques et endogés. Actuellement, la quantité de vers de terre s'élève à environ 100 kg par hectare alors qu'en conditions optimales il devrait y avoir plus de 2 tonnes.

a) *Les vers de terre épigés*

Ils vivent à la surface du sol, au niveau de la litière et dans les matières organiques en décomposition. On les trouvera également dans les excréments des grands herbivores ou dans le bois humide en cours de décomposition. Peu protégés ils subissent une forte prédation qu'ils compensent par une fertilité élevée : 42 à 106 cocons par adulte et par an. Quand la nourriture est abondante et les conditions climatiques favorables, ils peuvent se multiplier très rapidement. Leurs cocons, qui résistent à la sécheresse, assurent la survie de l'espèce. Les vers de terre épigés jouent un rôle important dans le recyclage de la matière organique. On les utilise parfois de façon industrielle pour produire du « lombricompost » et pour traiter les ordures ménagères.

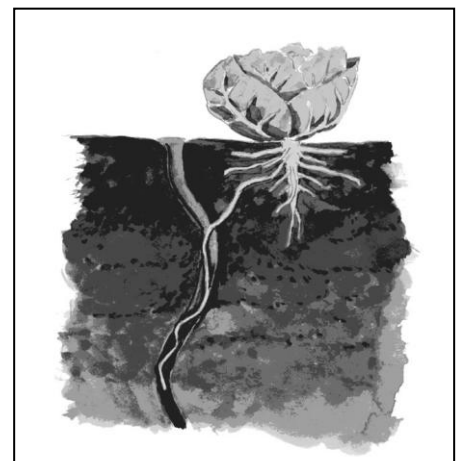


b) *Les vers de terre endogés*

Ils représentent 20 à 50 % de la biomasse des terres fertiles et vivent en permanence dans le sol où ils creusent des galeries horizontales. Ils ne sont pas pigmentés. Ils ont une fécondité moyenne 8 à 27 cocons par adulte et par an. Ils se nourrissent de terre plus ou moins riche en matière organique. En période de sécheresse ils tombent en léthargie et on les trouve enroulés sur eux-mêmes. Les vers endogés présentent des modes de vie assez différenciés. Certains sont filiformes et s'installent le long des racines, d'autres forment des pelotes dans les couches profondes du sol, à proximité des drains, et filtrent l'eau dont ils séparent les particules organiques. On en connaît aussi qui sont prédateurs d'autres vers de terre.

c) *Les vers de terre anéciques*

Ils vivent dans des galeries verticales et viennent « faire leurs provisions » à la surface du sol tout en restant prudemment accrochés par la queue à l'entrée de leur terrier. Les feuilles et les débris organiques qu'ils peuvent entraîner dans leurs galeries sont ingurgités avec de la terre. Les excréments sont déposés à la surface du sol sous forme de tortillons appelés aussi turricules. Des trois groupes ce sont eux qui ont la fécondité la plus réduite : 3 à 13 cocons par adulte et par an. En Europe tempérée, les vers anéciques représentent 80 % de la masse totale des lombrics. En période estivale, ils tombent en léthargie.



d) *Le rôle des lombriciens dans le sol*

Les vers de terre creusent des galeries et ingèrent de la matière organique c'est-à-dire principalement des résidus de végétaux. Leur activité entraîne donc des modifications de la structure du sol car les galeries font partie de la porosité du milieu, qui joue sur les transferts d'eaux et d'air, ainsi que sur la capacité d'enracinement des plantes. Lorsqu'ils ingèrent, digèrent et excrètent de la matière organique, les vers de terre participent également à la transformation physique et chimique des résidus végétaux qui présentent alors une forme plus décomposée.

De même, ils prennent part à l'incorporation dans le sol de la matière organique présente en surface, comme les résidus de culture dans le cas des champs cultivés. Ces animaux font partie des organismes qui modifient le milieu par leur activité et que l'on appelle, en écologie, les ingénieurs de l'écosystème. A un niveau plus global, les vers de terre sont eux-mêmes une ressource trophique pour des animaux de plus grande taille, comme les oiseaux, et leur abondance joue donc sur la biodiversité générale.

e) *Les vers de terre : bons indicateurs des pratiques agricoles*



Les vers de terre sont sensibles aux techniques utilisées par l'agriculteur. En particulier, ils réagissent fortement au travail du sol et à tout ce qui joue sur la quantité de matière organique mise à leur disposition, puisqu'il s'agit de leur nourriture. En règle générale, le travail du sol profond est globalement défavorable aux vers de terre, mais il affecte principalement les vers de type anéciques en détruisant leurs galeries, incorporant dans le sol la matière organique de surface dont ils se nourrissent, voire en les blessant directement.

Les vers de type endogés peuvent par contre être plus nombreux dans les parcelles labourées, car la couche labourée est riche en matière organique, ce qui leur est favorable. La quantité globale de carbone dans le sol est également prépondérante, ce qui fait qu'on trouvera plus de vers de terre dans les prairies que dans des parcelles de grande culture, ainsi que dans les parcelles recevant des amendements organiques fibreux provenant d'élevage (fumier par exemple).

Par rapport à la terre d'origine, les turricules sont beaucoup plus concentrés en éléments minéraux :

- 5 fois plus d'azote assimilable,
- 7 fois plus de phosphore assimilable,
- 11 fois plus de potassium,
- 2 à 3 fois plus de magnésium échangeable,
- 1,5 fois plus de calcium.

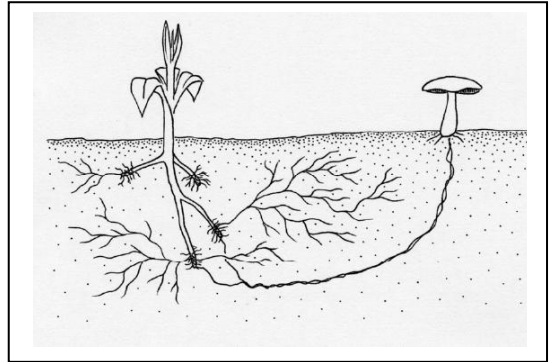
3. Les champignons

Les champignons ne sont pas les plus nombreux des micro-organismes du sol, mais leur poids est très important, du fait de leur grande taille, comparativement aux bactéries. Ainsi, on peut avoir de une à deux tonnes de champignons par hectare de sol agricole. Leurs rôles sont variés ; ils ont une action mécanique sur la structure du sol en enlaçant les particules du sol dans les mailles très fines du mycélium. Ils assurent donc la stabilité structurale du sol. Mais leur rôle le plus déterminant vient du fait qu'ils sont les seuls organismes sur terre, hormis quelques rares bactéries, à être capable de décomposer la lignine des plantes. Or, la lignine est la principale source d'humus dans le sol. Il faut donc bien comprendre que sans les champignons, le cycle de l'humus ne peut se mettre en route. L'enfouissement en profondeur des composés carboniques (pailles, ...) ne sont donc pas favorables au développement du mycélium car les champignons ont besoin d'une importante relation avec l'air.

Certains sont associés aux racines des plantes supérieures en formant des mycorhizes.

a) Les mycorhizes

95 % des plantes bénéficient d'une association avec des champignons du sol en formant des mycorhizes. Cette symbiose, qui concerne également les plantes cultivées, décuple leur volume d'exploration du sol et optimise l'absorption d'éléments nutritifs. Les champignons mycorhiziens se développent comme une vaste toile de filaments minuscules à travers les racines des plantes et dans le sol environnant. Les filaments fongiques, appelés mycélium (ou mycéliums), sont généralement identifiables à leur couleur blanchâtre.



Lorsque les mycorhizes ont accès à des ressources limitées, comme l'eau, le phosphore ou les oligo-éléments, ils peuvent les faire passer aux plantes associées. Les mycorhizes peuvent accroître l'assimilation du phosphore et l'accès des plantes à d'autres nutriments comme l'ammonium, le potassium, le calcium, le fer, le cuivre, le manganèse, le zinc et le nickel.

La résistance à la sécheresse et la tolérance à la chaleur sont d'autres avantages attribués aux mycorhizes. Une partie de cet effet peut s'expliquer par les changements hormonaux que les mycorhizes provoquent chez la plante. Ceux-ci permettent à la plante de conserver un meilleur équilibre de l'eau dans des conditions de sécheresse. Certaines modifications du sol peuvent également influencer la tolérance à la sécheresse. Certains mycorhizes produisent une substance collante qui cimente ensemble les particules du sol en petits agrégats stables. Cette espèce de colle retient l'eau, ce qui représente un avantage direct dans les sols desséchés, et agit également pour réduire l'érosion hydrique du sol.

Beaucoup de pratiques agricoles courantes, comme le labour et l'utilisation d'engrais chimiques, peuvent sensiblement réduire le nombre et les types d'associations mycorhiziennes. Ces pratiques peuvent altérer les peuplements de champignons, réduisant encore plus les bénéfices des associations mycorhiziennes pour les plantes en cause. Par ailleurs, les molécules utilisées à l'encontre des agents pathogènes des cultures ont une action néfaste sur cette symbiose.

La présence des mycorhizes est particulièrement limitée dans les sols riches en phosphore.

Le maïs est une espèce formant beaucoup de mycorhizes, mais l'apport de phosphore sous forme minérale et l'emploi de crucifères (moutarde) en CIPAN nuisent à cette symbiose.

Il existe plusieurs types de mycorhizes en fonction du couple plante/champignon avec deux grandes catégories :

- les endomycorhizes où le champignon croît à l'intérieur des cellules de la plante et émet des hyphes à l'extérieur. Cependant, dans les endomycorhizes, le champignon ne pénètre pas la membrane cellulaire. De plus, il ne croît que dans le cortex primaire et l'épithélium des racines. Il n'envahit jamais les tissus vasculaires ou les autres parties de la plante. Ce sont les mycorhizes présents sur les cultures annuelles,

- les ectomycorhizes où le champignon n'est jamais intracellulaire et reste à l'extérieur des cellules sous forme d'un réseau particulier (le réseau de Hartig). Il pénètre plus ou moins profondément la racine. Ce sont les mycorhizes présents sur les cultures pérennes.

