



ARVALIS
Institut du végétal



GIE ARVALIS/ONIDOL

RAPPORT

**RETOUR AU SOL DES MATIERES
ORGANIQUES NECESSAIRE A
LEUR MAINTIEN EN ETAT
EN SOLS AGRICOLES**

Rédacteur Céline LABOUBEE

Juillet 2007

Tables des matières

1. Généralités :	1
a. Généralités :	1
b. Définition d'un sol :	1
c. Fonctionnalité d'un sol en agriculture :	3
2. Les Matières Organiques :	4
a. Définition des Matières Organiques :	4
b. Rôles des Matières Organiques dans les sols :	5
c. Méthodes d'analyses des Matières Organiques :	12
3. Evolution des matières organiques dans les sols agricoles :	14
a. Dynamique de transformation :	14
b. Modèles simulant l'évolution des matières organiques dans les sols :	15
c. Exemples avec ou sans enlèvement des pailles :	19
4. Situation actuelle de la teneur en matières organiques des sols français :	21
a. Estimation des stocks actuels de carbone dans les sols agricoles français :	21
b. Répartition actuelle de la MO dans les sols agricoles français :	22
c. Tendances générales de l'évolution des matières organiques des sols cultivés :	23
d. Les sols français sont-ils déficitaires en matières organiques :	25
5. Peut-on exporter les pailles de céréales sans impact sur la teneur en MO de nos sols ? Quels sont les autres moyens de maintenir, voire d'augmenter la MO du sol ?	29
a. Pourquoi restituer les résidus de cultures au sol ?	29
b. Exportation des pailles en fonction du type de sol :	30
c. Exportation des pailles en fonction du système de production :	34
6. Conclusion :	41
Table des illustrations	43
Bibliographie	44

1. Généralités :

a. Généralités :

Au moment où s'annonce la fin du pétrole à un prix bas, et, où la prise de conscience collective se développe en faveur de la lutte contre l'effet de serre, l'utilisation de la biomasse agricole ou forestière comme source d'énergie de substitution, constitue une alternative actuellement très sérieusement étudiée.

La biomasse végétale est constituée de l'ensemble des plantes qui se développe à la surface du globe, réalisant simultanément, le captage et le stockage de l'énergie solaire, que l'on peut restituer sous forme de combustibles ou de carburants, sans impact sur l'effet de serre. En effet, le CO₂ dégagé lors de la combustion de la matière première, a été absorbé quelques mois plus tôt par la plante au cours de sa croissance.

La production mondiale de biomasse végétale est très abondante et place cette forme d'énergie très largement au premier rang des énergies renouvelables (*CLAUDET G., 2006*).

Dans le cas d'une gestion durable, la France, qui est un des pays européens possédant le potentiel le plus élevé, pourrait produire 15 % (30 Mtep/an) de sa consommation énergétique globale en utilisant ses ressources forestières et agricoles, mais aussi, en valorisant une bonne quantité de déchets (biomasse en fin de cycle) (*CLAUDET G., 2006*).

Pour atteindre un tel niveau de production, il faudrait récolter les résidus de l'exploitation forestière (rémanents) et exploiter les taillis. Il faudrait également collecter les résidus de récolte, qui sont actuellement souvent enfouis dans les sols. Enfin, selon la montée en puissance de l'utilisation de la biomasse agricole à des fins énergétiques, il serait éventuellement intéressant d'exploiter la surface agricole actuellement inutilisée par les productions alimentaires, pour y mettre en place des plantations énergétiques herbacées ou lignocellulosiques (*CLAUDET G., 2006*).

Cependant, une question se pose aujourd'hui, il s'agit d'évaluer l'impact et l'intérêt de l'apport de matière organique sur la qualité des sols cultivés et plus globalement sur la protection des sols. La prise de conscience sur ce sujet date au niveau mondial du sommet de Rio, en 1992. En effet, comme le souligne la Commission Européenne dans une récente directive de protection des sols, l'érosion et la baisse de fertilité des sols constituent une menace pour le développement durable, car elles réduisent la viabilité des terres agricoles (*CCE, 2002*). Ces deux phénomènes sont notamment attribués à la disparition d'une partie des stocks de matières organiques dans les sols.

b. Définition d'un sol :

La question est donc posée de l'impact d'une utilisation systématique des résidus de récolte ou d'une réduction des restitutions au sol, sur la viabilité des terres agricoles ?

Interface entre la Terre, l'air et l'eau, le sol remplit une multitude de fonctions, complexes, interdépendantes et indispensables à la vie. Les activités humaines dans leur ensemble ont au fil des siècles sensiblement altéré ces fonctions. Selon la FAO, les activités humaines sont la cause d'une dégradation de 15 % de la surface émergée de la Terre. Au niveau Français, ce sont 5 millions d'hectares qui seraient menacés par l'érosion (*ARROUAYS D., 2002*).

Selon la définition de l'Organisation Internationale de normalisation (ISO), le sol correspond à la couche supérieure de la croûte terrestre. D'épaisseur variable (quelques décimètres à quelques mètres), il est constitué de particules minérales de matières organiques, d'eau, d'air et d'organismes vivants (racine, faune, micro-organismes).

Extrêmement lente, sa formation résulte principalement de processus complexes d'altération des roches et de décomposition des matières organiques. Selon la nature de la roche initiale, de l'action des climats et des activités biologiques et humaines, les couches successives qui le composent, ont des caractéristiques physiques, chimiques et biologiques variées (*GALLILEO, 2004*).

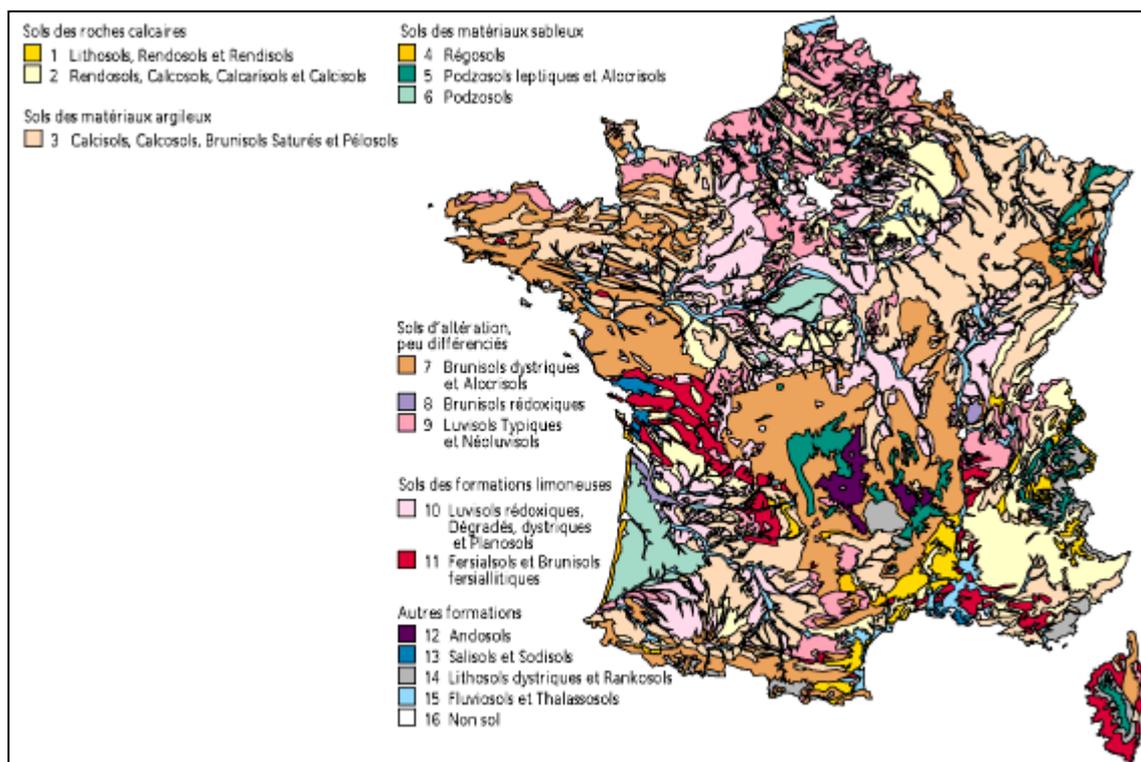


Figure 1: Carte simplifiée des sols de la France métropolitaine

Source : Inra (SESCPF).

Le sol est un système vivant puisqu'il abrite 80 % de la biomasse du globe. Outre les lombrics, les fourmis et les termites, il accueille d'innombrables populations d'insectes, de nématodes, de monocellulaires, de bactéries et de champignons. Une épaisseur de sol de 30cm recèle en moyenne 25 tonnes d'organismes à l'hectare dont 40 % de bactéries, 40 % de champignons, 16 % de vers de terre et 4 % d'organismes divers. Seulement 10 % des micro-organismes sont aujourd'hui connus et les spécialistes de science du sol commencent juste à comprendre les rôles de la microfaune et de la microflore du sol (*GALLILEO, 2004*).

Aujourd'hui le sol est exposé à de nombreuses menaces telles que :

- l'**érosion** : dans l'union européenne, 25 millions d'hectares environ en sont menacés, ils perdraient en moyenne 10 t de sol par hectare et par an.
- la **diminution du taux de matières organiques**.
- la **contamination** : véritable filtre des eaux, le sol peut fixer les substances organiques ou minérales polluantes produites par les activités urbaines, agricoles ou industrielles.
- l'**imperméabilisation** causée par la construction de logements, routes et autres infrastructures. Selon l'OCDE, l'urbanisation fait perdre 5 000 ha de terre par an.
- le **tassement** dû au passage des machines, au surpâturage. Environ 4 % des surfaces de l'Union Européenne souffriraient de ce problème.
- la **diminution de la diversité biologique**.
- la **salinisation**, due à des causes naturelles (proximité de la mer, dépôts salins géologiques, ...) et humaines (irrigation intensive avec une eau chargée en sels). Elle concerne 5 % des surfaces agricoles de la planète de la terre.
- les **glissements de terrain** (*CCE, 2004*).

Tous ces processus sont produits ou aggravés par les activités humaines et certains ont connu une accélération sensible au cours des dernières décennies.

c. Fonctionnalité d'un sol en agriculture :

En agriculture, le sol est un facteur déterminant majeur de la production végétale. Un sol en bon état structural détermine pour une grande part le peuplement à la levée, puis le développement de ce peuplement à travers le développement racinaire. C'est également un réservoir important d'eau et d'éléments nutritifs pour les plantes. Ses caractéristiques hydriques et mécaniques ont une incidence considérable sur le nombre de jours disponibles pour réaliser les travaux culturaux en bonnes conditions, notamment en automne, en hiver et au printemps. L'état du sol a enfin une influence notable sur le parasitisme tellurique : ravageurs, champignons parasites,... La plupart de ces fonctionnalités des sols agricoles sont en relation avec leur statut organique (quantité de matières organiques, répartition, nature,...). Il est donc nécessaire de surveiller l'évolution de ce statut afin de le préserver, voire de l'améliorer. (*BODET JM., Source orale, 2006*).

Il faut aussi noter que les sols cultivés contiennent des stocks de matières organiques sensiblement plus faibles que ceux des sols sous forêts ou sous prairies, et que ces stocks peuvent varier considérablement selon les systèmes de cultures pratiqués. (*CHENU C., BALABANE M., 2001*).

2. Les Matières Organiques :

a. Définition des Matières Organiques :

Définition :

Les matières organiques des sols rassemblent tout ce qui vit ou a été vivant dans les sols, c'est à dire des résidus végétaux et animaux à divers stades de décomposition, la faune et la flore du sol ainsi que les racines (*GREGORICH EG. et al, 2003*). Elles comprennent également toutes les substances sécrétées par les racines, telles que des petites molécules, des sucres, des acides organiques exsudés ou excrétés, du mucilage et des cellules. C'est la rhizodéposition, qui est une source majeure de matières organiques dans les sols, car elle se poursuit pendant toute la croissance des plantes. Une fois bien décomposée, les matières organiques forment l'humus, un matériau brun foncé, poreux et spongieux qui dégage une agréable odeur terreuse.

Composition :

Le climat, la végétation, la roche mère, la topographie, l'utilisation des terres et les pratiques agricoles sont tous des facteurs qui influent sur la composition des matières organiques du sol. On utilise souvent de façon indifférenciée les expressions « matières organiques du sol » ou « carbone organique du sol », car le carbone est la principale composante de ces matières organiques. En effet, le carbone constitue 40 % des matières organiques végétales sèches et non décomposées ou 50 % des matières organiques du sol, lesquelles contiennent également 40 % d'oxygène, 5 % d'hydrogène, 4 % d'azote et 1 % de soufre. Elles contiennent aussi des éléments secondaires tels que P, K, Ca ou Mg (*GREGORICH EG. et al, 2003*).

Typologie des MO selon le stade d'évolution :

Les matières organiques se répartissent en 4 groupes :

- les **matières organiques vivantes**, végétales et animales, qui englobent la totalité de la biomasse en activité,
- les débris d'origine végétale (résidus de végétaux ou exsudats) et animale (déjections, cadavres) regroupés sous le nom de « **matières organiques fraîches** »,
- des composés organiques intermédiaires, appelés **matières organiques transitoires**, provenant de l'évolution des matières organiques fraîches,
- des composés organiques stabilisés, les matières humiques, provenant de l'évolution des matières précédentes : les **matières organiques stables** (*BEAUCHAMP J., 2003*).