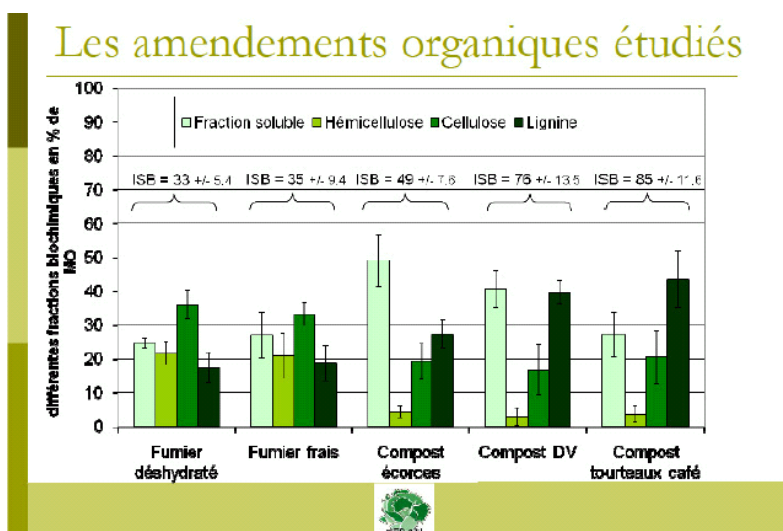
Les champignons :
 Dans 1 m² de sol fertile, le réseau des filaments mycéliens peut atteindre 10 000 km. 3,5 T par hectare sur 20 cm de profondeur.

VII. UN COMPARATIF SUR 10 ANS SUR DIFFERENTES SOURCES DE MO

Des essais en cultures légumières sont conduits à la SERAIL (station d'expérimentation et d'information Rhône-Alpes légumes) depuis 1995. Mis en place pour répondre aux interrogations des maraîchers sur la conservation des sols, des effets de différentes sources et doses de MO. Après 10 ans d'expérience, les premières conclusions ont été synthétisées par 2 ingénieurs de l'ISARA de Lyon (O. DEMARLE et JF VIAN).

Malgré l'approche maraîchère de l'expérience, les grands axes de raisonnement répondent à la problématique de vouloir comprendre, clarifier et donc mieux conseiller une MO. Parmi les MO testées, il faut distinguer trois grands types de produits :

- produits stables :
composts déchets verts
composts d'écorces
- produits dégradables :
fumiers frais
fumiers déshydratés
- composts de tourteaux de cafés enrichis.



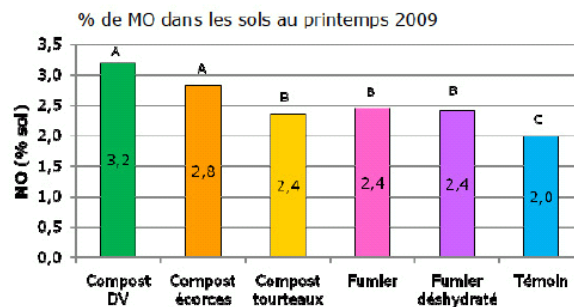
Globalement par rapport au témoin toutes les modalités améliorent les fonctions du sol :

- fertilité chimique : éléments minéraux du sol et disponibilité en plus grande quantité,
- fertilité physique : amélioration de la résistance du sol à la désagrégation par l'eau et à la compaction. Amélioration de la circulation et de la rétention en eau,
- fertilité biologique : stimulation en quantité et en activité des micro-organismes du sol.

Ces améliorations notées, il est clair que l'originalité de cette synthèse réside sur le fait que les MO n'alimentent pas les mêmes fractions de la MO du sol et que les dynamiques d'évolution sont différentes :

1. **Les composts de déchets verts et d'écorces** (même si un effet stimulant sur la biomasse est observé) auront tendance à alimenter davantage le stock en carbone organique (ISB élevée). La dynamique d'évolution est lente. Ils correspondent prioritairement aux situations où la correction première recherchée est l'amélioration du niveau d'humus stable.

Effet sur le statut organique du sol

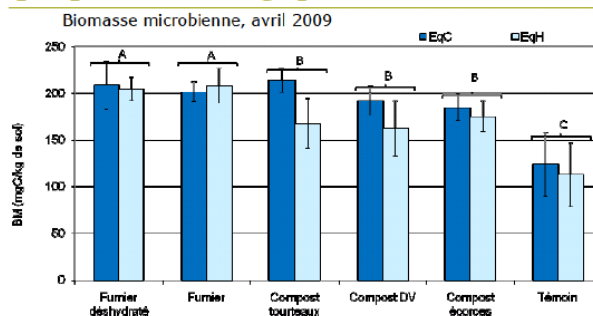


Pas de différences statistiquement significatives de teneur en C_{org} du sol pour les différentes doses d'apports



2. **Les fumiers** stimulent en quantité et en activité la biomasse du sol et augmentent la minéralisation de l'azote. En effet, l'activité des micro-organismes (mesure de l'activité enzymatique) et le niveau de minéralisation de l'azote sont favorisés. Les effets s'expriment sur une courte durée (1 année culturale). Dans ce cas ces derniers influent moins sur le stock en carbone organique du sol.

Influence des amendements sur les propriétés biologiques du sol



Effet de la dose d'apport : Plus l'écart entre les 2 quantités d'amendements apportées est élevé (Compost tourteaux > Compost DV > Compost écorces), plus les valeurs de BM générées sont éloignées.



3. **Le compost de tourteau de café enrichi en fumier de bergerie** alimente plus la biomasse du sol que le stock total de MO, alors qu'il indique à la base un ISB relativement élevé. En fait, ce produit est considéré comme atypique. Cette caractéristique peut s'expliquer par l'adjonction de sources organiques fermentescibles (fumier de mouton et bourres de laine), à des fractions stables (tourteaux de café). En augmentant l'activité microbienne, la dégradation de la fraction stable serait accentuée. Cette dernière alternative est polyvalente et réagit plutôt sur du court terme, notamment sur les propriétés physiques.

Les différents amendements organiques n'ont pas tous la même influence sur les fertilités physiques, chimiques et biologiques des sols. Les préconisations d'utilisation doivent être réalisées au regard du type de sol, du système de culture et de la problématique rencontrée (maintien ou augmentation du taux de MO). Cependant, il n'existe pas forcément un produit pour chaque réponse mais une alternance raisonnée dans le temps peut être bénéfique. De manière générale, nous pouvons conseiller d'associer l'utilisation de produits stables comme le compost de déchets verts et de produit plus fermentescibles comme le fumier afin de bénéficier de leurs effets complémentaires. Dans la mesure du possible, les amendements rapidement dégradables seront apportés chaque année (effet intense mais peu durable dans le temps). Les produits plus stables pourront être apportés tous les deux à quatre ans. Selon la problématique rencontrée, on privilégiera un amendement plutôt qu'un autre, par exemple, un produit fermentescible pour améliorer rapidement un problème de stabilité structurale, un compost végétal pour augmenter la CEC, etc... La dose d'apport devra être raisonnée en fonction du type de sol (granulométrie), de sa teneur initiale en MO et des pertes de MO (lessivage et minéralisation). On ne visera par exemple pas le même objectif de teneur en MO selon que l'on se trouve en sol argileux ou en sol sableux.

VIII. METHODE BOURGUIGNON : VERS UNE NOUVELLE APPROCHE DE LA FERTILISATION DES SOLS AGRICOLES

1. La dynamique du sol

La raison de la fragilité des sols est leur dynamique. En effet, loin d'être stables et immuables, les sols changent rapidement et connaissent, comme les êtres vivants trois phases dans leur dynamique : une naissance, une maturité et une mort. Du fait de cette dynamique, toute action entreprise sur un sol le modifiera soit en accélérant, soit en bloquant une de ces étapes. De plus, du fait de cette dynamique, il est indispensable pour l'agriculteur de savoir à quel stade se trouve son sol car les pratiques de fertilisation ne sont pas les mêmes sur un sol jeune ou un sol mûr.

2. La naissance du sol

Pour qu'il puisse y avoir un sol, il nous faut deux sources de matière : une matière minérale, celle des roches mères, et une matière organique, celle de la litière. Lorsque l'on regarde la composition de base des roches, riches en silice, en fer, en aluminium, et celle des litières riches en carbone, en azote, en phosphore, on peut se demander comment deux milieux aussi différents font-ils pour se fusionner ? En fait, leur fusion est possible car ils se transforment tous les deux en des substances électriquement chargées selon le schéma n°1. Les roches donnent naissance à des argiles chargées négativement et les litières se transforment en humus chargés aussi négativement. **Le sol provient de la fusion des argiles et des humus grâce à des cations ayant deux charges positives, une pour l'argile, une pour l'humus.** Ce sont le calcium, le magnésium, le fer et l'aluminium. Nous venons ainsi de mettre en évidence les composants primaires fondamentaux des sols : les argiles, les humus et les liens.

Tout agriculteur doit connaître ces bases, car la fertilité d'un sol dépend directement de la qualité de ces composants primordiaux.

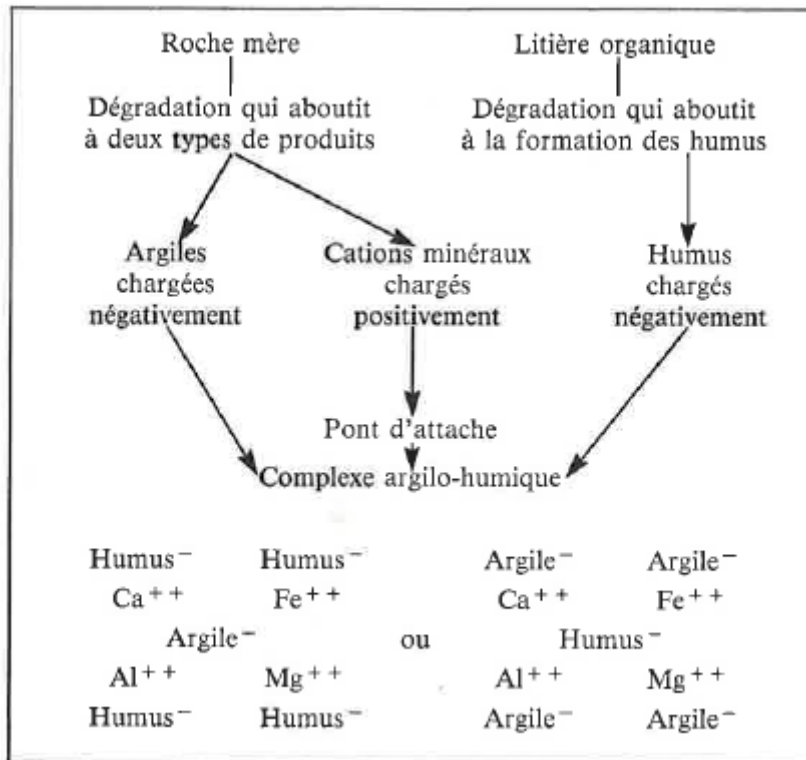


Schéma n°1 : La formation du complexe argilo-humique (LAMS)

La qualité des argiles d'un sol se mesure au laboratoire par la surface interne de ses feuillets. Cette surface varie énormément selon les argiles. Ainsi les moins fertiles des argiles, les Kaolinites présentent 10 à 30 m²/g alors que les meilleurs, les Montmorillonites ont 800 m²/g. Il est fondamental pour un agriculteur de connaître la surface interne du mélange argileux qu'il cultive. En effet, si les argiles de son sol sont de mauvaise qualité il pourra amender son sol avec de bonnes argiles.