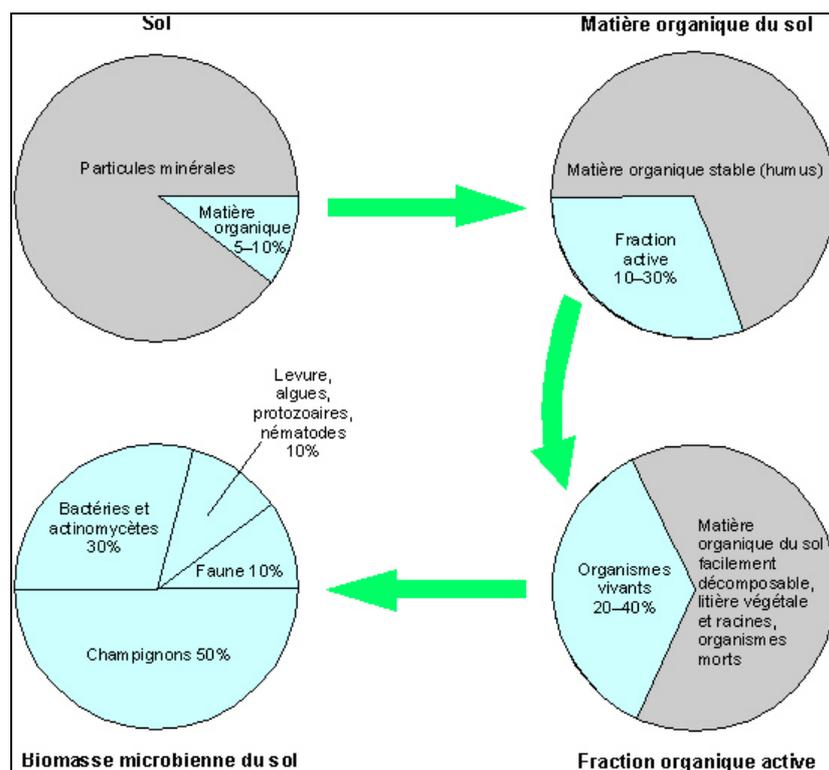


Figure 2: Constituants des matières organiques du sol

Source : http://res2.agr.ca/publications/hs/c5fig1_f.htm

Teneur et répartition des matières organiques dans le sol :

La teneur en matières organiques du sol résulte d'un bilan sur le long terme entre les quantités de matières organiques apportées au sol et les quantités perdues (principalement par minéralisation). Ce sont principalement les processus biologiques de croissance des végétaux (par exemples, les restitutions de pailles ou de racines) et de décomposition des matières organiques qui déterminent si le stock de matières organiques du sol augmente, diminue ou demeure stable (*GREGORICH EG. et al, 2003*).

Dans un écosystème non forestier, les trente premiers centimètres du sol stockent habituellement beaucoup plus de carbone organique que les racines, les feuilles et les tiges des couverts végétaux en place. Le ratio entre le stock de C du sol et celui du couvert en place est souvent de l'ordre de 10. Les teneurs en matières organiques des sols varient beaucoup, puisqu'elles sont comprises dans une fourchette de 1 à 10 % du poids sec total pour la plupart des sols cultivés et peuvent atteindre 90 % dans les zones de tourbières (*GREGORICH EG. et al, 2003*).

b. Rôles des Matières Organiques dans les sols :

Les matières organiques des sols présentent un intérêt certain à deux niveaux : d'abord d'un point de vue agronomique, mais aussi d'un point de vue environnemental.

D'un point de vue agronomique :

Sur le plan agronomique, les matières organiques des sols jouent un rôle important à cinq niveaux :

✓ **la fourniture d'éléments nutritifs :**

Les matières organiques subissent dans le sol des transformations biologiques qui mènent à leur minéralisation et génèrent des éléments minéraux tels que l'azote, le phosphore, le soufre, le potassium, et des oligoéléments, qui deviennent disponibles pour les plantes. Les matières organiques jouent un rôle de « garde manger » pour les végétaux.

En effet, la minéralisation consiste à libérer les éléments chimiques qui sont dans les divers composés organiques (carbone, azote, oxygène) de la litière, sous forme de substances minérales diverses. Ce sont les organismes décomposeurs, bactéries et champignons, qui réalisent principalement cette minéralisation.

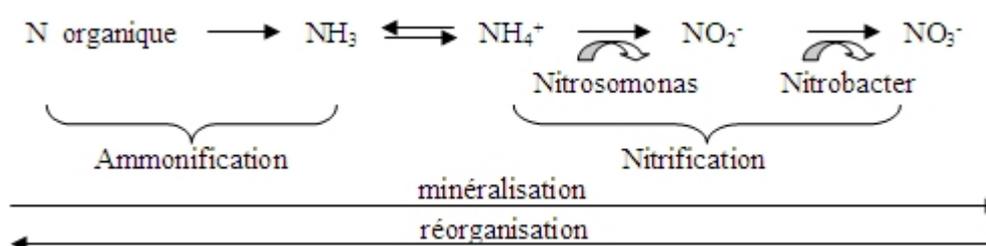
Dans le cas de l'azote, l'impact du stock de matières organiques sur la fourniture d'azote minéral est significatif. En effet, l'azote du sol provient de deux sources :

- l'azote atmosphérique, principalement fixé par les bactéries fixatrices d'azote,
- l'azote organique, issu de la dégradation et de l'enfouissement de résidus organiques d'origine végétale ou animale.

Dans le sol, l'azote peut exister sous trois formes, représentant trois stades de transformation biologique des matières organiques :

- l'azote organique, qui est la forme dominante. Il n'est pas directement utilisable par les plantes. La plus grande partie se trouve sous forme d'humus stable,
- l'azote ammoniacal, qui est une forme transitoire retenue sur le complexe argilo humique. Cette forme est rapidement oxydée par les bactéries nitrificatrices, et transformée en nitrates,
- l'azote nitrique (NO_3^-), très soluble, qui est la principale forme assimilée par les plantes. Lorsque cet azote nitrique n'est pas utilisé par les plantes ou fixée par les bactéries, il risque d'être perdu par lessivage ou par dénitrification (SOLTNER D., 1996).

La transformation de l'azote organique en azote minéral se fait par minéralisation. L'azote organique est d'abord transformé en ammoniacque par un ensemble de populations de microorganismes hétérotrophes non spécialisés. L'oxydation de l'ammoniacque en nitrites puis en nitrates est ensuite assurée par des bactéries non spécialisées



La quantité d'azote minéral dans un sol dépend donc de la quantité d'azote organique apportée et de la vitesse de minéralisation de cet azote. Cette dernière est fonction des caractéristiques permanentes du sol ainsi que du climat (température et humidité).

Plus il y aura de matières organiques dans le sol, plus le stock d'azote organique sera important, et plus les quantités d'azote minéralisées par le sol seront élevées. Ainsi, une augmentation des teneurs en matières organiques du sol de 0.5 % accroît la minéralisation annuelle de :

- 13 unités d'azote minéral dans un sol argilo calcaire,
- 11 unités d'azote minéral dans un sol sablo limoneux,
- 14 unités d'azote minéral dans un sol limon argileux. (FELIX I., 2006)

La fourniture d'azote minéral par les matières organiques du sol doit être prise en compte lors du calcul de la fertilisation azotée des cultures. Elle peut, en effet, avoir des impacts négatifs sur

l'environnement si elle n'est pas absorbée par les plantes (lixiviation des nitrates ou pertes d'azote par voie gazeuse).

Le même phénomène existe sur le soufre et le phosphore.

✓ la fourniture d'eau :

La quantité de matières organiques présentes dans un sol peut avoir des répercussions notables sur l'alimentation en eau des plantes cultivées.

En effet, la présence des matières organiques dans l'horizon de surface augmente la macroporosité, favorise l'infiltration de l'eau lors des épisodes pluvieux et accroît la vitesse de ré humectation du sol, notamment en fin d'été et en automne. Cette fonction est particulièrement importante dans la moitié sud de la France où les pluviométries hivernales ne sont pas toujours suffisantes pour reconstituer la réserve en eau du sol. De la même manière, l'incorporation de matière organique dans le sol augmente la capacité du sol à stocker l'eau. La réserve en eau utile, c'est-à-dire la quantité d'eau disponible dans le sol pour la plante, est donc également augmentée.

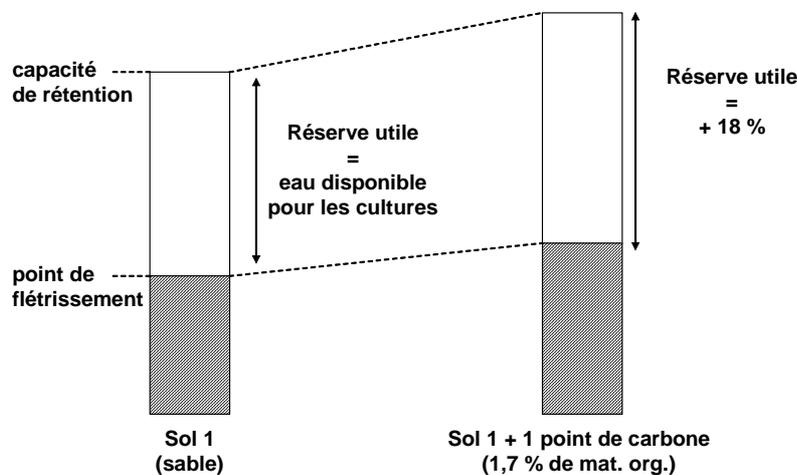


Figure 3: Les matières organiques humifiées améliorent la rétention en eau du sol

Source : Felix I, 2006

Ainsi comme le montre la figure 3, l'utilisation de la fonction de pédotransfert ¹ de Kay et al (1997) indique qu'une augmentation de 1 % de la teneur en matières organiques d'un sol sableux accroît la réserve en eau utile de 18 %.

¹ Fonction de pédotransfert : outil d'estimation qui permet de décrire la relation statistique qui lie les caractéristiques du sol aisément accessible à des propriétés du sol difficilement estimables de manière directe.

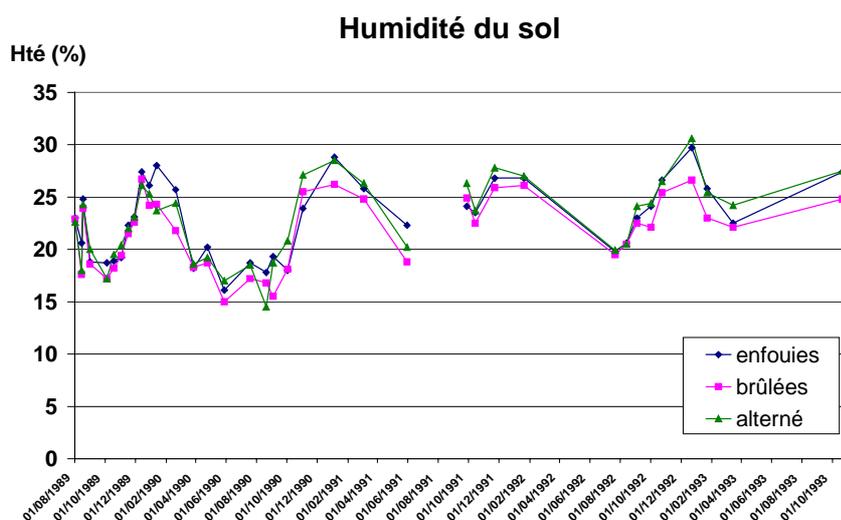


Figure 4: Variation de l'humidité du sol en fonction du devenir des pailles

Source : GRCETA de Champagne Berrichonne, 33 ans d'essais, FELIX I

Comme le montre la figure 4, l'enfouissement systématique des pailles tous les ans ou une année sur deux pendant trente ans dans un sol argilo calcaire de Champagne Berrichonne a permis d'augmenter l'humidité du sol au cours des campagnes 1990 - 1991 et 1992 - 1993 par rapport au traitement avec brûlage systématique des pailles. Dans le contexte actuel, où le manque d'eau est une préoccupation majeure à l'échelle mondiale, il n'est pas négligeable de pouvoir améliorer la capacité de nos sols agricoles à absorber et à retenir l'eau par de simples techniques agricoles, afin de limiter au maximum les apports d'eau par irrigation.

✓ L'état structural du sol :

L'incorporation des matières organiques permet d'améliorer la structure et la stabilité du sol. Tout d'abord, la décomposition des matières organiques du sol s'accompagne du développement d'hyphe mycéliens et de la production de gommés microbiennes qui favorisent la formation des agrégats du sol. Ces agrégats permettent de structurer les sols trop « légers » en cimentant les particules entre elles. Inversement dans le cas de sols « lourds », les matières organiques permettent de les aérer en augmentant la porosité.

Ainsi, en limon, une augmentation de 1 à 2 % de la teneur en matières organiques de l'horizon de surface du sol engendre une augmentation de 70 % du diamètre pondéré des agrégats stables (**CHENU et al, 2000**). Le sol passe alors de la classe des sols instables avec apparition fréquente de croûtes de battance à celle des sols moyennement stables avec apparition modérée de croûtes de battance ²(**LE BISSONNAIS et ARROUAYS, 1997**).

² La **croûte de battance** apparaît lorsque sous l'impact des gouttes de pluie, les limons s'agglomèrent pour former une croûte superficielle imperméable. La capacité d'infiltration de l'eau devient alors quasiment nulle. Les mottes de terre se défont et les particules limoneuses qui les constituent glissent sur la surface rendue imperméable. Ces limons entraînent des fertilisants ou des produits phytosanitaires susceptibles de contaminer les eaux superficielles. Ce phénomène s'accroît en hiver si les sols agricoles sont laissés nus après la récolte.

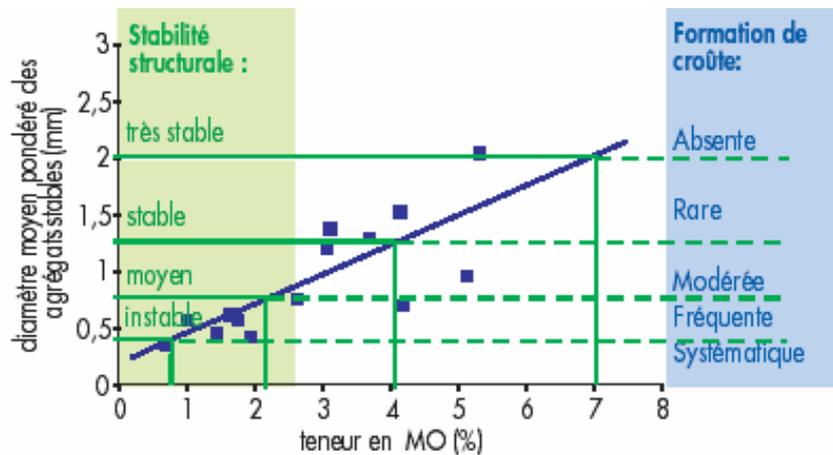


Figure 5: Stabilité structurale et formation de la croûte de battance en fonction du taux de matières organiques

Source : le Bissonnais et Arrouays, 1997 ; CHENU et al., 2000

Parallèlement, l'amélioration de la porosité et de la stabilité structurale facilite le développement racinaire et réduit les pertes à la levée. Ces deux éléments ont forcément un impact positif sur le rendement de la culture et par conséquent sur son résultat économique.

✓ **Accroissement du nombre de jour disponible pour effectuer les travaux culturaux**

Un autre critère important d'un point de vue agronomique est le nombre de jours disponibles pour travailler sur une parcelle sans endommager la structure du sol, c'est à dire sans le compacter, sans créer d'ornièrre avec les roues des engins et bien sûr sans s'enliser. Cela est particulièrement important au cours des périodes de pointes de travaux d'automne ou de printemps.