La qualité des humus se mesure à leur capacité d'échange cationique (CEC) qui va de 100 meq/100 g pour les moins bons humus (Mor) à 600 meq/100 g pour les meilleurs humus (Mulls). Là encore, tout agriculteur aurait intérêt à connaître la qualité des humus de son sol et l'améliorer en choisissant les amendements correspondants.

Enfin, la qualité des liens se classe de façon décroissante selon la liste suivante : Calcium, Magnésium, Fer et Aluminium.

3. La maturité du sol

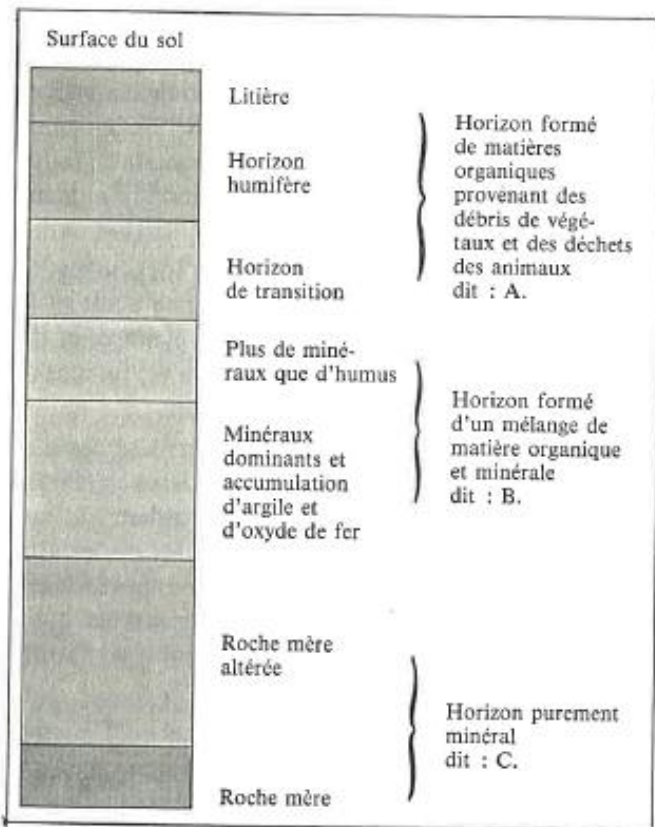


Schéma n°2 : profil cultural avec les principaux horizons (LAMS)

La maturation du sol, décrite dans le schéma n°2, se traduit par deux facteurs : un épaissement de l'horizon B organo-minéral et un renforcement du lien calcium par le lien fer que l'on appelle : brunification. Les acteurs principaux, à l'état sauvage, de cette maturation sont les vers de terre qui sous nos climats mangent 200 à 300 tonnes de sol/ha/an soit un brassage total du sol tous les 10 ans. En cultivant le sol de manière agressive (labour), l'agriculteur supprime l'horizon A où se forme l'humus. Si en contrepartie, l'agriculteur ne restitue pas de l'humus, il bloquera la maturation de son sol car les roches mères continueront de produire de l'argile mais celles-ci partiront avec l'eau de ruissellement du fait de leur charge électrique négative qui s'attache avec la charge positive de l'eau. **L'apport d'humus par l'agriculteur au rythme d'1 à 2 tonnes/ha/an est donc indispensable à la maturation d'un sol agricole.**

4. La mort des sols

A l'état sauvage, les sols finissent par mourir car l'horizon B devient tellement épais que la vitesse de brassage par les vers de terre devient inférieure à la vitesse de minéralisation des humus et des argiles par les micro-organismes. Le complexe argilo-humique se détruit progressivement et le sol devient alors sensible à l'érosion hydrique et éolienne. Il est alors emporté au fond des océans où il formera des sédiments. La roche mère sera à nouveau mise à nue et une nouvelle naissance de sol recommencera. **En sol cultivé, le manque d'amendements organiques et la baisse du taux d'humus entraînent le sol dans la voie de l'érosion et donc de sa mort.**

5. La biologie du sol

La terre abrite la vie depuis 3 milliards d'années grâce au recyclage permanent des éléments atomiques qui constituent les êtres vivants. Sans les cycles, la terre aurait été rapidement épuisée. Or, les seuls organismes capables de récupérer les éléments de la litière organique ou de solubiliser les éléments des roches mères sont les micro-organismes du sol. Ils sont 1 milliard/g de sol et tous les autres organismes vivants dépendent de leur travail. Les plantes sont donc dépendantes des microbes pour leur besoin en nitrate qui est la seule forme assimilable par la plupart des végétaux (la forme ammoniacale de l'azote n'est utilisable qu'au stade jeune). Or, il en va de même pour l'ensemble des éléments du sol. Le rôle des microbes est donc de transformer les éléments en formes assimilables par les plantes.

Pour cela, ils utilisent deux méthodes :

- l'oxydation : on connaît à l'heure actuelle, 6 éléments qui sont oxydés par les microbes : l'azote oxydé en nitrate, le phosphore en phosphate, le soufre en sulfate, le sélénium en sélénate et les deux cations doublement positifs que sont le calcium et le magnésium. Ces formes oxydées possèdent une ou plusieurs charges négatives. **Elles ont de ce fait la particularité d'être solubles dans l'eau et d'être ensuite assimilables par les plantes.**
- la chélation : la plupart des éléments, soit une vingtaine actuellement connus, sont insolubles à l'état d'oxyde et sont donc inassimilables par les plantes. Pour les rendre assimilables les microbes utilisent le processus de chélation qui consiste à attacher ces éléments sur des acides organiques qui sont solubles du fait de leur charge négative. Ces acides organiques servent alors de véhicule aux éléments vers la racine. Les plantes sont donc loin d'être des consommatrices exclusives de substances minérales comme le présente l'agronomie moderne, mais au contraire c'est sous forme organique qu'elles absorbent le plus grand nombre d'éléments. **La relation sol-plante-microbe semble très complexe puisqu'il a été montré qu'une plante carencée en un élément, le manganèse par exemple, stimulait spécifiquement, à l'aide de ses exsudats racinaires, la microflore chélatante du manganèse.** Il y a donc un véritable dialogue plantes-microbes qui dépasse en complexité une simple absorption d'éléments minéraux. Cette approche biologique des sols nous permet de voir sous un angle nouveau l'alimentation des plantes.

6. Les végétaux ont la particularité de se nourrir dans deux milieux : l'air et le sol.

a) L'alimentation atmosphérique des plantes

Quatre éléments constitutifs des plantes proviennent de l'atmosphère. A eux seuls, ils représentent 95 % de la matière sèche des végétaux. Ce sont le carbone, l'oxygène, l'hydrogène et l'azote. Les premiers fournissent 94 % du poids sec des plantes et proviennent du gaz carbonique pour le carbone et l'oxygène, et de l'eau de pluie pour l'hydrogène grâce à la photosynthèse et à la photo décomposition de l'eau. Les agriculteurs n'ont pas à se préoccuper de la restitution de ces éléments puisque lors de la consommation des aliments, la respiration émet le gaz carbonique et la vapeur d'eau dans l'air. **Le quatrième élément atmosphérique, l'azote, entre dans le sol grâce à la fixation biologique. Pour l'encourager il suffit de cultiver des fabacées.**

b) L'alimentation des plantes dans le sol

Si le sol ne fournit que 5 % de la matière sèche des plantes, l'assimilation de ses éléments n'est pas simple. En effet, le problème qui se pose aux plantes pour assimiler les éléments du sol est lié au fait que le sol est riche en silice, fer et aluminium alors que les plantes en sont pauvres. A l'inverse, les plantes sont riches en azote, phosphore et soufre qui sont rares dans les sols. Les plantes sont donc obligées de pratiquer une assimilation sélective. Pour cela, elles créent de façon active une force électrique positive qui s'oppose aux forces de concentration. Dans cette stratégie de l'assimilation des éléments du sol ceux-ci se divisent en deux groupes :

- *les éléments responsables de la force électrique positive.* Ce sont les 6 atomes porteurs d'une charge positive : hydrogène (H⁺), lithium (Li⁺), sodium (Na⁺), potassium (K⁺), rubidium (Rb⁺) et césium (Cs⁺). **Ces atomes ne sont pas assimilés pour constituer les tissus végétaux, mais pour charger positivement les cellules racinaires.** Cette absorption active coûte de l'énergie aux plantes. Lorsque les plantes ont fini leur cycle d'assimilation dans le sol, c'est-à-dire après la floraison, **ces éléments sont rendus au sol par les racines.**
- *les éléments constitutifs des végétaux.* Ce sont tous des éléments solubilisés par les microbes grâce aux voies de l'oxydation ou de la chélation. L'homme copie ces réactions et fabrique des engrais à l'aide de l'industrie chimique.

Cette stratégie complexe de l'assimilation des éléments du sol est très éloignée d'un simple apport d'azote, de potassium et de phosphore comme le font la plupart des agriculteurs. On comprend alors mieux pourquoi les plantes cultivées de façon intensive ont besoin de produits phytosanitaires. **Elles sont en effet carencées en éléments mobilisés par les microbes et surchargées en N, P et K.** En traitant ces plantes malades on achève de détruire les microbes du sol et on augmente les carences en oligo-éléments des végétaux. C'est le cycle infernal des engrais et pesticides. Pour le rompre il faut redonner au sol la place qu'il mérite au sein de l'agriculture.

7. Vers une nouvelle approche analytique des sols agricoles

Pour fertiliser correctement un sol agricole, il faut d'abord le connaître et pour cela effectuer une analyse globale : physique, chimique et biologique.

a) Analyse physique d'un sol agricole

Après avoir identifié sur le terrain les différents horizons du sol, on prélève la partie travaillée et les différentes parties profondes. Sur chaque couche, on effectue une mesure de la surface interne des argiles. Ceci permet de voir si le sol est en phase de naissance (augmentation des surfaces internes vers la surface du sol) de maturité (égalité des surfaces internes sur tout le profil) ou de mort (perte de surface interne en surface).

b) Analyse chimique d'un sol agricole

Comme pour l'analyse physique, les mesures chimiques (pH, CEC, % de MO) sont effectuées sur les différents horizons afin de comparer le sol travaillé avec le sol de profondeur. Dans le cas de la CEC, on mesure celle des argiles et celle des humus. Cette approche qualitative des humus permet de bien connaître le statut organique du sol. On peut alors conseiller l'agriculteur sur les doses d'humus qu'il doit fabriquer lors du compostage. **L'étude de la carte géologique et les mesures des teneurs en éléments du sol travaillé et du sol de profondeur, permettent de mettre en évidence les carences qui seront supprimées par des apports de poudres de roches riches en éléments absents dans les sols.** Ces roches seront mises dans le compost afin d'être solubilisées par les microbes. Ces mesures mettent aussi en évidence les excès en certains éléments qui seront réglés par la restauration du complexe argilo-humique. En effet, à la suite des amendements on observe une remontée de la CEC et un rééquilibrage des pH vers 7 ce qui rend les éléments toxiques moins solubles.

c) Analyse biologique d'un sol agricole

Afin de confirmer les données physiques et chimiques, on effectue la mesure de l'activité biologique des sols agricoles aux différentes profondeurs. Dans les sols équilibrés, l'activité biologique est maximale en surface et diminue avec la profondeur. **Lorsqu'un sol est en voie d'érosion (perte des argiles, des humus et des liens) l'activité biologique de surface est égale à celle du fond du profil.** Pour des sols recevant trop de pesticides (arboriculture, maraîchage), l'activité biologique de surface peut être inférieure à celle du fond. Ces mesures d'activité biologique nous permettent de savoir si le sol est encore un milieu vivant ou s'il est entré dans une voie de minéralisation qui le conduira à la mort. L'absence de vie microbienne dans l'horizon de surface entraînera une carence dans l'alimentation des plantes et ce même sur un sol riche.

8. Le rôle du sol dans la typicité des produits agricoles

Comme nous venons de le voir, le sol n'est nutritif pour une plante qu'au niveau du complexe argilo-humique. Ce complexe a une double origine : une origine minérale qui est liée à la roche mère et une origine organique liée au type de litière. Chaque roche en fonction de son origine géologique fournit donc un certain mélange argileux et une certaine proportion de liens (calcium, magnésium, fer, aluminium). Le climat et la topographie influencent bien sûr la constitution de cette fraction minérale du complexe argilo-humique. Sous différents climats et différentes topographies une même roche pourra donner naissance à des mélanges d'argiles et des proportions de liens différentes. Ces trois composantes, climatique, topographique et géologique vont aussi avoir une influence sur la croissance des différentes espèces de plantes, donc sur la composition de la litière et de ce fait sur la nature des humus. On cerne ainsi facilement le rôle du sol sur la typicité d'un produit agricole. C'est lui qui fournira par sa capacité d'échange en cations et l'équilibre de ses populations microbiennes les éléments nutritifs pour les plantes selon une certaine proportion.

IX. Méthode BRDA-Hérody

La méthode BRDA-Hérody, de plus en plus utilisée en bio, propose une approche globale d'analyse de sol, différente de la méthode classique. Elle part du principe que la composition du sol est régulée par la nature et l'état du complexe organo-minéral. L'objectif est de le connaître précisément pour l'optimiser. D'où la nécessité de prendre en compte toutes les informations géologiques et climatiques pouvant avoir une incidence sur la fertilité.

La méthode BRDA-Hérody considère que les analyses de laboratoire sont insuffisantes, ne reflètent pas forcément l'activité biologique réelle de la parcelle. C'est pourquoi il est important de prendre en compte les caractéristiques de terrain. Deux raisons expliquent cette position : d'une part, l'échantillon au laboratoire ne possède plus les mêmes conditions physiques que dans la parcelle (asphyxie, tassement,...) ; d'autre part, le risque d'entraînement d'un élément nutritif par l'eau hors du profil du sol ne peut pas être pris en compte comme il le devrait. L'approche Hérody permet d'avoir une analyse plus globale et plus précise de la fertilité du sol qui est un ensemble organisé, formé de constituants minéraux et organiques plus ou moins intimement associés. Elle intègre les différents paramètres qui gèrent ces associations. Il s'agit des composants organiques (composants humiques à ne pas confondre avec la matière organique totale) et des composants minéraux actifs (limons fins et argiles), reliés par des liens minéraux (fer de liaison et fer amorphe). La présence de bases alcalino-terreuses (calcium et magnésium) régit la stabilité de ces liens. Il est indispensable de faire le point sur tous ces paramètres pour connaître le complexe organo-minéral (COM).

1. Observer de près le profil cultural

Même si elle ne donne pas toutes les clés pour comprendre le fonctionnement du sol, l'observation physique du profil cultural est une étape essentielle. En allant voir un peu au-dessous de l'horizon habituellement travaillé, cette approche peut remettre en cause certaines pratiques. Les problèmes de compactage, d'asphyxie et de non décomposition de la matière organique peuvent se rencontrer aussi en Agriculture Biologique.

En effet, le fonctionnement du sol est d'abord influencé par les caractéristiques physico-chimiques du profil cultural. Il faut donc creuser une ou plusieurs fosses d'un mètre de profondeur environ pour observer le sol. Un milieu suffisamment poreux et aéré est aussi important pour l'activité microbienne que pour l'absorption des nutriments par les racines. Avant de décider des apports de matières organiques, il faut savoir si les conditions d'aération du milieu permettront une bonne décomposition de l'apport. L'état racinaire, notamment sa profondeur, est aussi un paramètre à ne pas négliger.

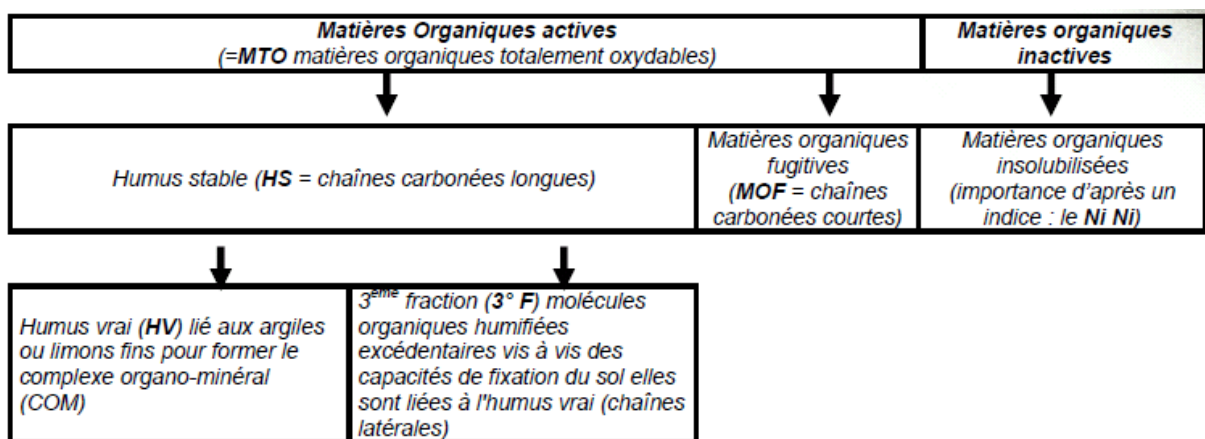
2. Déterminer la composition de la roche-mère

Observer la roche-mère s'avère indispensable. Sa composition et son degré d'altération nécessaires à la mobilisation des éléments apportent de nombreuses informations pédologiques. Attention, évitons l'amalgame entre la nature de la roche et la nature du sol ; il est fréquent de trouver des sols non calcaires sur une roche calcaire.

La roche-mère va déterminer d'abord la nature des particules minérales présentes servant de trame à la construction de complexe organo-minéral. Elle indique aussi le niveau de présence des éléments de liaison permettant d'accrocher la matière organique sur cette trame. Elle fournit également des informations sur les éléments minéraux disponibles pour les plantes et les micro-organismes. Les carences éventuelles pouvant être décelées sont évidemment des facteurs limitant la fertilité. Mais ils sont moins à redouter que les excès, sources de réactions chimiques perturbant la disponibilité d'autres éléments ou le cycle de la matière organique.

3. Comprendre le climat et le comportement de la matière organique

Le paramètre climatique, notamment l'état des températures et des précipitations, est lui aussi déterminant. Il conditionne en effet les possibilités de transformation des matières organiques dans le sol. Celles-ci peuvent être uniquement minéralisées, c'est-à-dire décomposées en petites molécules solubles libres appelées MOF (matières organiques fugitives), qui ne font donc pas partie du COM (complexe organo-minéral). Elles peuvent être également humifiées, c'est-à-dire réorganisées sous forme d'humus stable (HS), appartenant au COM. Enfin, elles peuvent aussi être ni minéralisées, ni humifiées (Ni-Ni), c'est-à-dire qu'elles vont s'accumuler sous des formes peu évoluées et ne pas participer à la fertilité du sol.