La figure 6 montre que plus la quantité de matières organiques d'un sol est importante, plus l'humidité à la limite de plasticité est élevée. Or cette limite de plasticité définit un seuil au-delà duquel les opérations de travail du sol et de circulation dans les parcelles sont déconseillées.

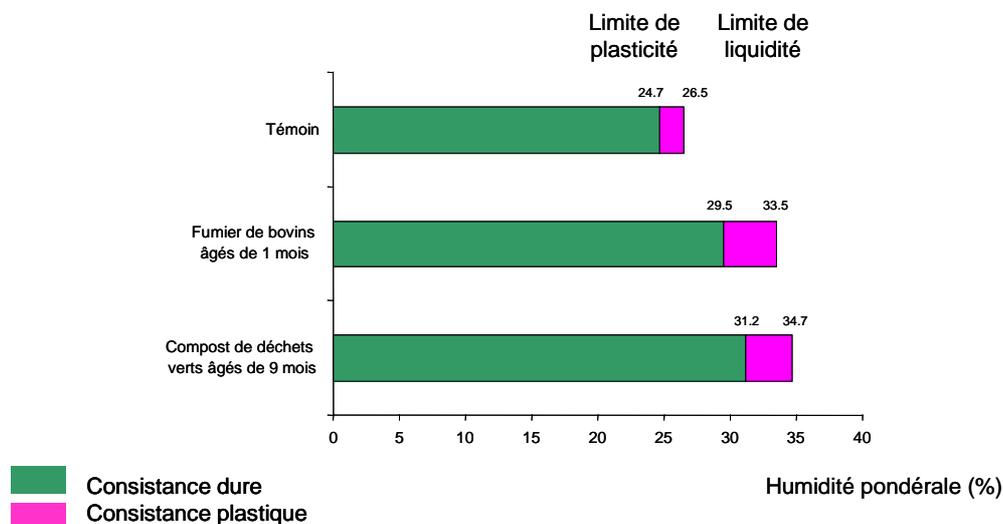


Figure 6: Les matières organiques humifiées augmentent la limite de plasticité

(Source B. DECOOPMAN, CA 29, 2004, FELIX I, 2006)

Les apports de fumiers et de compost de déchets verts contenaient 50 t de C/ha, soit environ 400 t de produit brut/ha. On peut constater que la limite de plasticité est atteinte pour une humidité pondérale de 24.7 % dans le sol témoin, de 29.5 % dans le sol amendé avec le fumier de bovins, et de 31.2 % dans le sol amendé avec un compost de déchets verts. La limite de plasticité est supérieure avec le compost de déchets verts, car celui est constitué de matières organiques plus stables que le fumier de bovins âgé de 1 mois.

✓ Effets sur le parasitisme tellurique

Au cours des deux dernières décennies, plusieurs travaux ont montré que le statut organique d'un sol pouvait avoir des effets importants sur le parasitisme tellurique : champignons, parasites et ravageurs.

La figure 7 présente les résultats obtenus avec des apports de compost sur le développement de la fusariose vasculaire du lin. Au bout d'une période de 55 jours, environ 90 % des plantes ont été infestées par la fusariose vasculaire du lin dans le cas d'un sol non amendé. Lorsque le sol a été mélangé avec un volume de compost représentant 10 % de son volume initial, seulement 30 % environ des plantes ont été infestées par la maladie. Ce taux d'infestations tombe à 10 % lorsque le sol a été mélangé avec un volume de compost représentant 30 % de son volume initial.

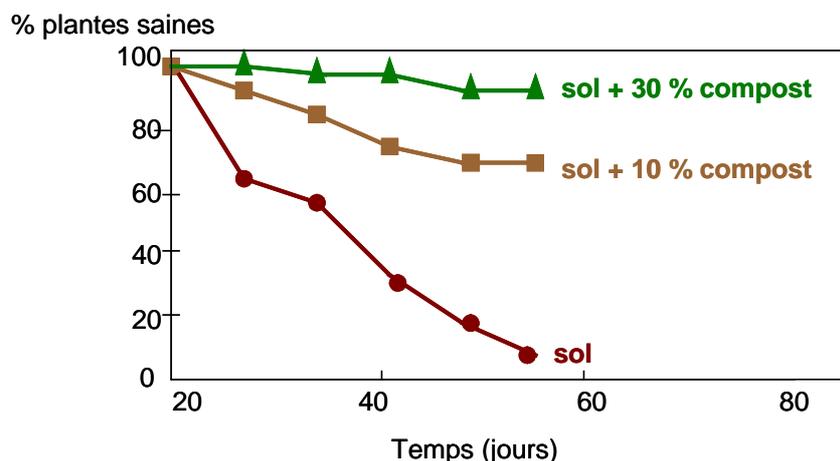


Figure 7: Influence de la présence de compost sur le développement de la fusariose vasculaire du lin

Source : Serra Wittling C. et al, 1997 ; FELIX I., 2006

Il semble donc que la gestion à court et à long terme du statut organique du sol peut devenir une technique alternative à l'emploi de produits phytosanitaires utilisés pour lutter contre certains parasites telluriques et que des travaux significatifs seront engagés dans ce sens au cours des prochaines années.

D'un point de vue environnemental :

Sur le plan environnemental, les matières organiques peuvent agir par fixation des ions, par réduction de l'érosion du sol et par stockage du C dans le sol

✓ Fixation des ions sur le complexe argilo - humique:

Les matières organiques accroissent la capacité d'échange cationique (CEC) du sol. La CEC traduit la capacité d'un sol à fixer des ions à la surface du complexe argilo humique. Ces ions pourront être libérés par des phénomènes d'échange (décalcification). La CEC des matières organiques est d'un ordre de grandeur de 60 à 300 cmoles par kg de C, qui correspond essentiellement à l'humus.

Une augmentation de la teneur en C du sol d'une valeur de 1 à 2 % est susceptible d'augmenter la CEC de 25 % dans le cas d'un sol limoneux, et plus encore dans un sol sableux. En revanche, pour les sols argileux, l'augmentation des teneurs en matières organiques n'a que peu, voire pas, d'impact sur la CEC du sol (ARROUAYS D., 2002).

L'impact de cet accroissement de la CEC est positif quand il s'agit de la fixation accrue d'éléments nutritifs. En revanche, la fixation accrue des micropolluants métalliques ou organiques (métaux lourds, HAP, produits phytosanitaires,...) peut augmenter la durée de pollutions des eaux par ces polluants.

✓ Sensibilité des terrains à l'érosion :

Les matières organiques réduisent la sensibilité des terrains à l'érosion à travers plusieurs mécanismes : diminution de la sensibilité à la battance des sols limoneux, accroissement de la cohésion des sols sableux et présence d'une litière de résidus culturaux peu dégradés.

En sols limoneux, la diminution de la sensibilité à la battance (cf. précédemment) limite les risques de ruissellement et par la même les risques d'entraînement de terre et de polluant dans les eaux de surface.

L'augmentation de cohésion qui suit, à court et long terme, l'apport régulier de matières organiques entraîne une diminution des risques d'érosion éolienne.

Enfin, la présence d'une litière de résidus végétaux morts en surface a un effet protecteur aussi bien contre le vent que la pluie à partir du moment où le pourcentage de surface couverte dépasse 30 %.

✓ Stockage du C dans le sol :

La végétation, en synthétisant de la matière organique à partir du CO₂ qu'elle prélève dans l'atmosphère, « stocke » ainsi du carbone sous forme organique. Selon que l'on exporte ou non les résidus de culture, une fraction plus ou moins importante de cette biomasse est ensuite incorporée au sol où elle est soumise à diverses transformations et dégradations. Ces matières organiques du sol finissent par subir une minéralisation, processus qui restitue le carbone à l'atmosphère sous forme de CO₂. Le stockage du C dans le sol est donc toujours temporaire, mais il est plus ou moins important et long selon les conditions du milieu : climat moyen, teneur d'origine du sol en carbone.

Parce qu'ils peuvent jouer sur les apports de matière organique au sol et/ou sur la vitesse de minéralisation, l'usage de terres et les pratiques culturales sont susceptibles de modifier le niveau de ces stocks de carbone dans le sol. Or les stocks du sol sont importants, puisqu'ils représentent quelques 1 500 milliards de tonnes à l'échelle de la planète, soit deux fois plus que le stock de C de l'atmosphère. Une augmentation, même minime du stockage dans les sols, pourrait jouer un rôle significatif dans la limitation du flux de C vers l'atmosphère.

	Stockage annuel moyen /ha	Surface potentiellement concernée	Stockage en France sur 20 ans
Boisement	TL → forêt : 0.5 tC/ha/an	30 000 à 80 000 ha/an	0.15 à 0.4 MtC/an
	STH → forêt : 0.1 tC/ha /an		0.04 à 0.1 MtC/an
Mise en prairie	0.5 tC/ha/an	10 000 à 80 000 ha/an (exploitations d'élevage uniquement)	0.06 à 0.45 MtC/an
Enherbement vignes et vergers	0.4 tC/ha/an	sur 20 à 50 % des 1Mha de vignes et vergers (attention à la concurrence pour l'eau)	0.08 à 0.2 MtC/an
Semis direct	0.2 tC/ha/an	progressivement, sur 20 à 50 % des 18Mha de terres cultivées	0.4 à 1 MtC/an (ramené à 0.23 à 0.58 si labour tous les 4 ans)
Cultures intermédiaires	0.16 tC/ha/an	0.5 à 2.5 Mha sur les 4 Mha de culture de printemps	0.07 à 0.33 MtC/an

Figure 8: Lutte contre l'effet de serre : potentiel de stockage de C dans les sols français

Source : Arrouays et al, 2002

Répertoire des principales fonctionnalités des matières organiques dans les sols:

Types de matières organiques	Effets directs	Effets des transformations
✓ Débris végétaux	Protection contre le compactage Protection contre l'érosion	Ressource alimentaire pour les micro-organismes
✓ MO vivantes		Transformation des MO Agrégation des particules Dégradation des pesticides
✓ MO mortes à décomposition rapide	Pour certaines molécules, effet sur la croissance des plantes	Adsorption des micropolluants minéraux et organiques Agrégation des particules Fourniture d'éléments minéraux
✓ MO humifiées stables	Amélioration de la CEC et de la capacité de rétention de l'eau, Amélioration des propriétés mécaniques	Adsorption des micropolluants minéraux et organiques

Figure 9: Récapitulatif des principales fonctionnalités des matières organiques

Source : FELIX I., 2006

Comme le montre la figure 9, les différents types de matières organiques ne jouent pas le même rôle sur les propriétés du sol. Il ne faudra donc pas apporter n'importe quel type de matières organiques selon la propriété que l'on souhaite améliorer. Pour reprendre l'exemple de la lutte contre l'érosion, une première approche est d'améliorer la stabilité des agrégats du sol en y incorporant des matières organiques fraîches qui vont s'y décomposer. Une autre stratégie consiste à établir une litière qui protège la surface du sol de la pluie. Ce sont alors des matières organiques de granulométrie grossière (pour permettre l'infiltration de l'eau) et stable biologiquement (pour augmenter la durée de l'effet) qui seront apportées à la surface du sol (CHENU C., BALABANE M., 2001).

Enfin, les matières organiques seront d'autant plus indispensables en agriculture que l'on va vers une utilisation de plus en plus contraignante des intrants de synthèse tels que les produits phytosanitaires ou les produits fertilisants.

c. Méthodes d'analyses des Matières Organiques :

Issues de constituants organiques très divers, les matières organiques constituent un ensemble très hétérogène difficile à analyser. Cette difficulté est accrue par le fait que les matières organiques des sols se renouvellent sans cesse par apport et incorporation de racines, de litières, de résidus de culture, ou d'amendements organiques et par minéralisation.

Des méthodes spécifiques permettent aujourd'hui de quantifier ces constituants (CHENU C., BALABANE M., 2001).

La teneur en C total du sol :

L'étude des matières organiques des sols a longtemps été basée sur la mesure exclusive de la teneur en C total du sol. Le carbone est le principal constituant des matières organiques du sol qui en contiennent 50 %. En pratique, c'est la teneur en C total du sol qui est mesurée. La teneur en matières organiques est calculée en multipliant la teneur en C mesurée par un coefficient de 1.72, censé représenter la part de carbone dans la MO.

Séparation des matières organiques en fractions humiques :

Traditionnellement, une caractérisation plus poussée des matières organiques se basait classiquement sur leur extraction et séparation par différents réactifs et solvants en fractions humiques que sont les acides fulviques, acides humiques et humine.

Cette approche est de moins en moins utilisée aujourd'hui. L'une des raisons est que les réactifs utilisés modifient les propriétés des matières organiques extraites. L'autre raison vient du fait que l'abondance relative des différentes fractions humiques n'est que faiblement corrélée aux propriétés et aux comportements des sols.

Fractionnement des matières organiques:

L'accent est aujourd'hui mis sur des méthodes de fractionnement des matières organiques en compartiments fonctionnels qui visent à séparer les matières organiques selon des critères physiques, chimiques ou biologiques.

Ainsi, le fractionnement granulométrique des matières organiques permet d'identifier les matières organiques particulaires (de la taille des sables) qui sont des débris végétaux en cours de décomposition et qui ont un temps de résidence dans le sol de quelques années.

De même, il est possible de mesurer en routine le C de la biomasse microbienne totale, des champignons totaux et des champignons mycorhiziens. Dans certains cas, la biomasse microbienne totale a été mise en relation avec la minéralisation potentielle d'un sol. De même, la biomasse de champignons du sol est un candidat sérieux à l'évaluation de la stabilité structurale (*CHENU C., BALABANE M., 2001*).

Un autre avantage de ces nouvelles méthodes est que, à l'inverse de la mesure du C total du sol, elles permettent de déceler rapidement des évolutions du statut organique des sols, suite aux modifications de pratiques culturales

Cependant cette méthode fait encore partie du domaine de la recherche, car on ne sait pas encore interpréter les résultats.

3. Evolution des matières organiques dans les sols agricoles :

a. **Dynamique de transformation :**

La végétation fournit des débris végétaux qui constituent une litière sur la surface du sol. Dans les sols agricoles, ces débris végétaux correspondent aux résidus de culture, qui sont les parties non exportées lors de la récolte et laissées sur place. Ils sont plus ou moins importants selon la culture et la destination de la culture.

La figure 10 présente les quantités d’humus fournies au sol par les résidus de culture, en fonction de la nature de la culture pratiquée et du rendement obtenu.

Cultures	RESTITUTIONS OBLIGATOIRES (RACINES)							RESTITUTIONS FACULTATIVES (PARTIES AERIENNES)						
	k1 ³	Rendement moyen		Rendement bon		Rendement très bon		k1	Rendement moyen		Rendement bon		Rendement très bon	
		Tonne M.S/ha	kg humus	Tonne M.S/ha	kg humus	Tonne M.S/ha	kg humus		Tonne M.S/ha	kg humus	Tonne M.S/ha	kg humus	Tonne M.S/ha	kg humus
Bettrave sucrière	0.15	0.8	120	1.0	150	1.20	180	0.08	4.0	320	5.0	400	6.0	480
Pomme de terre	0.15	0.8	120	1.0	150	1.20	180	-	-	-	-	-	-	-
Maïs grain	0.15	2.0	300	3.0	450	4.00	600	0.1	4.0	480	6.0	720	7.0	840
Colza grain	0.15	2.0	300	2.5	375	3.00	450	0.15	5.0	750	6.0	900	7.0	1050
Luzerne (par an)	0.2	2.0	400	3.0	600	4.00	800	0.12	1.0	120	2.0	240	3.0	360
Pois conserve	0.15	1.5	225	2.0	300	2.50	375	0.08	2.5	200	3.5	280	4.0	320
Lin graine	0.15	1.2	180	1.6	240	2.00	300	0.2	1.5	300	2.0	400	2.5	500
Lin fibre	0.15	0.6	90	0.8	120	1.00	150	-	-	-	-	-	-	-
Blé	0.15	2.0	300	2.5	375	3.00	450	0.15	4.0	600	5.0	750	6.0	900
Orge	0.15	1.0	150	1.5	225	2.00	300	0.15	2.5	375	3.5	525	4.0	600
Escourgeon	0.15	2.0	300	2.5	375	3.00	450	0.15	3.0	450	4.0	600	4.5	675

Figure 10: Calcul des quantités d’humus fournies chaque année pour des sols non calcaires –Chiffres recommandés par Rémy et Marin-Lafèche, INRA Laon

Source : SOLTNER D., 1996

La lecture de ce tableau montre qu’une culture de colza avec un très bon rendement est capable de fournir 7 t de résidus secs / ha soit l’équivalent de 1050 kg d’humus /ha. En revanche, une culture de pomme de terre à très bon rendement restituera seulement 1,2 t de résidus secs /ha soit l’équivalent de 180 kg d’humus /ha.

Cette litière est dégradée sous l’action de la faune (lombriciens, insectes,...) et de la microflore du sol (bactéries et champignons). Les matières organiques sont d’abord dépolymérisées par voie enzymatique. Les monomères résultant de ce processus peuvent suivre deux voies :

- la minéralisation qui produit des composés minéraux comme le CO₂, le NH₃, les nitrates, les carbonates, les phosphates, les sulfates,...

³ Le coefficient K1 ou coefficient isohumique d’une matière organique correspond à la proportion d’humus obtenue dans le sol à partir de cette matière organique. Selon Hénin et Turc (1957), le coefficient isohumique K1 est l’expression de la quantité d’humus formé en fonction de la quantité de matière sèche du produit organique apporté au sol. Il est déterminé expérimentalement au champ en réalisant des comparaisons de bilans humiques entre des parcelles recevant ou non des apports organiques sur une période minimum de trois ans.

- l'humification qui est une repolymérisation en composés organiques amorphes qui se lient aux argiles. Cet humus peut être ensuite minéralisé dans une étape ultérieure.

Si le temps de résidence moyen du carbone dans les sols cultivés de nos régions est d'une cinquantaine d'années, il y a en réalité, coexistence dans les sols, de composés âgés de quelques jours avec des composés présents depuis des siècles.

Depuis quelques décennies, la connaissance de la dynamique des matières organiques a beaucoup progressé grâce à la mise au point de nouvelles méthodes d'étude. Ainsi, le traçage naturel par l'isotope ^{13}C du carbone permet de mesurer in situ, sans perturbation, le temps de résidence du carbone du sol et peut être appliqué au carbone total comme à toute fraction organique séparée du sol (*CHENU C., BALABANE M., 2001*).

La vitesse de biodégradation des matières organiques dans le sol dépend de leur nature chimique, des conditions physico-chimiques (température, aération, humidité) et du type de sol. La quantité de microorganismes décomposeurs est rarement un facteur limitant de la biodégradation pour les matières organiques naturelles (*CHENU C., BALABANE M., 2001*).

b. Modèles simulant l'évolution des matières organiques dans les sols :

La modélisation de la dynamique du C dans les sols est indispensable pour appréhender le devenir du stock de C dans les sols. Plusieurs raisons expliquent le recours à la modélisation :

- coût très élevé des essais sur la dynamique du C dans les sols en raison de leur durée,
- très grande variété des situations culturales rencontrées (sols x climats x usages),
- lenteur des processus en jeu.

Dans une telle situation, le modèle est absolument nécessaire pour extrapoler les résultats obtenus au champ dans le temps et dans l'espace.

De nombreux modèles mathématiques simulant l'évolution des matières organiques dans le sol sont proposés dans la littérature scientifique. C'est ainsi que le réseau SOMNET (Soil Organic Matter Network) rassemble 36 modèles. Seuls quelques modèles sont opérationnels et peuvent être mis en œuvre avec des informations facilement accessibles pour des conseillers de terrain :

- le modèle monocompartimental Hénin et Dupuis,
- le modèle bicompartimental AMG,
- le modèle multicompartimental ROTH C.

Le modèle monocompartimental Hénin et Dupuis :

Ce modèle est l'un des tous premiers modèles mathématiques proposés pour décrire l'évolution des matières organiques dans le sol d'une parcelle cultivée à long terme. Proposé en 1945, il s'agit d'un modèle simple, encore très utilisé en France grâce aux références établies pour son paramétrage (*WYLLEMAN R et al, 2001*).

Il s'agit d'un modèle monocompartimental qui décrit, avec un pas de temps d'une année, l'évolution des matières organiques humifiées du sol, lesquelles sont considérées comme un tout homogène. Il fait intervenir deux paramètres : le coefficient d'humification k_1 (sans unité) qui dépend de la nature des apports organiques et le coefficient de minéralisation k_2 (exprimé en % par an) qui dépend des conditions pédoclimatiques (*WYLLEMAN R et al., 2001*).

Chaque année, le stock de matières organiques du sol au temps t (y_t) est augmenté par un flux d'humidification ($k_1 x$), issu de la décomposition des résidus organiques (matières organiques fraîches) et diminué par un flux de minéralisation qui est supposé proportionnel au stock de matières organiques du sol ($k_2 y_t$) (*ROUSSEL O. et al, 2001*).

La quantité de matières organiques présente dans le sol au temps t (y_t) est donnée par l'équation suivante:

$$y_t = y_0 \cdot e^{-k_2 t} + k_1 \cdot x \cdot (1 - e^{-k_2 t}) / k_2$$

Avec

- y_t : quantité de matières organiques humifiées dans le sol au temps t , en tonne d'« humus ».
- y_0 : quantité de matières organiques humifiées dans le sol au temps $t = 0$, en tonne d'« humus ».
- t : le temps, en années.
- x : apport annuel de matières organiques, en tonnes de matière sèche.
- k_1 : coefficient d'humification.
- k_2 : coefficient de minéralisation, donné par la formule de Rémy et Marin-Lafliche (1974).

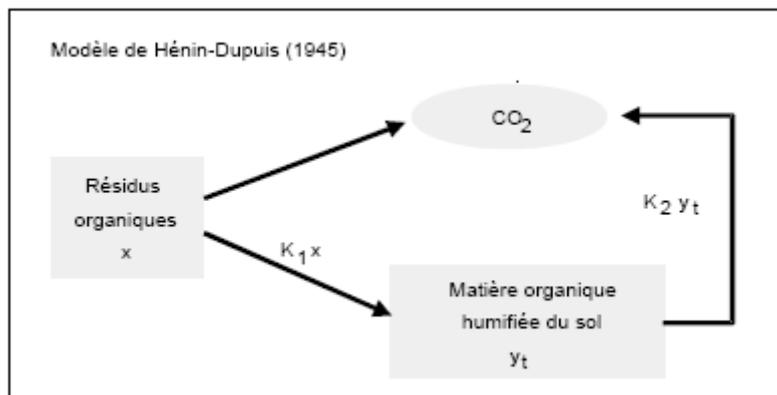


Figure 11: Représentation schématique du modèle de Hénin et Dupuis

Source: Roussel et al, INRA, 2001

Plusieurs études indiquent cependant que les performances de ce modèle sont insuffisantes dès que l'on considère des durées assez longues, supérieures à 10 ans. Le modèle surestime alors les variations du stock organique : il prédit soit une trop forte dégradation du stock organique lorsque les restitutions sont faibles, soit une trop forte accumulation d'humus lorsque le sol reçoit de forts apports organiques (selon Mary et Guérif, 1994 ; WYLLEMAN R et al., 2001).

Le modèle bicompartimental AMG (Andriulo, Mary et Guérif) :

Un nouveau modèle a été proposé pour corriger les insuffisances du modèle Hénin-Dupuis, insuffisances également observées dans le cas de la destruction de la prairie naturelle en Argentine (selon Andriulo et al, 1999).

Comme le modèle Hénin-Dupuis, il fonctionne à pas de temps annuel. En revanche, il répartit les matières organiques humifiées du sol entre deux compartiments ayant chacun une vitesse de décomposition spécifique. L'un se décompose rapidement, et a un temps de renouvellement de 10 à 30 ans : c'est la fraction « active ». L'autre se décompose très lentement avec un temps de renouvellement nettement supérieur à 100 ans : c'est la fraction « stable » (WYLLEMAN R et al, 2001).

L'équation donnant le stock de carbone au temps t (y_t) est la suivante:

$$y_t = y_{so} + y_{ao} \cdot e^{-kt} + k_1 \cdot x \cdot (1 - e^{-kt}) / k$$

avec

- y_t : quantité de matières organiques humifiées dans le sol au temps t , en tonne d'« humus ».
- y_{so} : quantité de matières organiques « stables » dans le sol au temps $t = 0$, en tonne d'« humus ».
- t : le temps, en années.
- y_{ao} : quantité de matières organiques humifiées « actives » dans le sol au temps $t = 0$, en tonne d'humus.
- x : apport annuel de matières organiques, en tonnes de matière sèche.
- k_1 : coefficient d'humification, caractéristique de la composition des résidus organiques.
- k : coefficient de minéralisation de la fraction « active » (ROUSSEL O. et al., 2001).

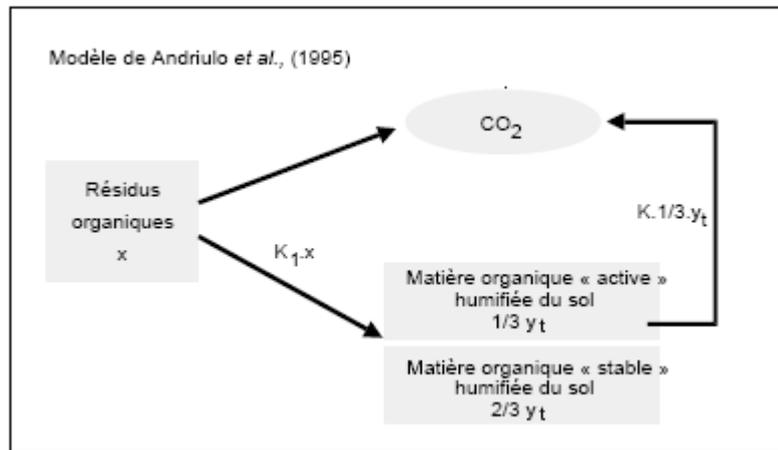


Figure 12: Représentation schématique du modèle de AMG

Source: Roussel et al, INRA, 2001

Modèle multicompartimental ROTH C (Coleman et Jenkinson, 1999)

Les principaux modèles utilisés actuellement pour prévoir l'évolution des teneurs en C dans les sols ont été évalués par Powlson et al. (1996). Ils sont disponibles dans le réseau SOMNET. Une partie de ce réseau présente des modèles déterministes réservés aux chercheurs. Ces modèles ont été élaborés à partir de l'ensemble des connaissances sur la dynamique des matières organiques dans les sols cultivés qui étaient disponibles au moment de leur publication. Une autre partie est constituée de modèles opérationnels, utilisables par des conseillers de terrain. Dans cette catégorie, se trouvent des outils comme CENTURY et surtout ROTH C. Le modèle ROTH C est issu des travaux de recherche de la Station de Rothamsted en Angleterre. Il est disponible gratuitement sur le site www.iacr.bbsrc.ac.uk/aen/carbon/rothc.htm.

Ce modèle travaille à pas de temps mensuel. Le carbone y est réparti en 5 compartiments : matières végétales décomposables (MVD), matières végétales résistantes (MVR), biomasse microbienne (BIO), matières organiques humifiées (HUM) et matières organiques inertes (MOI) répartissant les matières organiques selon les durées de vie et les flux qui les relient entre eux.

Les deux premiers compartiments (MVD et MVR) sont alimentés par la mort de végétaux et la rhizodéposition. Chaque compartiment, à l'exception du compartiment IOM, suit une cinétique de décomposition de premier ordre. Les produits de décomposition de chaque compartiment forment du CO₂, des constituants microbiens (BIO) et des matières organiques à décomposition lente (HUM).

Le compartiment IOM contient des matières organiques stables. A l'échelle de plusieurs décennies, voire du siècle, on peut donc considérer qu'il reste constant.