Éléments mesurés	Définition (rôle)	Indication donnée
CF : coefficient de fixation (échelle de 0 à 7)	Détermine la qualité des éléments minéraux actifs : - les argiles « vraies » ayant des propriétés colloïdales, - les limons fins qui ont de faibles capacités de fixation, grâce au fer amorphe.	Capacité du sol à former un complexe organo-minéral. Détermine les doses possibles d'apports organiques et minéraux.
MTO : matières organiques totales	MTO = MOF + Humus "vrai" lié au minéral + 3 ^{ème} fraction (3F) humus non lié au minéral + une partie de MO brute non transformée	L'équilibre entre les différentes fractions permet de mieux gérer les apports organiques : - type d'apport : précurseur de MOF (fumier frais, lisier) ou d'HS (compost évolué), - dose d'apport, - date d'apport.
MOF : matières organiques fugitives	Carburant de la vie microbienne.	- Optimum de 20 % de MOF/MTO. Cette valeur fluctue dans l'année en fonction du lessivage et du fonctionnement du sol.
3 F : 3 ^{ème} fraction	Humus non lié aux particules minérales actives. Chaînes latérales liées à l'humus "vrai".	Réserve d'humus, mais ne doit pas être en quantité trop importante, signe d'une surcharge organique du sol (apports trop importants) ou de liens fer en quantité insuffisante. Souhaitable : < 0,5.
Indice d'insolubilisation Ni-Ni : ni minéralisé, ni humifié	Traduit l'importance de la MO brute = fraction inactive.	Différents seuils correspondent à des niveaux de blocage de la matière organique à l'état brut : - déceler la cause de ce blocage.

4. Optimiser la fertilité du sol

Il faut enfin savoir si le complexe organo-minéral est en cours de constitution, de transformation ou de dégradation. Les pratiques agricoles peuvent d'ailleurs accélérer ou ralentir ces évolutions que l'on peut juger si un apport ou une pratique améliore le fonctionnement du sol ou non.

Le raisonnement des amendements doit viser la régulation des flux de matières organiques. Il s'agit de se rapprocher d'un équilibre optimum MOF/HS, en privilégiant des apports spécifiques. Certaines matières organiques sont considérées comme précurseurs de MOF comme les fientes, les tourteaux, les engrais verts,... alors que d'autres sont principalement des précurseurs de HS (paille, composts, bois de taille type BRF, ...).

5. Doser l'apport organique

Le compostage se justifie dans des sols déficitaires en HS, avec des conditions défavorables à l'évolution des matières organiques. Dans certains sols, l'usage de composts réducteurs donne de meilleurs résultats que celui du compost aéré. Le compost mûr peut être un facteur d'amélioration pour les sols ayant un niveau de MOF élevé mais est à proscrire dans ceux qui accumulent la matière organique.

L'apport de guanos, fientes et autres engrais organiques, ne faisant jamais d'humus stable, sera indiqué dans les déficitaires en MOF ou présentant des taux de matière organique trop élevés, à dose adaptée à la culture ou au coefficient de fixation (CF) du sol considéré. En revanche, dans les sols qui minéralisent beaucoup, leur emploi peut conduire à faire chuter le taux d'humus stable, entraînant ainsi des problèmes physiologiques pour les plantes.

6. Evaluer les besoins en chaulage

Les pertes en éléments basiques, dues aux prélèvements des plantes et à l'érosion, sont compensées par l'altération de la roche-mère dans le cas des sols calcaires, qu'il ne faut surtout pas chauler. En revanche, les sols décarbonatés ou acides nécessitent des apports pour entretenir et rétablir la saturation du complexe organo-minéral. Le choix de l'amendement calcaire doit être compatible avec l'ensemble des données du sol.

Le fonctionnement du sol et la gestion des apports dépendent aussi de l'irrigation, du drainage, du travail du sol et du choix des engrais. Il s'agit d'assurer un équilibre de disponibilité entre tous les éléments dont ont besoin les plantes et les micro-organismes en volume et surtout en flux. La qualité des fruits par exemple est liée à cet équilibre. Cela concerne la teneur en sucres et en acides, l'état sanitaire et l'aptitude à la conservation.

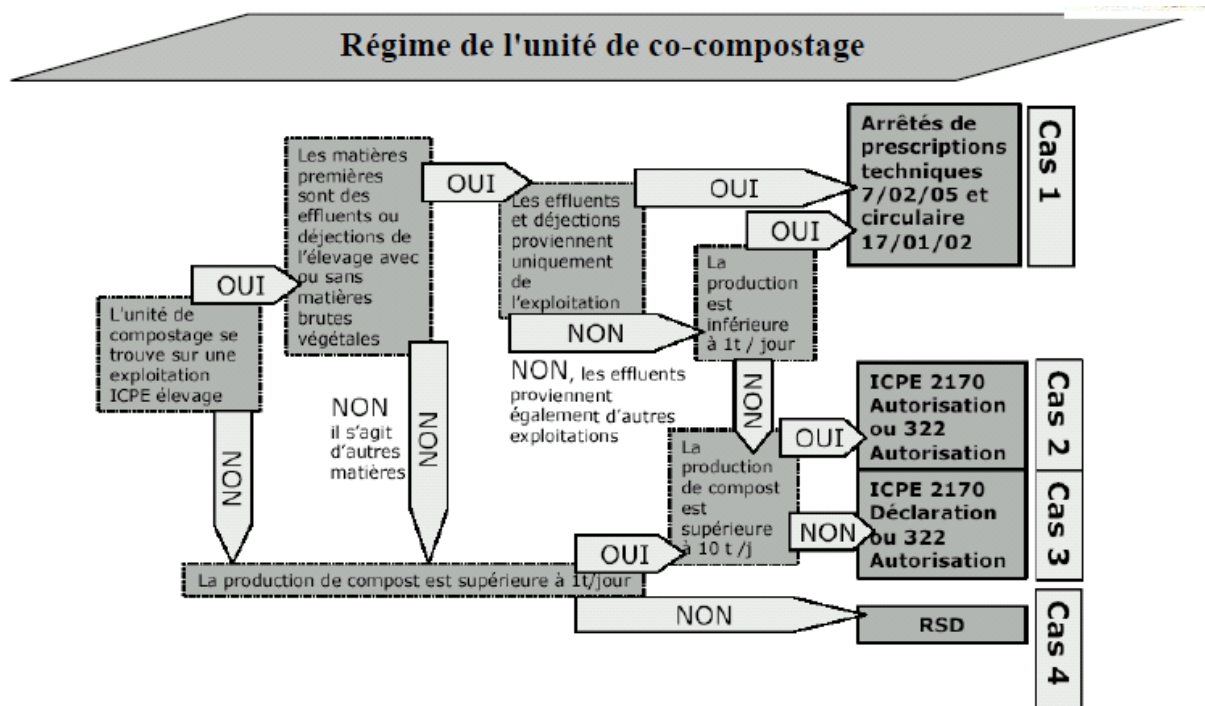
7. Choisir ses engrais

Ainsi, le choix des engrais va de pair avec le fonctionnement du sol, même si cette règle implique parfois des surcoûts. Quant aux doses et aux fréquences des apports, elles doivent être raisonnées en fonction du coefficient de fixation (CF) pour éviter les risques de dérives du fonctionnement du sol ou de pollution.

La difficulté est de savoir à quel rythme ces produits vont se décomposer dans le sol. Les minéralisations tardives des composts se traduisent plus souvent par des problèmes phytosanitaires suite à une faim d'azote que par le renforcement de la vigueur de la culture.

PARTIE II : LE COMPOST

I. COMPOSTAGE ET LEGISLATION



Critères d'application des différentes réglementations relatives à une unité de co-compostage à la ferme

2 statuts sont possibles (ICPE élevage ou RSD) selon le nombre d'animaux qu'abritent les bâtiments

Type d'élevage	Installations soumises au Règlement Sanitaire Départemental	Installations classées	
		Soumises à Déclaration	Soumises à Autorisation
Veaux de boucherie et/ou bovins d'engraissement	Jusqu'à 49	50 à 400	Plus de 400
Vaches laitières et/ou mixtes	Jusqu'à 49	50 à 100	Plus de 100
Vaches allaitantes	Jusqu'à 99	Plus de 100	/

Cas 1 : Prescriptions applicables aux unités de compostage se trouvant sur le site d'un élevage soumis à la législation des ICPE

Le compostage des fumiers de plus de deux mois (fumiers compacts non susceptibles d'écoulement issus d'un stockage de deux mois sous les animaux ou sur une fumière) peut être réalisé aux champs sans installation spécifique.

Quelques conditions à respecter :

- l'adjonction d'**effluents liquides** (eaux vertes, brunes, purins) et de lisiers est **interdite**,
- la quantité compostée sur chaque site ne doit pas excéder les besoins annuels des parcelles avoisinantes destinataires du compost,
- les zones de compostage doivent être modifiées chaque année : le retour sur le même emplacement n'est pas possible **avant 3 ans** et la durée de stockage doit être inférieure à **10 mois**.

NB : En cas d'apport d'effluents liquides ou de fumier de moins de 2 mois, une aire étanche avec récupération des jus doit être créée.

Le stockage du compost **ne peut être réalisé** :

- sur des sols où l'épandage est interdit,
- en zones inondables,
- en zones d'infiltration préférentielle (failles, bétoires...),
- sur terrains en forte pente.

Une unité de compostage est considérée comme **une annexe** aux bâtiments d'un élevage classé et doit satisfaire aux conditions d'installations et d'épandage suivantes :

- **à au moins 35 m des berges de cours d'eau**, plans d'eau, aqueducs d'eau potable, installations souterraines pour le stockage des eaux,
- **à au moins 100 m des puits et forages**,
- **à au moins 200 m des lieux de baignade**,
- **à au moins 500 m** en amont des **piscicultures** et au moins **35 m** en aval,
- **à plus de 100 m des habitations ou des lieux publics** (stades, terrains de camping, bureaux, magasins...).

Cas 4 : Prescriptions applicables aux unités de compostage soumises au RSD

Il suffit de faire une déclaration en mairie et de respecter les dispositions du Règlement Sanitaire Départemental (RSD, dans ses articles 158 et 159). Il faut en particulier respecter les normes environnementales sur les métaux lourds, sur les distances par rapport aux points d'eau (35 m en général et 100 m pour les captages des réseaux publics), aux périmètres de protection, aux zones protégées, aux voies de communication (5 m) et il faut enfin tenir compte de la directive nitrates. Le site de compostage peut, le cas échéant, faire l'objet d'un Arrêté Municipal d'Exploitation précisant les mesures de protection du milieu naturel et du voisinage, qui ne peut pas en principe être plus contraignant que le RSD.

Cas 2 et 3 :

La rubrique 322 est relative à la gestion des ordures ménagères.

La rubrique 2 170 des ICPE est, quant à elle, relative à la fabrication des engrais et supports de culture à partir de matière organique (arrêté du 7 janvier 2002) qui demande des plateformes étanches avec système de récupération des jus d'écoulement, analyses des lots de matières premières et de compost...

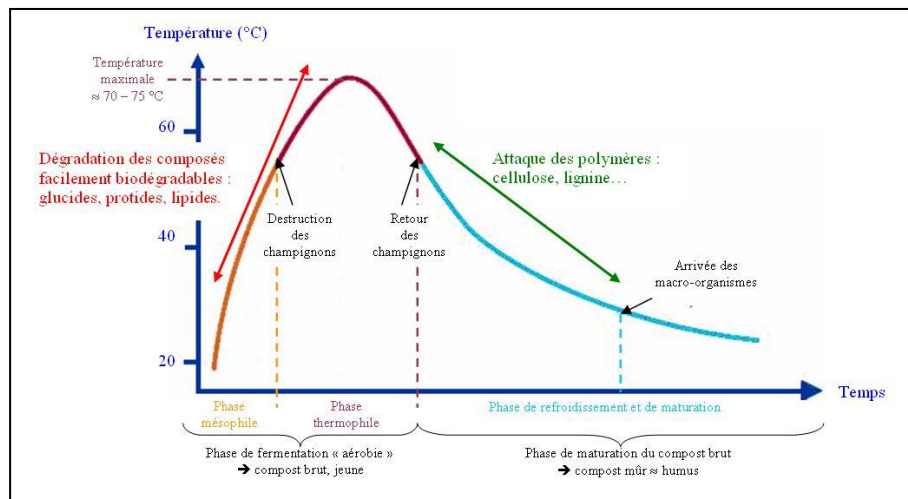
Les **prescriptions** de la rubrique 2 170 sont donc relativement **lourdes** pour des opérations agricoles qui traitent de petits volumes et dans lesquelles le compost est utilisé uniquement sur l'exploitation.

Les cas 2 et 3 sont, par conséquent, plus difficilement envisageables dans le cas de co-compostage à la ferme.

II. LE COMPOSTAGE

1. Les 4 phases du processus

Le processus du compostage peut être décomposé en 4 phases. Plusieurs paramètres (température, pH, taux d'oxygène...) présentent des variations au cours du compostage. L'évolution de la température, qui exprime l'activité de la succession de populations microbiennes liées aux modifications du milieu, est la manifestation la plus perceptible de la dynamique du compostage. Elle permet de distinguer 4 phases :



- **La phase mésophile** est la phase initiale du compostage. Les matières premières sont envahies par les micro-organismes mésophiles indigènes (bactéries et champignons essentiellement), absorbant les molécules simples (sucres simples, acides aminés, alcools...) et transformant une partie des polymères (protéines, acides nucléiques, amidon, pectines, hémicellulose, cellulose,...). Leur activité engendre une montée en température (de 10-15°C à 30-40°C), un dégagement important de CO₂ (d'où la diminution du C/N) ainsi qu'une acidification. La dégradation de la cellulose durant cette phase est responsable de plus de 75 % de la perte de poids sec.
- **La phase thermophile** est atteinte au centre du tas, à des températures élevées (de l'ordre de 60 à 70°C pour les composts agricoles) auxquelles ne résistent que les micro-organismes thermotolérants et thermophiles (arrêt de l'activité des champignons, développement des actinomycètes et des bactéries thermophiles). Les pertes en azote, minéralisé sous forme ammoniacal (NH₄⁺), qui peut être volatilisé sous forme d'ammoniac (NH₃) dans certaines conditions, ainsi que l'évaporation d'eau, sont plus importantes au cours de cette phase. La libération de CO₂ peut entraîner, à la fin des phases thermophiles, jusqu'à 50 % de perte en poids sec.

Les hautes températures caractérisant la phase thermophile ne concernent que le centre du tas.

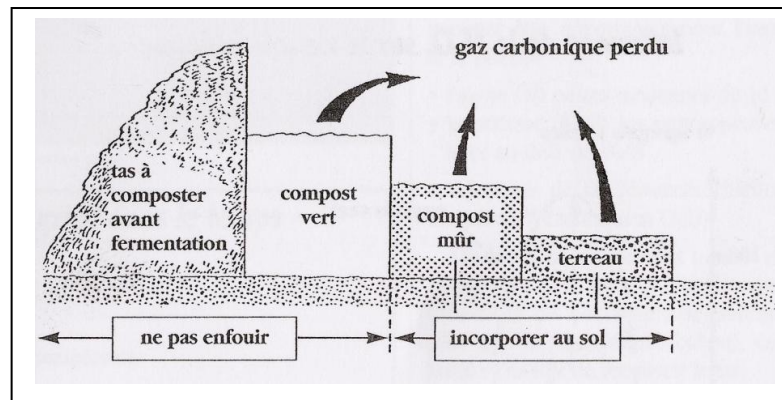
Les matières présentes en bordure de tas doivent être reprises par un ou deux retournements. Après un retournement, on observe la succession des 3 phases (mésophile, thermophile, de refroidissement); les températures atteintes en phase thermophile sont cependant de moins en moins élevées au fur et à mesure des retournements. Cette technique permet de s'assurer que tous les éléments du tas subissent les différentes phases du compostage afin que le produit final soit homogène et entièrement assaini.

- **La phase de refroidissement** est la phase intermédiaire entre la phase thermophile et la phase de maturation. Elle prend fin avant le retour à la température ambiante. Le milieu est colonisé de nouveau par les micro-organismes mésophiles. Ils dégradent les polymères restés intacts en phase thermophile et incorporent l'azote dans des molécules complexes.
- **La phase de maturation** présente peu d'activité micro-biologique (recolonisation par des champignons) mais est adaptée à la colonisation par la macro-faune, en particulier les lombrics lorsque ceux-ci sont présents dans l'environnement du tas. Les matières organiques sont stabilisées et humifiées par rapport aux matières premières mises à composter.

Les trois premières phases sont relativement rapides par rapport à la phase de maturation. Leur durée ainsi que l'amplitude des variations dépendent cependant des matériaux de départ et des conditions techniques dans lesquelles s'effectue le compostage. Les dates de retournements ne peuvent donc être fixées selon un calendrier précis, mais sont déterminées par la baisse de la température.

La phase de maturation se prolonge jusqu'à l'épandage du compost. On peut définir une durée de maturation puisque cette dernière dépend de la composition des matières premières. On peut cependant distinguer les composts de déchets ligno-cellulosiques (fumiers), qui peuvent être utilisés au bout de 6 semaines (la phase de maturation est alors très courte, voire inexistante), des composts de déchets ligneux (les composts de déchets verts) qui ne sont utilisés en général qu'au bout de 6 mois.

La tendance actuelle évolue vers le compostage court et une utilisation rapide pour éviter des stockages longs qui augmentent les risques de recolonisation superficielle du tas par des graines d'adventices et les pertes d'ions monovalents par lixiviation (K^+ , Na^+ , NO_3^- ...).



2. Les avantages du compostage

Le compostage permet d'obtenir un amendement relativement assaini, applicable à l'ensemble des cultures, qui accroît le taux d'humus du sol et stimule la vie microbienne du sol.

La gestion des matières organiques par cette voie offre plusieurs avantages.

- Elle permet de contrôler les pertes en éléments fertilisants. Il n'est pas possible de supprimer totalement ces pertes qui restent inévitables, en azote gazeux notamment lors de la constitution du tas et des retournements, mais elles sont bien moindres que celles qui se font lors d'un épandage de fumier frais.
- Elle assure une désodorisation des effluents d'élevage. En effet, les micro-organismes du compostage recyclent l'azote ammoniacal responsable des odeurs indésirables.

- Elle permet la destruction de certains germes pathogènes et de certaines graines d'adventices. C'est la combinaison de la montée en température et de facteurs biochimiques de la dégradation qui assure cette destruction. C'est un avantage très important pour l'agriculture biologique.
- Elle diminue les quantités de matière organique à stocker et à épandre. La diminution de masse est de 30 à 60 % en moins de 3 mois.
- Elle permet une délocalisation des épandages dans le temps et dans l'espace, c'est-à-dire une meilleure adéquation du calendrier d'épandage à celui des végétaux et de leurs besoins, et aux contraintes pédoclimatiques.
- Enfin contrairement aux fumiers et lisiers, le compost, épandu sur prairies, ne risque pas de nuire à l'appétence de l'herbe puisqu'il n'est plus porteur d'odeurs indésirables.

3. Inconvénients et limites du compostage

- Certains parasites et pathogènes ne sont pas détruits.
- Les éléments traces métalliques (métaux lourds) présents dans les matériaux de départ ne sont pas éliminés par le compostage, au contraire : ils se concentrent à cause de la réduction du volume.
- Composter convenablement réclame un minimum d'organisation et de disponibilité. Mettre en œuvre un chantier de compostage nécessite de la place, du temps pour le suivi (surveiller que le compostage se déroule bien) et les interventions (retourner l'andain, le couvrir, l'arroser), d'avoir le bon matériel au bon moment (tracteur, chargeur, épandeur, retourneur,...). Ces contraintes peuvent parfois être importantes.
- L'azote est stabilisé dans le compost. Cet élément est alors moins disponible pour les cultures et sa libération dépend beaucoup du climat et du type de sol. L'azote est stabilisé mais il est toujours présent dans le compost.