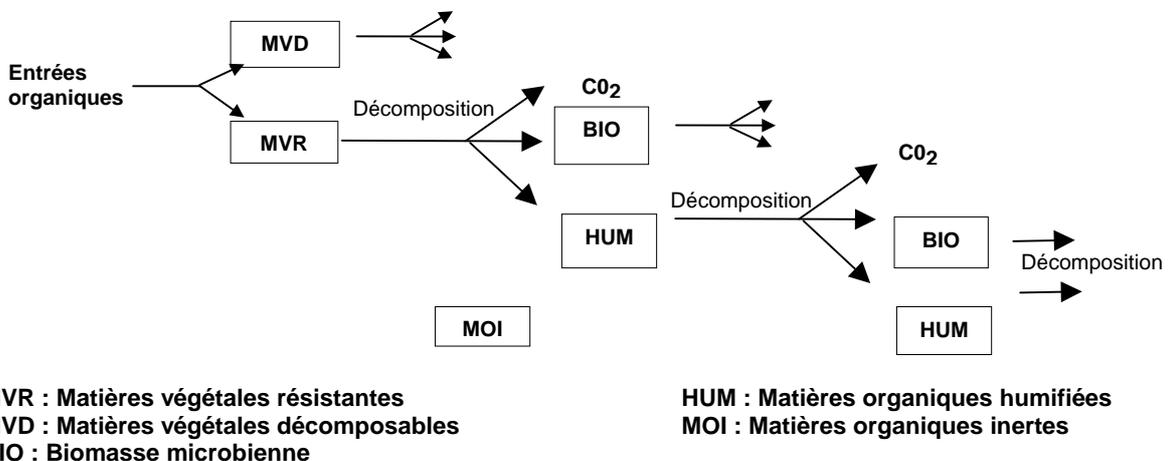


Figure 13: Structure du modèle ROTH C

Source : Coleman et Jenkinson, 2005

Avis critique sur les modèles :

Plusieurs études indiquent que les performances du modèle Hénin-Dupuis sont insuffisantes dès que l'on considère des durées assez longues, supérieures à 10 ans. Le modèle surestime alors les variations du stock organique. Il prédit soit une trop forte dégradation du stock organique lorsque les restitutions sont faibles, soit une trop forte accumulation d'humus lorsque le sol reçoit de forts apports organiques (selon Mary et Guérif, 1994 ; WYLLEMAN R et al, 2001). En effet, comme ce modèle est monocompartimental, il a tendance à sous-estimer la teneur totale en Carbone du sol, car il sous estime la teneur en matières organiques humifiées « jeunes ».

C'est ce qui a été observé dans le traitement labour de l'essai de travail du sol de longue durée de Boigneville (91). Le modèle Hénin-Dupuis a été appliqué en utilisant les références classiquement admises pour les paramètres d'humification (k_1) et de minéralisation (k_2), c'est-à-dire celles de Boiffin et al (1986) pour k_1 et celles de Rémy et Marin-Lafèche (1974) pour k_2 . La figure 14 montre que le modèle Hénin-Dupuis surestime fortement la dégradation des matières organiques humifiées.

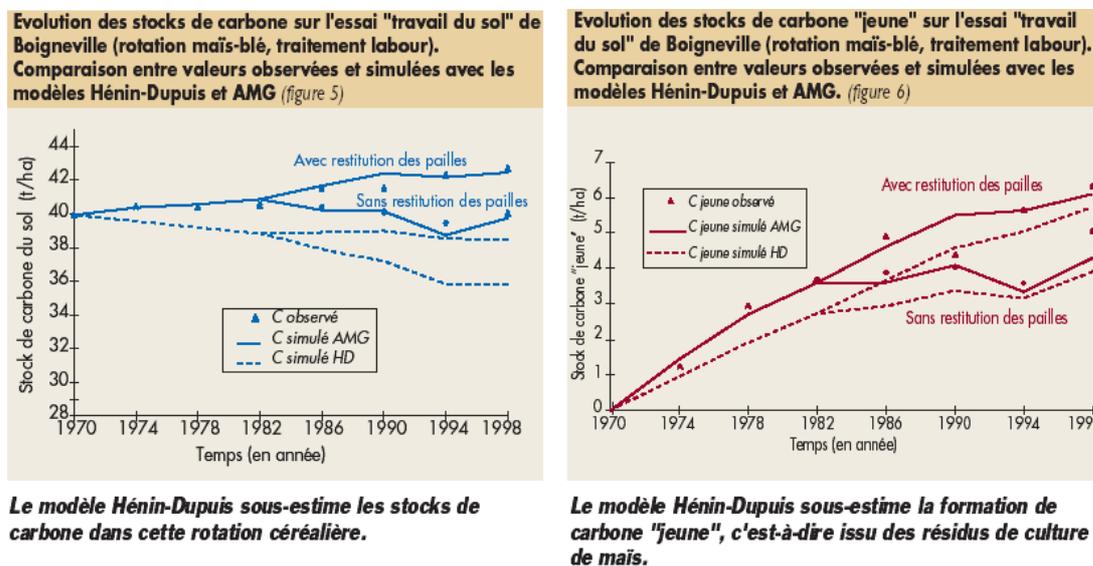


Figure 14: Comparaison des modèles Hénin Dupuis et AMG

Source : WYLLEMAN et al, 2001

Cette figure indique, par ailleurs, que le modèle AMG a permis de simuler correctement l'évolution des stocks de C dans la couche arable quelque soit le devenir des restitutions organiques. Il peut donc être utilisé pour prédire l'impact d'un enlèvement des pailles à long terme sur la teneur en matières organiques des sols dans la région où il a été mis au point, c'est-à-dire le Bassin Parisien. En revanche, l'utilisation de ce modèle dans d'autres régions telles que le Grand Ouest ou la moitié sud de la France suppose un paramétrage à partir d'essais des différents coefficients du modèle.

Jusqu'à maintenant les modèles multi compartimentaux opérationnels comme ROTH C ont été très peu utilisés en France. Néanmoins des résultats très encourageants ont été obtenus récemment par des chercheurs de l'INRA (Grignon et Orléans). Les limites des modèles Hénin-Dupuis et AMG incitent à envisager leur remplacement partiel ou total par ROTH C. Une telle démarche permettrait, en outre, de développer des échanges avec les collègues européens dont une bonne partie utilisent ce modèle.

L'ensemble de ces modèles ne permet de ne prédire qu'une seule chose : l'évolution des stocks de carbone dans le sol. Ils ne permettent malheureusement pas prévoir l'impact d'un prélèvement des pailles sur les différentes fractions des matières organiques, ni l'influence de l'enfouissement de résidus de récolte plus ou moins riches en cellulose, hémicellulose, lignine, ...

c. Exemples avec ou sans enlèvement des pailles :

L'enfouissement des pailles agit directement sur l'évolution des teneurs en matières organiques des sols cultivés. Ses effets risquent d'être fortement influencés par le type de sol, par le climat, par le volume de terre fine auquel sont mélangées les pailles et par la succession des cultures pratiquées.

Les exemples présentés ici simulent l'évolution des teneurs en matières organiques sur une période de 140 ans. Elles ont été réalisées avec le modèle AMG dans trois situations culturales typiques du département de l'Aube.

Rotation betterave – blé – orge de printemps sur sol de craie :

Tout d'abord, l'effet de l'enfouissement des pailles a été testé sur une terre de craie. Dans cette étude, trois systèmes de cultures ont été comparés :

- une rotation betterave - blé - orge de printemps avec enfouissement des pailles
- une rotation betterave - blé - orge de printemps avec exportation des pailles
- une prairie permanente.

Cette étude montre que l'exportation systématique des pailles dans la rotation betterave - blé - orge de printemps n'a pas entraîné de diminution des taux de matières organiques du sol sur 140 ans.

En revanche, l'enfouissement des pailles dans une rotation betterave - blé - orge de printemps fait passer le taux des matières organiques du sol de 3 % à 3.5 % entre 1980 et 2120. Néanmoins cette augmentation reste très inférieure à celle obtenue avec la prairie permanente fauchée où le taux des matières organiques du sol atteint 4.9 % en 2120. Exprimées en % des teneurs obtenues avec la prairie permanente au bout de 140 ans, les taux observés avec la rotation betterave - blé - orge de printemps sont respectivement de 72 % avec pailles et de 62 % sans pailles.

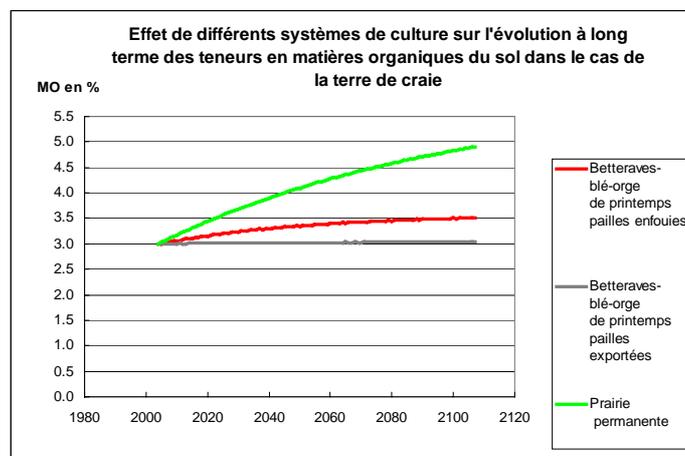


Figure 15: Evolution simulée des teneurs en matières organiques sur un sol de craie de l'Aube

Source : FELIX I., 2006

Rotation betterave – blé – orge d'hiver sur sol argilo calcaire :

L'effet de l'enfouissement des pailles a ensuite été étudié sur sol argilo calcaire. Là aussi, trois systèmes de cultures ont été comparés :

- une rotation colza - blé - orge d'hiver avec enfouissement des pailles
- une rotation colza - blé - orge d'hiver avec exportation des pailles
- une prairie permanente.

Sur une période de 140 ans, la pratique de la rotation colza - blé - orge d'hiver sans enfouissement des pailles a entraîné une légère baisse de la teneur en matières organiques du sol qui passe de 3 % à 2.9 %. Avec enfouissement des pailles, il y a une légère augmentation des teneurs de 3 % à 3.3 %. En

présence d'une prairie permanente fauchée pendant 140 ans, l'accroissement des teneurs en matières organiques est beaucoup plus important puisque celles-ci passent de 3 % à 4.7 %.
 Exprimées en % des teneurs obtenues avec la prairie permanente au bout de 140 ans, les taux observé avec la rotation colza - blé - orge d'hiver sont respectivement de 70 % avec pailles et de 61 % sans pailles.

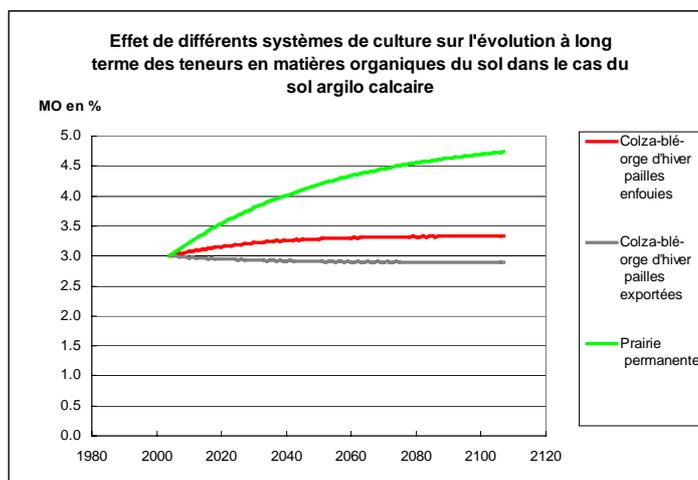


Figure 16: Evolution simulée des teneurs en matières organiques sur un sol argilo calcaire

Source : FELIX I., 2006

Rotation colza – blé – orge d’hiver sur un limon battant :

L'effet de l'enfouissement des pailles a enfin été étudié sur limon battant. Là aussi, trois systèmes de cultures ont été comparés :

- une rotation colza - blé - orge d'hiver avec enfouissement des pailles
- une rotation colza - blé - orge d'hiver avec exportation des pailles
- une prairie permanente.

Dans le cas de la rotation colza - blé - orge d'hiver, l'exportation systématique des pailles pendant 120 ans a eu peu d'effet sur les teneurs en matières organiques. En effet, celles ci ont diminué de 2 % à 1.7 % avec restitutions des pailles et de 2 % à 1.6 % sans restitutions des pailles. L'effet de la prairie est resté limité puisque les teneurs en matières organiques du sol sont passées de 2 % à 2.4 %.

Exprimées en % des teneurs obtenues avec la prairie permanente au bout de 140 ans, les taux observés avec la rotation colza - blé - orge d'hiver sont respectivement de 74 % avec pailles et de 68 % sans paille.

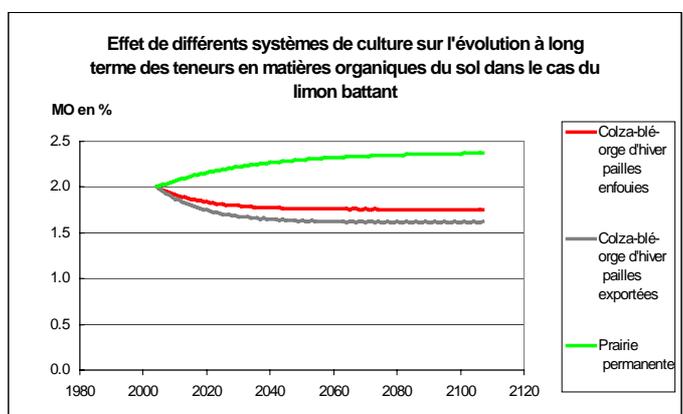


Figure 17: Evolution simulée des teneurs en matières organiques sur un limon battant

Source : FELIX I., 2006

4. Situation actuelle de la teneur en matières organiques des sols français :

a. Estimation des stocks actuels de carbone dans les sols agricoles français :

Source : Expertise INRA- Stocker du carbone dans les sols agricoles, D ARROUAYS

Méthode :

Les stocks de carbone, et donc de matières organiques, dans les sols sont en constante évolution sous l'effet de facteurs naturels (climat, végétation, teneur en argile et caractéristiques du sol...) et anthropiques (impacts locaux des usages des sols...). De cette combinaison de facteurs résulte une forte variabilité spatiale des stocks.

Une estimation par grands types de situations a été réalisée par l'INRA dans le cadre d'une expertise demandée par le Ministère de l' Ecologie et du Développement Durable en 2002. Pour ce faire, les chercheurs ont rassemblé l'ensemble des données ponctuelles, issues de la base de données sols de l'INRA, concernant les stocks de carbone des sols de France (au total 19 000 données), dans une base de données géo référencées.

Dans toutes les situations étudiées, les stocks ont été systématiquement calculés sur une profondeur de 30 cm en excluant la litière et les horizons humiques de surface (cas de certaines situations sous prairies et des situations sous forêts).

Enfin, la transformation des teneurs en matières organiques de la terre fine de cette couche de 30 cm d'épaisseur en stocks/ha a conduit à prendre en compte la densité apparente et la pierrosité de cette couche.

Résultats :

Les résultats ont été présentés successivement par type de sol et par type d'occupation, afin de mieux visualiser séparément les effets respectifs de ces deux déterminants.

✓ Stocks de C selon les modes d'occupation :

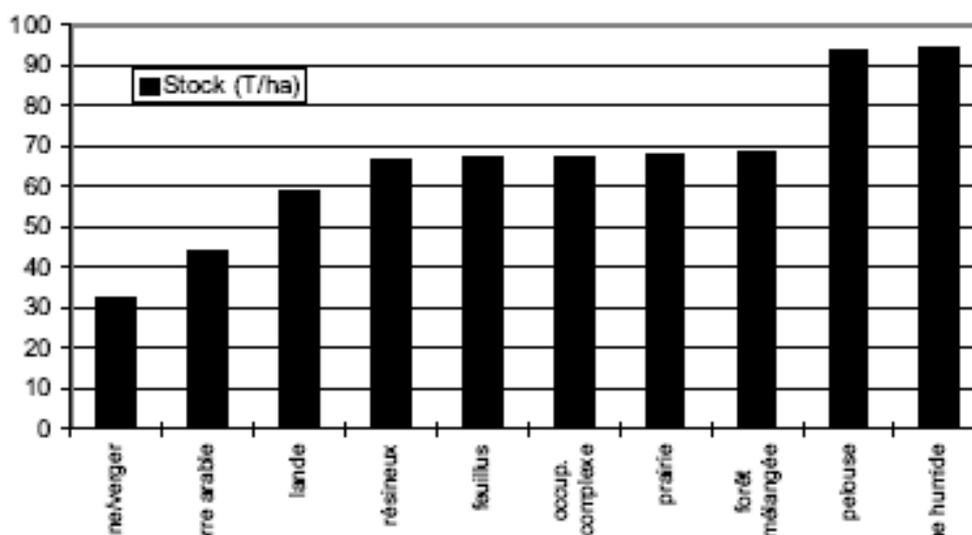


Figure 18: Occupation et stocks de carbone organiques des sols (0-30cm)

Source : INRA, 2003

Comme le montre la figure 18, les usages des sols ont une incidence très importante sur le stockage du C dans les sols français. Les principaux enseignements tirés de l'étude sont les suivants :

- les vignes et les vergers se distinguent nettement par des stocks de C très faibles d'environ 30 t/ha. En effet, ces cultures se caractérisent par des restitutions organiques très faibles, auxquelles s'ajoute parfois un désherbage généralisé. De plus, les vignes sont souvent pratiquées dans des situations pédoclimatiques peu propices au stockage du C dans les sols.,
- les terres arables sont également caractérisées par des stocks de C relativement faibles d'environ 40 t/ha.
- les prairies et les forêts présentent des stocks de C relativement voisins et nettement plus élevés de l'ordre de 70 t/ha.
- les pelouses d'altitude et les zones humides présentent les stocks de C les plus importants, environ 93 t/ha, ce qui conforte la loi d'action sur l'effet de la température sur la minéralisation des matières organiques.

✓ **Stocks de C selon le type de sols :**

Comme le montre la figure 19, de manière générale, les stocks les plus importants se trouvent dans les sols riches en argile, les sols tourbeux et les sols développés sous climat froid. Dans ces situations, la décomposition des matières organiques est ralentie et elles s'accumulent dans l'horizon de surface.

A l'inverse, les stocks les plus faibles se rencontrent dans les situations où les teneurs en argile sont faibles tels que les arénosols et les luvisols.

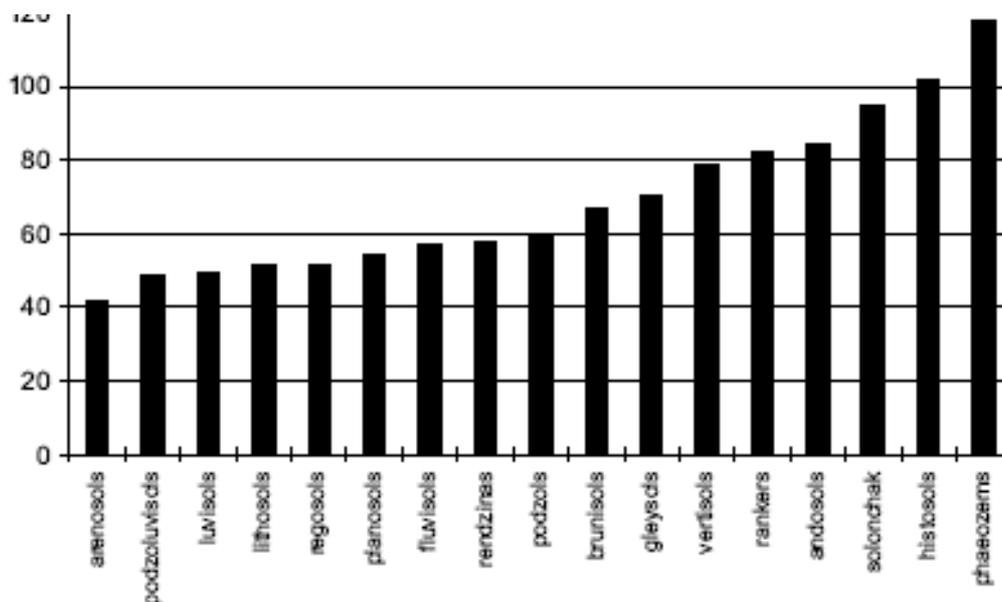


Figure 19: Types de sol et stocks de carbone organique (T/ha, 0-30 cm)

Source : INRA 2003

b. Répartition actuelle de la MO dans les sols agricoles français :

Les disparités nationales et régionales dans les stocks de matières organiques des sols (figure 20) traduisent non seulement les différences d'occupation du sol, mais également la diversité des situations pédoclimatiques (ARROUAYS D. et al, 2002b).

Les stocks les plus faibles en matières organiques (moins de 40 t de C./ha) sont observés en Languedoc-roussillon, région fortement viticole, caractérisée par un climat chaud et des sols peu épais, ainsi que dans quelques zones de cultures très intensives telles que le Nord, la Beauce, la Chartraîne,....

Les zones de stocks faibles (40 à 50 t de C/ha) sont caractéristiques des plaines avec cultures de vente ainsi que des sols limoneux plus ou moins dégradés. On les observe surtout dans tout le Bassin Parisien, une partie du Bassin aquitain (Chalosse, Tursan, ...), le Languedoc et le sillon Rhodanien.

Les stocks moyennement élevés (50 à 70 t de C/ha) sont caractéristiques des régions avec une forte proportion de forêts et ou de prairies permanentes (Massif Central, Est de la France, Ouest de la France, ...). Enfin, les stocks les plus élevés correspondent à des zones montagneuses ou marécageuses. (D. Arrouays, INRA, 2002)

L'essentiel du carbone des sols est contenu dans les matières organiques. Pour la couche de 0 à 30 cm, le stock global en carbone des sols de France est estimé à 3.1 milliards de tonnes, soit 1/500^{ème} des stocks mondiaux.

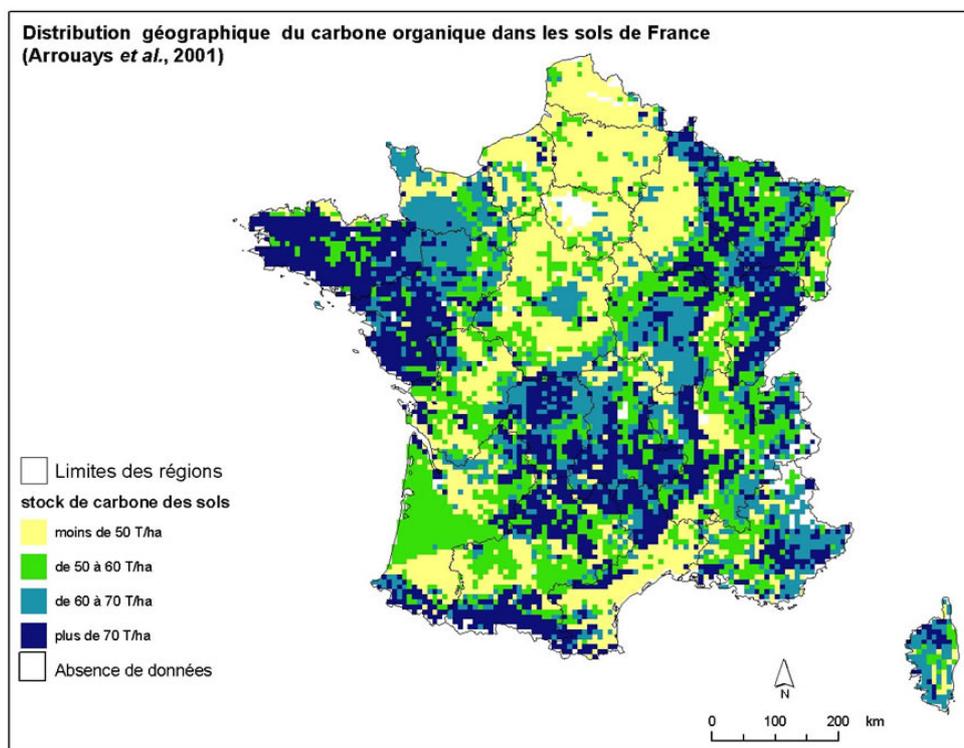


Figure 20: Distribution géographique du carbone organique dans les sols de France

Source : INRA, 2001

c. **Tendance générale de l'évolution des matières organiques des sols cultivés :**

Dans les années 70 et 80, bien que l'augmentation des rendements engendre une fourniture en matières organiques au sol plus importante, leur baisse était déjà annoncée comme inéluctable, en raison de la diminution des restitutions organiques et de la dilution des matières organiques des sols par approfondissement des labours. Aujourd'hui, plusieurs études font à nouveau le constat d'une baisse des taux de matières organiques des sols agricoles français au cours des deux dernières décennies (ROUSSEL O. et al, 2001). Pour estimer les effets des grands changements d'usage sur les réserves de matières organiques des sols, il est intéressant de suivre leur évolution depuis la fin du dix neuvième siècle

De la fin du dix neuvième siècle jusqu'à la fin des années soixante dix, il y a une diminution continue des terres labourables, accompagnée de la disparition de la jachère traditionnelle, au profit de surfaces d'abord prairiales puis forestières. Cette évolution se poursuit jusqu'à la fin des années soixante dix et s'accompagne d'un accroissement continu des teneurs moyennes en matières organiques des sols agricoles qui atteignent un maximum autour de 1980.

A partir des années 1970, il y a un renversement de tendance avec comme cause principale l'augmentation de la profondeur de labour, mais aussi, dans une moindre mesure, une baisse des surfaces en prairies permanentes en faveur des prairies temporaires, l'abandon de l'élevage au profit de cultures annuelles dans de nombreuses régions, le développement de cultures fourragères restituant peu de résidus comme le maïs ensilage, l'optimisation de la part de la production primaire utilisée par les animaux dans les régions d'élevage intensif au dépens de la part retournant au sol. Cela se renforce entre 1993 et 1995 par le remplacement d'une partie des surfaces en cultures annuelles par des jachères pouvant être conduites en sol nu. Ces différentes évolutions peuvent expliquer la baisse générale des teneurs en matières organiques des sols, signalée depuis une vingtaine d'années.

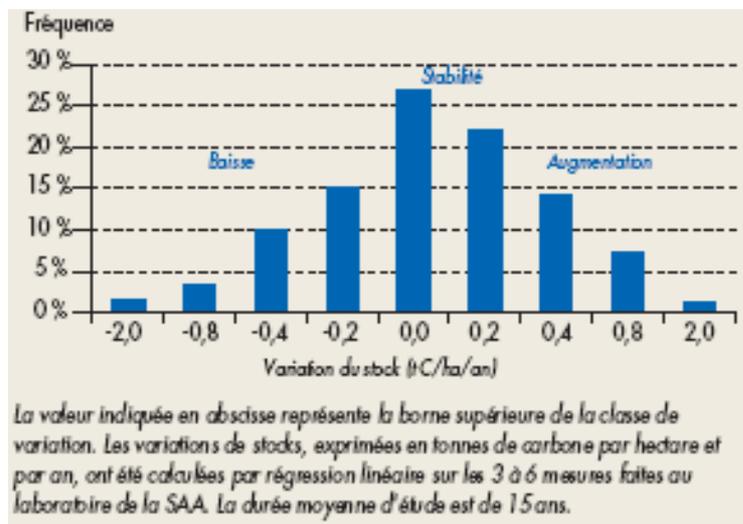


Figure 21: Fréquence des variations de stocks de C observées sur 391 parcelles agricoles de la Picardie entre 1970 et 1998

Source : Perspectives agricoles, n°270

Il est probable que cette tendance doit être modulée selon le statut organique initial du sol dans les années soixante dix. C'est ce que montre une enquête sur les variations des stocks de C de parcelles conduites en grandes cultures entre 1970 et 1998 en Picardie. Les résultats, présentés figure 21, indiquent que les stocks de matières organiques de 0 à 60 cm, sont restés stables dans 49 % des cas (classe 0 et 0.2), ont diminués dans 29 % des cas et ont augmentés dans 22 % des cas (**WYLLEMAN R. et al, 2001**).

Les fortes baisses se sont produites dans les sols initialement riches en matières organiques, et les hausses modérées dans les sols les plus pauvres. Parmi les situations à la baisse, un nombre significatif d'entre elles, résulte d'une mise en culture récente faisant suite à une destruction de prairie ou présentant une forte proportion de cultures à faible restitution, telle que la betterave à sucre et la pomme de terre. Les parcelles en augmentation correspondent très souvent à des rotations très céréalières, avec de fortes restitutions organiques ou à des parcelles recevant de fréquents apports de produits résiduels extérieurs à l'exploitation.

Notons, enfin, qu'il est difficile de quantifier précisément l'effet de l'augmentation de la productivité agricole sur l'évolution des stocks de matières organiques dans les sols français depuis plus d'un siècle. Or elle a été considérable et a eu certainement des effets majeurs sur les restitutions de matières végétales au sol. Il est donc probable que cette amélioration continue de la productivité ait accentué

l'accroissement des stocks de C dans les sols entre la fin du dix neuvième siècle et les années soixante dix. Inversement, elle a certainement freiné la tendance à la baisse des stocks observée depuis 1980.

d. Les sols français sont-ils déficitaires en matières organiques :

Pour pouvoir répondre à cette question, il faut d'abord définir des seuils de référence de teneurs en matières organiques permettant de maintenir à un niveau acceptable l'ensemble des propriétés des sols cultivés.

La détermination de teneurs souhaitables en matières organiques dans les principales situations culturales d'une région donnée est une question récurrente. Certaines valeurs minimales de teneurs en matières organiques ont été proposées de manière empirique et pour un contexte agro pédologique donné, mais elles ne peuvent pas et ne doivent pas être généralisées. Un seuil minimum de matières organiques ne peut être défini que par rapport à des valeurs critiques de la propriété considérée (CHENU C., BALABANE M., 2001).

Détermination d'une teneur souhaitable en C organique des sols cultivés :

En France, plusieurs approches sont envisageables pour définir la teneur souhaitable en C total de la couche arable dans une situation culturale donnée.