4. Les composts de fumiers

Les composts de fumiers disposent d'une grande variabilité de composition. En effet, les facteurs de variations sont les suivants :

- Les espèces animales (bovins, chevaux, moutons, porcs, volailles)
- Le type de stabulation (litière accumulée, raclée,...)
- L'âge des animaux
- L'alimentation des animaux

Composition des composts de fumiers, en g/kg de produit brut

	M.S.	M.O.	N total	P2O5	K2O
Bovins ¹	330	210	8	5	14
Ovins	360	260	11,5	7	23
Porcins ²	317	-	7,6	10,2	14,7
Porcins ³	327	-	11	18,3	20,8
Volailles ⁴	780	577	24,9	28	25
Déchets verts	590	270	8	4	8

(1) Moyenne de 18 composts à 2 mois, 2 aérations à J8 et J15

(2) De litières accumulées

(3) De litières raclées

(4) Fumier de poulets composté 6 mois

5. Les différentes méthodes de compostage

	Fumiers de dépôt	Le compost retourné	Le compost avec beaucoup de retournements
Conditions de fabrication	Pas de soins particuliers, facile à réaliser.	Maîtrise technique et suivi important, besoin d'être équipé et avoir une bonne organisation.	Maîtrise technique et suivi très importants, besoin d'être équipé et avoir une bonne organisation.
Stabilisation du carbone	Négatif par rapport au compost et au fumier frais.	Positif par rapport au fumier frais.	Equivalent à celui du fumier frais.
Rendement en azote	Négatif par rapport au compost et au fumier frais.	Egal voire supérieur à celui du fumier frais.	Egal voire supérieur à celui du fumier frais.
Minéralisation de l'azote (année de l'apport)	Très difficile à prédire.	20 % pour compost jeune. 15 % pour compost mûr.	35 % pour compost jeune. 25 % pour compost mûr.
Pathogènes et parasites	Mauvaise hygiénisation.	Bonne hygiénisation.	Très bonne hygiénisation.
Adventices	Mauvais assainissement.	Bon assainissement.	Très bon assainissement.
Utilisation	Eviter enfouissement trop rapide (mini 15 jours). Eviter enfouissement profond (maxi 10 cm). Eviter apport sur sol nu en automne. Risque de « faim d'azote ».	A tout moment sur toute culture. Enfouir rapidement après épandage. Eviter l'enfouissement profond (maxi 10 cm).	A tout moment sur toute culture. Enfouir rapidement après épandage. Eviter l'enfouissement profond (maxi 10 cm).

Le compost sans retournement est sans doute le compost le plus difficile à réussir : il faut des matériaux de très bonne qualité au départ et surveillance régulière du tas, en particulier pour réguler son humidité en le couvrant et le découvrant si nécessaire.

Le compost sans retournement présente, à quelques nuances près, les mêmes caractéristiques que le compost retourné modérément. Cependant, le fait de ne pas retourner le tas peut conduire à une moins bonne hygiénisation et à un moins bon assainissement car les bords du tas n'ont pas subi une température suffisante.

Il est prépondérant de garder à l'esprit qu'un compostage mal maîtrisé risque de produire un résultat plus proche du fumier de dépôt que du compost.

6. Les composts de déchets verts

Les déchets verts sont des résidus exclusivement végétaux : ils comprennent les tontes de gazon, les feuilles d'arbres et d'arbustes, les tailles de haies, les branches d'élagage, les souches et tronc d'arbres.

Il faut distinguer deux paramètres pour estimer la qualité d'un compost de déchets verts :

- la composition du compost, qui dépend des matériaux utilisés,
- l'évolution du compost dans le sol, qui dépend de la façon dont il a été fabriqué : taille de l'andain, fréquence de retournement, oxygénation, humidité, criblage...

Il est donc conseillé, quand on utilise ce type de compost, de demander une analyse correspondant au lot, ou à défaut, à des lots fabriqués au même moment de l'année, ou encore une moyenne des analyses sur l'ensemble de l'année.

a) Comment utiliser l'analyse de compost de déchets verts ?

Sur cette analyse doivent figurer :

- le rapport C/N et le pH, le taux de matière organique,
- la teneur des éléments fertilisants : potassium et phosphore, calcium et magnésium, azote total, azote sous forme ammonium (NH₄⁺) et sous forme nitrate (NO₃⁻),
- la teneur en métaux lourds.

La teneur en matière organique ne donne pas beaucoup de renseignements. Pour évaluer les qualités d'amendement organique d'un compost de déchets verts, il faut savoir :

- si le compostage s'est bien passé ou non,
- s'il est terminé ou non,
- si le compost est plutôt jeune ou plutôt mûr.

Etant très riche en cellulose et lignine, le compost de déchets verts risque d'engendrer une « faim d'azote » sur les cultures en place, car l'azote minéral disponible sera utilisé par les bactéries pour dégrader les composés complexes (cellulose et lignine). C'est pourquoi il faut laisser ces composés en surface pour que ce soit les champignons qui dégradent la lignine.

7. Utilisation des composts dans différentes situations

	Types de composts	Pourquoi ?
Elevage	Compost sans retournement (minimum 1 an).	Le laisser mûrir suffisamment longtemps pour qu'il soit assez fin et s'épande bien. Les composts à granulométrie fine s'incorporent correctement à la prairie et évitent la souillure du fourrage des prairies de fauche.
	Compost retourné plutôt âgé.	
Grandes cultures	Compost de déchets verts. Compost non retourné assez âgé de fumier de bovin. Compost retourné et mûr de fumier de bovin.	Entretenir le stock de matière organique.
	Compost retourné souvent et jeune, fabriqué à partir de fumiers riches en azote.	Participer aux besoins azotés des cultures.
Cultures maraîchères	Composts jeunes.	Légumes exigeants en azote (choux, poireaux).
	Composts mûrs.	Légumes racines (oignons, carottes).
	Composts très mûrs.	Terre de semis (sous serre par exemple). Terre à rempoter.
Viticulture	Composts de déchets verts.	Stimuler l'activité des micro-organismes. Structuration du sol.
Arboriculture	Composts d'âge intermédiaire, entre jeune et mûr.	Entretenir le stock d'humus.

PARTIE III. LE CHOIX DE L'AMENDEMENT ORGANIQUE

I. Les principaux critères permettant de comparer les amendements organiques

- Le pourcentage de matières sèches sur matières brutes.
- Le taux de matière organique sur brut.
- La proportion de matières organiques susceptibles de donner de l'humus (ISB ou prochainement ISMO).
- La teneur en éléments fertilisants.
- Mais aussi l'origine des matières organiques, le processus de transformation, de compostage, les labels et certifications et bien sûr le prix.



II. LA REGLEMENTATION NFU DES MATIERES ORGANIQUES

Pour utiliser une matière organique à des fins agricoles, outre les critères agronomiques, il est nécessaire de connaître les critères réglementaires qui permettent de limiter les risques liés à l'utilisation de ces matières. La réglementation a pour objectif de caractériser les matières organiques et de fixer les règles de leur identification. Mais leur diversité, liée à leur origine agricole, agro-industrielle ou urbaine, fait que le contexte réglementaire est complexe.

La réglementation distingue deux grands statuts pour les matières organiques utilisables en agriculture :

- le statut de **déchets** si la matière est brute, c'est-à-dire qu'elle ne subit pas de traitement particulier. La réglementation sur l'épandage relève du Ministère de l'écologie et du développement durable. Dans ce cadre de gestion, la responsabilité du producteur de déchets organiques est engagée jusqu'à l'épandage et aussi pour les atteintes éventuelles à la qualité du sol récepteur et à l'environnement,
- le statut de **matière transformée (produit)** en matière fertilisante ou en support de culture, si le déchet a subi une transformation améliorante. Les normes NFU définissent les produits transformés pour en faciliter la distinction et le choix. Le producteur de produits ainsi transformés en est responsable seulement jusqu'à leur mise sur le marché.

Catégorie	Amendements organiques	Engrais organiques	Engrais organo-minéraux	Supports de culture	Composts avec boues de STEP
Référence de la norme NFU dans le cas d'une mise sur le marché du produit	NFU 44-051	NFU 42-001	NFU 42-001	44-551	44-095
Définition	Teneur totale en N et P2O5 et K2O < 3 % MB MS% > 30 % de MB MO% > 20 % de MB	Teneur en un des 3 éléments (N ou P2O5 ou K2O) > 3 % de MB	Teneur totale en N + P2O5 + K2O > 7 % de MB Et teneur en N ou P2O5 ou K2O > 3 % de MB	Teneurs N P2O5 et K2O ne doivent pas dépasser chacune 2 % de la matière brute.	Composts contenant des matières d'intérêt agronomique, issues du traitement des eaux (MIATE)

Production de compost de déchets verts de la région Alsace (sur matière sèche)											
Fournisseurs	Lieu de la PF Compostage	Nom du produit	% MS	% M.O. sur brut	% Azote total	% P ₂ O ₅	% K ₂ O	pH	C/N	% CaO	% MgO
Valterra Matières organiques	Strasbourg Sud 67	Nutri'Plante Compost vert 0-20	57,5	24	1,7	0,7	1,6	9,2	12,2	5,8	0,8
Sprinar Compotech	Niedermodern 67	Compost vert 0-20	60,7	21	1,50	0,54	0,96	8	11,5	3,07	0,51
Vita-compost (Schitter)	Dettwiller 67 et Bischwiller 67	Compost agricole	51,6	16,2	1,4	0,6	1	9,5	11,1	3,7	0,6
		Compost de végétaux	66,8	19	1,2	0,6	1,4	9,2	12	4,2	1
Centr'Alsace compost - Sundgau C. Agrivalor	Sainte Croix 68 Hirsingue 68	Compost végétal + Gamme Planète	65,9	23,2	1,5	0,8	1,4	8,7	11,6		
Agrivalor	Eguisheim 68 Bergheim 68 Hirsingue 68 DVA	Compost spécial grandes cultures	56	22	2	0,9	1,6	9	11	7,2	0,9
Agrivalor	Wittenheim 68	Compost de fumier de cheval	60	27	2,3	1,3	2,8	9	10	5,4	0,8
Centr'Alsace compost - Agrivalor	Sainte Croix 68	Viti compost	64,4	22,5	1,7	0,8	1,7	9	10,7	5,2	0,7
Ferme Schafbusch (Hege)	Steinseltz 67	Compost DV fientes poules	68,5	33,7	1,76	2,84	2,44	nc	10,7	4,33	1,08
Anna compost	Kingersheim 68	Compost vert 0-20 **	69,6	30,1	1,45	nc	1,81	8,4	16	4,0	nc
TP JEHL Gérard	Artolsheim 67	Compost de végétaux	65,1	26,5	1,6	0,7	1,4		12	5,2	0,7

Pour s'assurer de collecter le maximum de produits disponibles et ainsi connaître l'ensemble de la gamme des produits, il a été choisi de ne pas demander les tarifs aux fournisseurs. Le code couleur vert permet d'identifier les produits utilisables en **Agriculture Biologique**.