La première approche consiste à faire appel à un groupe d'experts, d'une vingtaine de personnes environ. Durant deux ou trois jours, chaque expert établit deux courbes reliant la qualité du sol avec la teneur en C total de la couche arable dans chacune des situations culturales considérées.

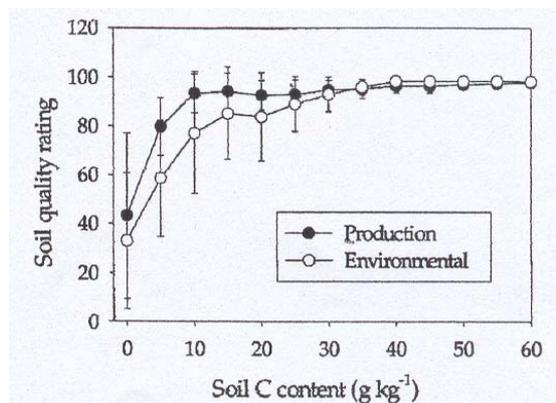


Figure 22: Estimation d'une teneur souhaitable en C du sol en fonction de critères de production et d'environnement

Source : SPARLING et al, Nouvelle Zélande, 2003

Dans l'une, la qualité du sol est évaluée à partir de critères de production. Dans l'autre, elle est appréciée à partir de critères environnementaux. La teneur acceptable en C correspond au point de rencontre des deux courbes.

La deuxième approche consiste à analyser des jeux de données sur les teneurs en C total de la couche arable en les structurant par situation culturale type. Elle a souvent été utilisée par les laboratoires d'analyses départementaux ou régionaux pour valoriser leur base de données sur les teneurs en matières organiques des sols.

Ainsi, **Malterre et Alabret (AFES, 1963)** ont mis en relation les teneurs en matières organiques (M.O.) de l'Île de France avec la granulométrie des sols non calcaires de cette région. L'équation proposée était la suivante :

$$MO\%=(5A+0.5L+90)/100$$

(Source : AFES, 1963)

Avec A : argiles en %
L : limons totaux (2-50 μ) en %

Dans le cas des sols de l'Aisne, il est possible d'utiliser l'abaque de Rémy et Marin-Lafèche (1974) pour évaluer le statut organique d'un sol en fonction de ses teneurs en argile et en calcaire (figure 23). C'est la limite inférieure du niveau « satisfaisant » de l'abaque qui est utilisée pour définir les teneurs souhaitables en matières organiques des sols. Celles ci sont comprises entre 2 et 3.2 %, pour les sols non calcaires de l'Aisne.

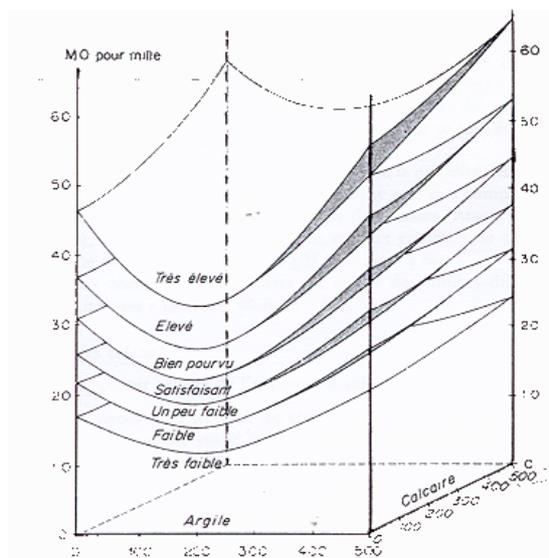


Figure 23: Abaque des teneurs en matières organiques des sols de l'Aisne élaboré par Rémy et Marin-Lafèche

Source : Annales agronomiques, 1974

La troisième approche (Sparling et al, Nouvelle Zélande, 2003) consiste à faire fonctionner un modèle de simulation de l'évolution des teneurs en matières organiques du sol (AMG, ROTH C, CENTURY,...) avec une prairie permanente sur une durée suffisante pour l'état d'équilibre carboné permis par la prairie. La teneur souhaitable en C totale de la couche arable est définie par la valeur correspondant à 80 % de la teneur en C obtenue à l'équilibre des prairies permanentes. Dans la réalité cette valeur de 80% de la teneur en MO d'une prairie permanente est arbitraire et semble quasiment impossible à atteindre dans la réalité.

La dernière approche consiste à choisir une valeur en C total souhaitable en fonction d'un ou de plusieurs effets attendus, comme la stabilité structurale, la CEC, la vitesse de ressuyage, la minéralisation potentielle de l'azote, ...

Bilan sur le territoire français :

Les études permettant d'évaluer les besoins objectifs en matières organiques des sols agricoles à une échelle nationale sont rarissimes. La plus récente, effectuée à l'initiative d'un des principaux producteurs de compost a été publiée en 2001 (**ROUSSEL O. et al, en 2001**).

L'objectif de cette étude était à la fois d'estimer au niveau cantonal la part des terres arables, déficitaire en matières organiques par rapport à un taux agronomiquement souhaitable, et de quantifier les apports de produits résiduaux organiques nécessaires à un redressement des taux déficitaires.

Les données utilisées dans les calculs provenaient de la base de données des analyses de terre (BDAT) sur la période 1990 - 1994 en ce qui concerne le sol (C %, A % et CaCO₃ %), du SCEES et de l'INSEE en ce qui concerne les surfaces (surfaces cantonales totales, SAU et STH).

Les teneurs souhaitables en matières organiques étaient issues de l'abaque publié en 1974 par Rémy et Marin-Lafèche (voir page 28). Elles correspondaient à la limite inférieure du niveau satisfaisant. Les calculs de quantités de produits résiduels organiques nécessaires pour redresser les taux déficitaires ont été effectués avec les modèles Hénin – Dupuis et AMG (voir page 15). L'objectif était de remonter de 10 % en 10 ans la teneur en matières organiques des sols déficitaires.

Différentes hypothèses ont été retenues pour les calculs. :

- teneurs en matières organiques des sols parvenues à l'équilibre au début des années 1990, c'est-à-dire lors de la réalisation des analyses de sol.
- absence de changement dans les systèmes de culture (successions de culture, régime de travail du sol, devenir de résidus culturaux,...) pendant les dix années de redressement.
- climat supposé uniforme sur l'ensemble du territoire français.

Selon cette méthode, l'estimation des surfaces déficitaires en matières organiques donnée dans cette étude est comprise entre 6 à 7.7 millions d'hectares de terres arables, sur 19.5 millions d'hectares nationaux, soit environ 31 à 39,5 %.

Le supplément annuel de matières organiques humifiées nécessaires pour redresser de 10 % en dix ans le taux de matières organiques des sols déficitaires a été estimé entre 4.5 et 5.5 millions de tonnes de matières organiques humifiées avec le modèle AMG, soit 36 à 44 millions de tonnes d'amendement organique de type compost ou 136 à 166 millions de tonnes de fumiers pailleux de bovins.

La répartition de ces suppléments par département est donnée dans la figure 24. Elle indique que les zones où les besoins en matières organiques sont les plus importants correspondent aux zones de grandes cultures intensives (Picardie, Ile de France, Centre, Midi Pyrénées,...) ou aux régions ayant beaucoup de vigne, de vergers et de cultures maraîchères (Provence - Cote d'Azur, Languedoc Roussillon, ...)

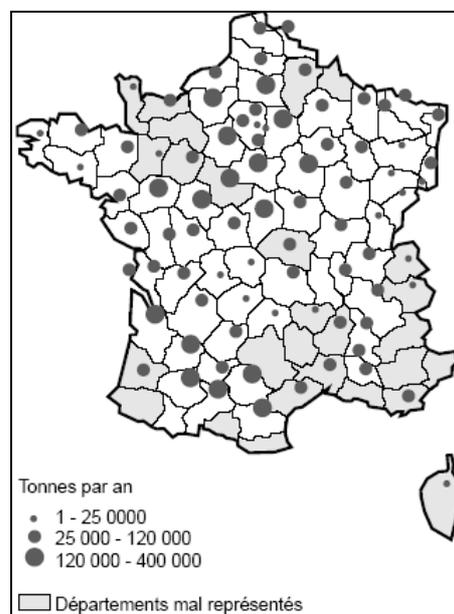


Figure 24: Estimation, selon le modèle AMG., des quantités de matières organiques humifiées à apporter pour un redressement de 10 % en 10 ans. Résultat global obtenu en tonnes par département

Source : ROUSSEL et al, INRA, 2001

Ces résultats doivent être pris avec une extrême prudence en raison des nombreuses approximations et hypothèses qui sous tendent cette étude. En effet, l'abaque proposé par Rémy et Marin-Lafèche en

1974 concerne uniquement le département de l'Aisne et son extrapolation à l'ensemble du territoire français semble pour le moins osée. De même, les équations utilisées pour calculer les suppléments de matières organiques à apporter dans les sols déficitaires ne tiennent absolument pas compte des différences de climat à l'intérieur du territoire français. Enfin, il existe une très grande imprécision dans l'estimation des surfaces de terres arables, c'est-à-dire de (SAU-STH), par canton est très imprécise puisque le ratio (SAU-STH)/Surface totale n'est connu que pour le département et que ce chiffre est utilisé pour tous les cantons d'un même département.

L'hypothèse que la totalité des sols français présentent des teneurs en matières organiques à l'équilibre au début des années 1990 est très certainement fautive dans bon nombre de cas et doit au minimum être vérifiée par simulation au cas par cas. En outre, le postulat de systèmes de culture identiques aux systèmes de culture de départ pendant les 10 ans de redressement conduit à ne prendre en compte que les apports de produits résiduels organiques pour redresser les situations déficitaires et non à envisager d'autres solutions telles que le changement de successions, l'introduction de couverts d'interculture, le régime de travail du sol, ...

Les bilans effectués à ce jour pour repérer les zones où les teneurs des sols en matières organiques sont insuffisantes restent peu satisfaisants. Or la réalisation de tels bilans demeure une étape préalable nécessaire à l'élaboration et à la mise en œuvre de projets durables sur la valorisation de la biomasse végétale. Il importe donc de reprendre ce genre d'étude, après avoir reformulé les objectifs, avec des outils (base de données, simulateurs) permettant de mieux prendre en compte les systèmes de culture rencontrés dans chacune des petites régions agricoles françaises.

Reste néanmoins à savoir s'il est possible et souhaitable de chercher à déterminer un seuil « acceptable » absolu en matières organiques ou si compte tenu de la diversité des situations et des fonctionnalités concernées, s'il ne serait pas pertinent de définir par type de sol un seuil critique, seuil au-delà duquel la perte d'une des fonctionnalités d'un sol serait irréversible. Un tel seuil déterminerait la limite en taux de matière organiques au delà de laquelle il faudrait absolument maintenir les sols par des pratiques adéquates.

5. Peut-on exporter les pailles de céréales sans impact sur la teneur en MO de nos sols ? Quels sont les autres moyens de maintenir, voire d'augmenter la MO du sol ?

Les moyens dont dispose l'agriculture, pour agir sur les réserves organiques du sol, sont limités. Il peut s'agir soit d'en augmenter les entrées, soit d'en limiter les sorties.

Parmi les pratiques les plus courantes pour maintenir un taux de matières organiques « acceptable » dans un sol cultivé, les résidus de culture, et plus particulièrement les pailles de céréales, sont restitués au sol après récolte.

Jusqu'alors, les débouchés industriels pour ces produits étaient encore limités et les pailles de céréales servaient essentiellement de litière animale. En effet, en France, sur un potentiel moyen de 22 millions de tonnes de pailles (blé et orge), plus de la moitié est consacrée à la litière des ruminants. Une bonne partie du potentiel de paille était donc restituée au sol.

D'autres marchés de valorisation se sont ensuite développés : utilisation en champignonnières, fabrication de pâte à papier, production de matériaux plastiques, fabrication de matériaux de construction ou matière première pour l'artisanat.

Aujourd'hui, face à l'augmentation du prix des énergies fossiles et à la diminution de leurs ressources, les débouchés non alimentaires de ces coproduits agricoles sont de plus en plus nombreux notamment en tant que biocombustible pour des chaudières collectives ou industrielles ou en tant que matière première pour la fabrication de carburants de deuxième génération. Dans cette optique, ce sont de très grandes quantités de paille qui pourraient être exportées.

La question qui se pose donc actuellement est : « Peut-on exporter de manière plus systématique les pailles de céréale sans impact sur la teneur en matières organiques de nos sols agricoles ? »

a. Pourquoi restituer les résidus de cultures au sol ?

A court terme, le retour au sol des résidus de culture peut se manifester à travers différents effets : amélioration de la stabilité structurale, réduction des risques de battance, diminution du compactage, libération de produits toxiques pour certaines maladies, fourniture d'azote et de potassium.

A long terme, la restitution systématique des résidus de culture va modifier l'évolution du stock d'humus du sol. Selon les situations pédoclimatiques considérées, cette évolution du stock d'humus du sol aura ou non un effet sur les productions végétales.

L'impact de l'enfouissement des pailles sur la fertilité des sols cultivés doit donc être gérée en prenant en compte les caractéristiques de chacune des situations culturales types rencontrées dans une région donnée. Une situation culturale est définie par un type de sol, des conditions climatiques et le mode d'occupation de la parcelle, chacun des trois paramètres influe sur la vitesse de transformation des matières organiques, et donc sur le stock du sol.

C'est l'acquisition de ces trois types d'informations pour chacune des 450 petites régions agricoles qui permettra de définir, pour chacune d'entre elles, un seuil minimum acceptable de la teneur en matières organiques du sol permettant ainsi d'appréhender précisément l'impact du prélèvement des pailles dans chaque situation considérée.

Actuellement, l'ensemble du réseau de stations météorologiques d'ARVALIS Institut du végétal nous permettrait d'avoir l'information relative au climat et la base de données de Corinne Land Cover nous permettrait de définir le mode d'occupation des sols. Le travail à réaliser pour définir une teneur en

matière organique acceptable du sol, est donc de faire une typologie, facile d'accès, des catégories de sols. Seul le croisement de ces trois types d'informations permettrait de définir les différentes situations culturales et leurs teneurs acceptables en matières organiques du sol, sur lesquelles l'application d'un modèle, type Roth C, permettrait de définir précisément l'impact du prélèvement des pailles.

En attendant la réalisation de ce travail, seules de grandes tendances peuvent être définies en fonction du type de sol ou de l'orientation technico-économique de la région, et des hypothèses peuvent être émises. Cependant, depuis une quarantaine d'années, la mise en culture de nombreuses prairies permanentes, engendrant une baisse de la teneur en matières organiques des sols, est une tendance générale, même dans les sols les mieux pourvus (cf. figure 25: carte d'évolution de la teneur en matière organique des sols de Bretagne) ; ces grandes tendances sont donc à prendre avec précaution tant que le travail de caractérisation de situations culturales n'aura pas été réalisé.