Amendements organiques disponibles en Alsace

Fournisseurs	Nom commercial	Fabricant	Composition du produit	% MS	% M.O. brute	Azote total	P ₂ O ₅	K ₂ O	pH	C/N	CaO	MgO	Granulométrie	Divers
Comptoir agricole Ampelys SARL Gangloff	Vegethumus	Phalippou Frayssinet	Tourteaux végétaux, fumiers de mouton et bourres de laines compostées	82	61	2,3	0,7	1,3	6,9	13	2,2	2,6	Granulés Pulvérulent	
Comptoir agricole	Bior	Angibaud	Matières ligneuses compostées Guano de poisson		70	2	0,8	1,7					Bouchon	
Comptoir agricole	Végédor	Eurofertil	Matières organiques d'origines végétales	80	65	1,8	1,8	1,8		15		1		
Comptoir agricole	Alliance Marine	Angibaud	Guano de poisson Guano d'oiseaux marins			2,5	2	2				4		SO ₃ : 6% Activateur de sols
Gustave MULLER	Guanorg	Derome	Tourteaux végétaux tels que ricin, cacao, pulpes de raisin	88	65	2	2	1		15		1	Bouchon	
Gustave MULLER	Caprite					2,5	1	2						
Grena	Stallegrena	Grena			65	2			7	15			Granulés	

Fournisseurs	Nom commercial	Fabricant	Composition du produit	% MS	% M.O. brute	Azote total	P ₂ O ₅	K ₂ O	pH	C/N	CaO	MgO	Granulométrie	Divers
Arnbruster	Lithogerm'	Germiflor	Tourteaux végétaux de pulpes de raisins, marc de café, pulpes d'olives et plantes médicinales compostées et des algues marines du Glénan	83	41	1,2	0,3	1,2		18	15		Granulés Pulvérulent	+ oligo-éléments
Arnbruster	Orvéga	Germiflor	Tourteaux végétaux de pulpes de raisins, marc de café, pulpes d'olives et plantes médicinales compostés	87	65	1,6	0,6	2	5,9	20	2,4	0,3	Granulés Pulvérulent	
BIO3G	Algo tonic	BIO3G	Marc de café et végétaux sélectionnés		58	1				19	14	4	Granulés	Activateur de sols
SOBAC	Bacteriosol	SOBAC	Matières végétales en mélange avec sulfate d'ammoniac (85 g/kg brut) issues de végétaux, minéraux naturels, mélasse et végétaux compostés	87	35	2,5	2,5	1,5		8				Activateur de sols

Fournisseurs	Nom commercial	Fabricant	Composition du produit	% MS	% M.O. brute	Azote total	P ₂ O ₅	K ₂ O	pH	C/N	CaO	MgO	Granulométrie	Divers
SOBAC	Bacteriosol renforcé	SOBAC	Matières végétales en mélange avec sulfate d'ammoniac (75 g/kg brut) issues de végétaux, minéraux naturels, mélasse et végétaux compostés	87	44	2,6	2,5	1,5		8				Activateur de sols
SOBAC	Bactériosol Bio	SOBAC	Matières végétales en mélange : issus de végétaux, minéraux naturels, mélasse et végétaux compostés	88	47	2,5	2	1,8		9,5				Activateur de sols
AB2F	Biofumur	Florentaise	Compost végétal à base de marc de raisin, fumier de bovins, équins et ovins et compost vert	62	31	1,4	1,1	2,2		11	5,1	0,5		Ensemencement biologique
AB2F	Biofumur biodynamisé	Florentaise	Marc de raisin, fumier de bovins, équins et ovins.	65	31	1,5				11				Exclusion de composts verts
AB2F	Biorex	Italpollina	Mélange de fumier bovin et équin	86	65	2,8	3	1	8	12			Pulvérulent	

Fournisseurs	Nom commercial	Fabricant	Composition du produit	% MS	% M.O. brute	Azote total	P ₂ O ₅	K ₂ O	pH	C/N	CaO	MgO	Granulométrie	Divers
AB2F	Fertal Mycoss	Terral	Origine 100% végétale. Pulpe de raisin, compost végétal...	90	> 70	1,7	0,5	2					Granulés	Enrichi en trichodermas (champignons)
AB2F	Fertal Vegetal	Terral	Origine 100% végétale. Pulpe de raisin, compost végétal...	90	> 70	1,7	0,5	2					Granulés	
AB2F	Fertal Sulfocal	Terral	Pulpe de raisin, fumiers compostés	90	> 40	1,5	1	1,5			15	6	Granulés	
AB2F	Fertal Maxical	Terral	Fumiers compostés, dolomie	90		0,8	1	1			20	12	Granulés	
AB2F	Ovi'soufre	OvinAlp	Fumier de mouton, tourteaux végétaux compostés		45	1,5	0,8	1,5					Pulvérulent	Anhydride sulfurique (SO ₃) : 43,5%
UFAB	Orgabio Humus	UFAB	Fumier de volaille Algues calcaires	74	65	2,9	2,7	3			7			SO ₃ : 1,2%

Contacts des fournisseurs

<p>Valterra matières organiques 17, route de Rohrschollen 67100 STRASBOURG 03.88.79.96.61 06.81.88.35.77</p>	<p>Vita-compost Route de l'Obermatt Rue du Canal 67 240 BISCHWILLER 67490 DETTWILLER 03.88.53.95.33 03.88.71.97.22 06.08.43.10.11 06.13.80.63.84</p>
<p>Sprinar Compotech Rue de la Moder 67350 NIEDERMODERN 03.88.07.76.75</p>	<p>Anna Compost Carreau Mine Anna 68260 KINGERSHEIM 03.89.53.34.34</p>
<p>Centr'Alsace Compost 1 route de Ruederbach 68560 HIRSINGUE 03.89.40.50.78 (Plusieurs sites de compostage)</p>	<p>JEHL Gérard 34, rue principale 67390 ARTOLSHEIM 03.8892.72.46 06.09.42.67.86</p>
<p>Comptoir Agricole de Hochfelden 4, route de Strasbourg 67270 HOCHFELDEN 03.88.91.57.66</p>	<p>Ampelys 63, rue principale 67140 SAINT-PIERRE 03.90.70.77.15 06.81.41.89.19</p>
<p>Armbruster 68 rue de Logelbach 68000 COLMAR 03.89.22.95.22</p>	<p>Bio3g 3, rue Basse Madeleine 22230 MERDRIGNAC 06.33.48.13.64</p>
<p>SARL Gangloff 25 rue de Haguenau 67350 PFAFFENHOFFEN 03.88.07.70.22</p>	<p>Sobac ZA Lioujas 12740 LIOUJAS 06.77.87.42.79</p>
<p>Gustave Muller PORT RHENAN 68600 NEUF-BRISACH 06.31.14.82.88</p>	<p>AB2F 6 rue de la Weiss 68240 KIENTZHEIM 06.83.41.14.99</p>
<p>Grena 6, chemin de Serre 84370 BEDARRIDES 06.15.04.10.01</p>	<p>UFAB Z.I. 22402 LAMBALLE 06.24.53.00.32</p>

La Chambre d'agriculture vous conseille :

Christiane SCHAUB / Gérald HUBER
Conseillers en Agriculture Biologique

03 88 19 17 15 / 03 88 19 55 36
06 08 91 64 84 / 06 07 73 44 32

Christophe BARBOT / Céline VEIT
Conseillers déchets et matières organiques

03 88 19 17 17
06 74 56 45 75

Bibliographie

BOURGUIGNON C., 2002 – Le sol, la terre et les champs. Sang de la terre, PARIS.

Biofil, septembre/octobre 2002 - méthode Hérody : un outil de diagnostic de la fertilité pour une meilleure qualité, N°24.

Chambre d'Agriculture de Picardie, Agro-transfert Ressources et Territoires, 2007 – Sols et Matières Organiques.

Chambre d'Agriculture des Vosges, 2006 – Tout ce que l'agriculteur doit savoir sur le compostage à la ferme.

CROVETTO LAMARCA C., 2008 – Les fondements d'une agriculture durable II, nourrir le sol un enjeu mondial. Tehnea, BESSIERES.

DEMARLE O., VIAN J-F., élèves ingénieurs ISARA Lyon – Effets de différentes sources organiques sur les propriétés d'un sol sableux argileux. SERAIL, 2004.

FRICK B.- Merveilles et mystère des mycorhizes. Centre d'agriculture biologique du Canada.

GUET G., 2003 – Mémento d'agriculture biologique, 2^{ème} édition. Agridécisions, PARIS.

HUET P., 2008 – Améliorer la fertilité de ses sols pour optimiser ses apports d'engrais minéraux, Horizon.

ITV France – La matière organique, fiche 3.

LECLERC B., 2001 – Guide des matières organiques. Tome 1, ITAB, PARIS.

LECLERC B., 2001 – Guide des matières organiques. Tome 2, ITAB, PARIS.

MVAD Réunion – Réglementation sur l'identification des matières organiques, chapitre 7.

MUSTIN M. – LE COMPOST gestion de la matière organique. François Dubusc, PARIS.

Opaba/Iful, 2001 – Guide technique et pratique du compostage. ITADA/Opaba/Iful.

PETIT J. et JOBIN Pierre, 2005 – La fertilisation organique des cultures, Les bases. Fédération d'agriculture biologique du Québec, LONGUEUIL.

Poitou-Charentes Nature – La rivière et son bassin versant. Poitou-Charentes Nature, POITIERS.

SOLTNER D., 2003 - Les bases de la production végétale, Tome I LE SOL et son amélioration, 23^{ème} édition, Sciences et techniques agricoles, SAINTE-GEMMES-SUR LOIRE.

SOLTNER D., 1999 – Les bases de la production végétale, Tome III La plante et son amélioration, 2^{ème} édition, Sciences et techniques agricoles, SAINTE-GEMMES-SUR LOIRE.