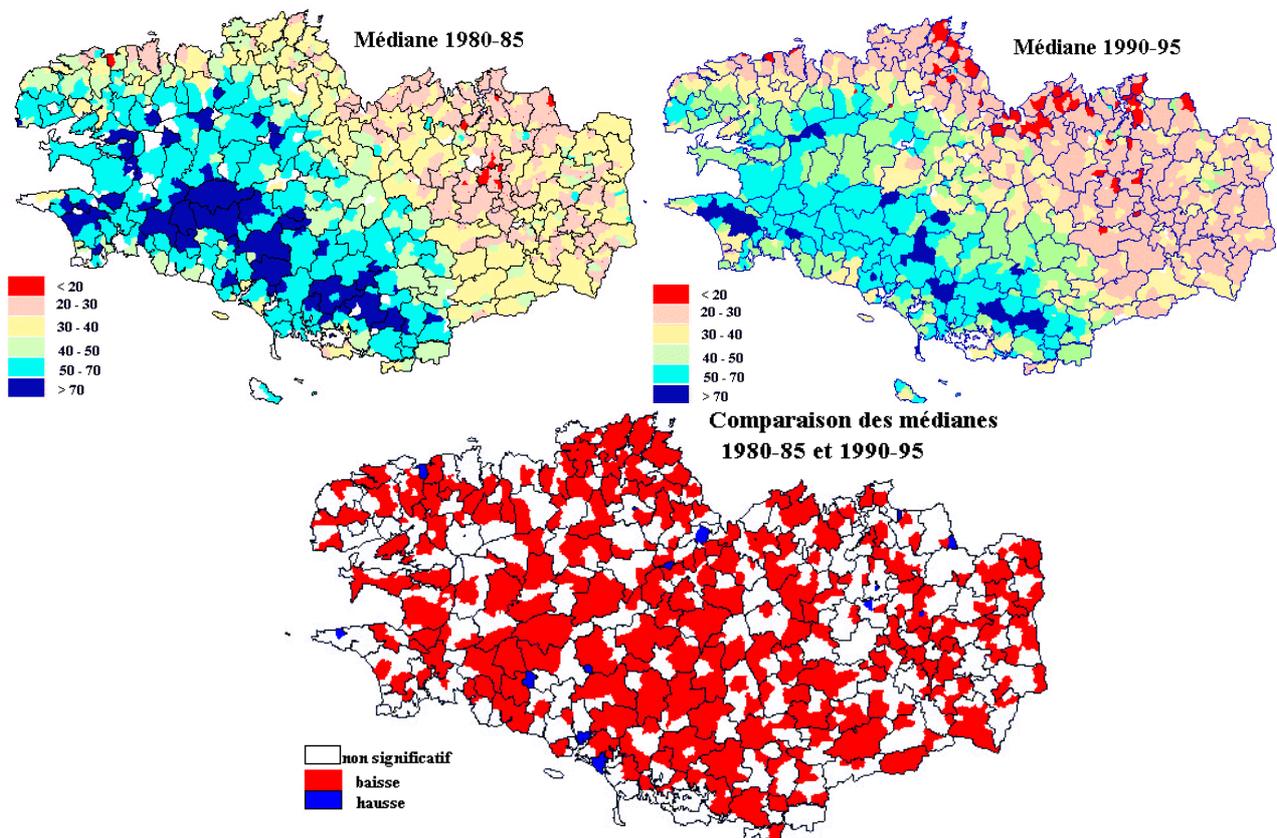


Figure 25: évolution de la teneur en matières organique des sols de Bretagne entre 1985 et 1995

Source : Afes, <http://viviane.roazhon.inra.fr/snas/index.htm#index>

b. Exportation des pailles en fonction du type de sol :

Selon Jean-Charles DESWARTE, ingénieur agronome à l'Inra de Laon, « les sols argilo-calcaires caillouteux et les sols bruns avec une pierrosité supérieure à 20 %, une teneur en argile proche de 40 %, en calcaire total de 15 à 30 % et en MO de 25 à 30 % sont sans conteste les sols qui réagissent le mieux aux exportations répétées des résidus de culture, car dans ce type de sol, la minéralisation est très lente et la teneur en cailloux maintient la structure. D'autres terrains, comme les sols bruns calciques à 45 % d'argile et 30 % de MO, mais sans cailloux, supporteraient des exportations moins fréquentes. Deux autres catégories de sols sont en revanche systématiquement pénalisées par des exportations de pailles : les limons et limons sableux à basse teneur en MO et en argile et les terrains argileux peu calcaires. Dans ces milieux, la matière organique est indispensable pour maintenir un minimum de structure » (V. THECLE, *France Agricole*, 29/10/2004).

Cependant, des travaux d'Irène FELIX ont mis en évidence que même si le prélèvement des pailles n'a pas d'impact sur la structure des sols caillouteux, il en a un sur le parasitisme tellurique de sol ou sur la réserve utile en eau.

Le potentiel de paille exportable est donc très variable selon le type de sol considéré. Une étude a été menée par Marguerite WHITWHAM (CNRS, Septembre 1999), ayant pour objectif de quantifier le potentiel de pailles de céréales mobilisables à des fins énergétiques en France, tenant compte du risque d'érosion des sols.

Dans cette étude, pour estimer la quantité de pailles produites, récoltées ou enfouies, toutes les céréales cultivées en France (blé tendre, blé dur, orge, triticale, avoine, seigle) devraient être considérées, mais pour des raisons de données manquantes, seules les pailles de blé et d'orge ont été retenues, représentant à elles seules plus de 90 % du total des pailles.

Afin de ne pas engendrer de concurrence sur le marché de la paille, le potentiel mobilisable à des fins énergétiques doit tenir compte des marchés existants. Sur une production annuelle de paille de blé et d'orge de 22 millions de tonnes, 14.5 millions de tonnes sont récoltées à des fins d'autoconsommation ou d'exportation. La différence, soit 7.5 millions de tonnes, correspond aux quantités de pailles enfouies ou brûlées (le brûlage des pailles est interdit depuis 2005).

L'évaluation des possibilités d'exportation durable des pailles s'appuie ensuite sur la détermination d'un risque d'érosion des sols, la richesse en matières organiques d'un sol favorisant notamment l'infiltration et donc limitant l'érosion. La grande diversité des sols (calcaires, limoneux, sableux, argileux, etc...) à l'intérieur d'un même département rend l'étude au niveau régional difficile et certes, localement critiquable. Néanmoins des tendances ont pu être dégagées grâce aux grands ensembles de sols définis par un travail récent réalisé par le Service d'Etude des Sols et de la Carte Pédologique de France de l'INRA. Ces grands ensembles sont caractérisés dans les figures 26 et 27.

	Localisation type	% du territoire total
G.E. des roches calcaires	Champagne, P-Charentes, Jura, Provence	14
G.E. des matériaux sableux	Sologne, Landes, Piémonts des Vosges, du M. Central, Alpes	6
G.E. d'altération peu différenciés	Vosges, Bretagne, Massif-Central	29
G.E. des formations limoneuses	Bassin Parisien, d'Aquitaine, amont du bassin Rhodanien	15
G.E. des matériaux argileux	zones sédimentaires, localisation variée	24
Autres unités	Sols salés des marais de l'Ouest et de la Camargue	12

G.E.: grands ensembles

Figure 26: Structure du territoire par grands ensembles de sols

Source : WHITWHAM M., 1999

	Acidification	Protection des nappes contre les pollutions	Dégradation, érosion
G.E. des roches calcaires	très peu sensibles	très sensibles	très peu sensibles
G.E. des matériaux sableux	très sensibles	très sensibles	sensibles
G.E. d'altération peu différenciés	sensibles	sensibles	sensibles
G.E. des formations limoneuses	sensibles	sensibles	très sensibles
G.E. des matériaux argileux	très peu sensibles	très peu sensibles	très peu sensibles
Autres unités	variable	variable	variable

G.E.: grands ensembles

Figure 27: Caractéristique des grands ensembles de sols

Source : WHITWHAM M., 1999

Ce travail a abouti à la réalisation d'une carte « d'aléa d'érosion des sols » en France, c'est-à-dire de probabilité pour que des phénomènes d'érosion tels que des coulées de boues ou la formation de croûte de battance par exemple, se produisent au sein de telle ou telle petite région agricole.

Sur les sept régions les plus touchées par ces phénomènes d'érosion (Nord-Pas-de-Calais, Picardie, Haute-Normandie, Alsace, Rhône-Alpes, Ile-de-France et Midi-Pyrénées), trois sont aussi parmi les sept régions les mieux dotées en paille : Picardie, Ile-de-France et Midi-Pyrénées. En conséquence, il a été fait l'hypothèse de ne prélever qu'environ 35 % du potentiel disponible dans ces trois régions pour éviter l'aggravation des problèmes d'érosion (soit un prélèvement tous les 3 ans). Pour les autres régions et afin de tenir compte d'un risque éventuel de dégradation du taux de matières organiques, l'hypothèse de prélever 60 % du potentiel paille a été faite, sachant qu'au Danemark, 100 % du potentiel est prélevé.

ALEA D'EROSION DES SOLS

ANNUEL, INTEGRE PAR PETITE REGION AGRICOLE.

- Aléa. très faible
- Aléa. faible
- Aléa. moyen
- Aléa. fort
- Aléa. très fort
- Zones urbanisées
- Zones de haute montagne
- Zones humides
- Pas d'information

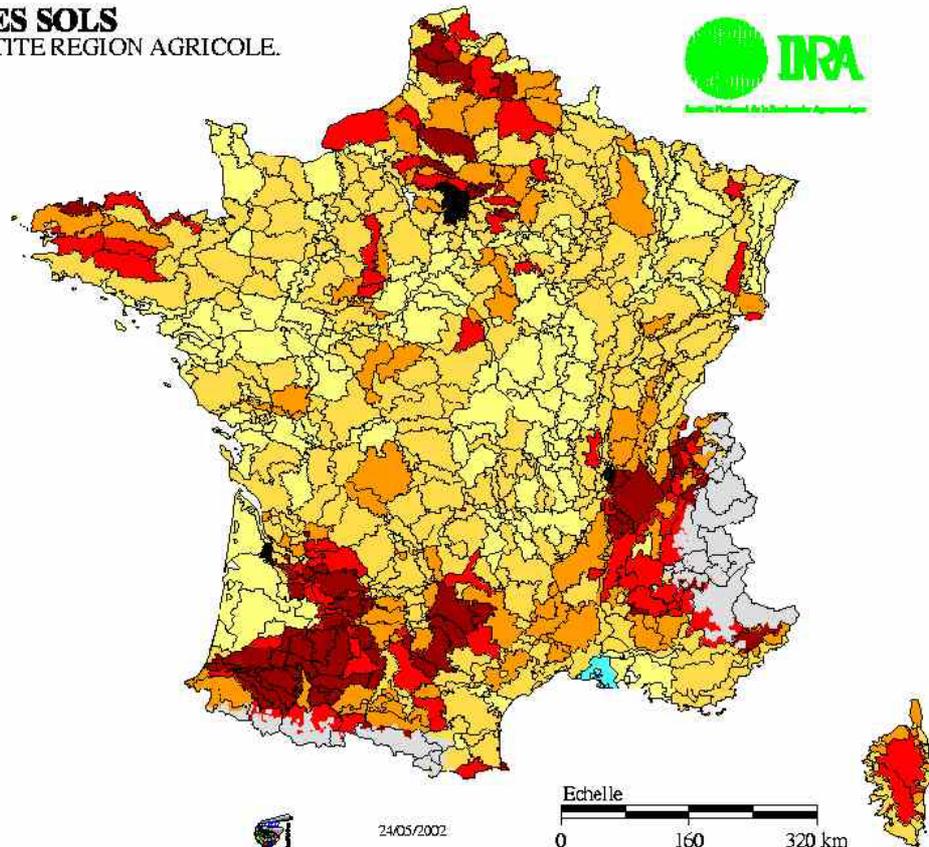


Figure 28: Carte d'aléa d'érosion des sol, annuelle et intégrée par petite région agricole

Source : INRA Orléan, 2002

Le potentiel total des huit régions françaises les mieux dotées est de plus de 7 millions de tonnes de pailles, ce qui représenterait, s'il était valorisé totalement, environ 3 Mtep.

Mais avec les hypothèses mentionnées ci-dessus pour prendre en compte un risque érosion, ce potentiel a été ramené à 1.5 Mtep. Les résultats obtenus sont résumés dans la figure 29.

Un potentiel de 4 millions de tonnes serait donc mobilisable durablement selon cette étude pour des fins énergétiques.

	Hypothèse de prélèvement ktonnes	Potentiel énergétique ktep	Reste sur le sol (t/ha) t/ha	Carbone stocké dans le sol au bout d'1 an (1) kg/ha
Ile de France	396	154	1,9	128
Champagne-Ardenne	772	301	0,8	55
Picardie	521	203	1,2	84
Centre	1 146	446	0,8	51
Bourgogne	468	182	0,6	41
Lorraine	390	152	0,7	48
Poitou Charentes	178	69	0,3	17
Midi-Pyrénées	213	83	1,0	67
TOTAL	4 085	1 591		

(1) Avec k1, le taux d'humification = 0,15 (Mary et Guenif-1994)

Figure 29: Potentiel énergétique mobilisable sans risque des pailles en 1997

Source : WHITWHAM M. 1999

D'autres études et méthodologies existent pour évaluer les quantités de pailles disponibles pour des utilisations énergétiques avec un rythme de prélèvement minimisant l'impact sur les matières organiques des sols agricoles. Ces méthodologies sont en particulier mises en œuvre lors d'études de gisements sur des territoires. Ainsi, le GIE ARALIS/ONIDOL a mis au point une méthode, utilisée notamment dans les programmes Cartopaille ou REGIX. A partir de la quantité de paille produite sur un périmètre donné, sont retirées les quantités de pailles autoconsommées par l'élevage et celles destinées aux marchés pour l'élevage. A cela est appliqué un coefficient d'exportation défini par les experts régionaux, qui tient compte de la teneur nécessaire en matières organiques des sols pour assurer leurs capacités durablement. Ceci aboutit à une quantité de pailles exportable durablement, à laquelle est appliquée un coefficient correspondant au consentement des agriculteurs à offrir leur paille, également défini à dire d'expert. La quantité de paille ainsi déduite correspond à la paille disponible durablement pour de nouveaux marchés.

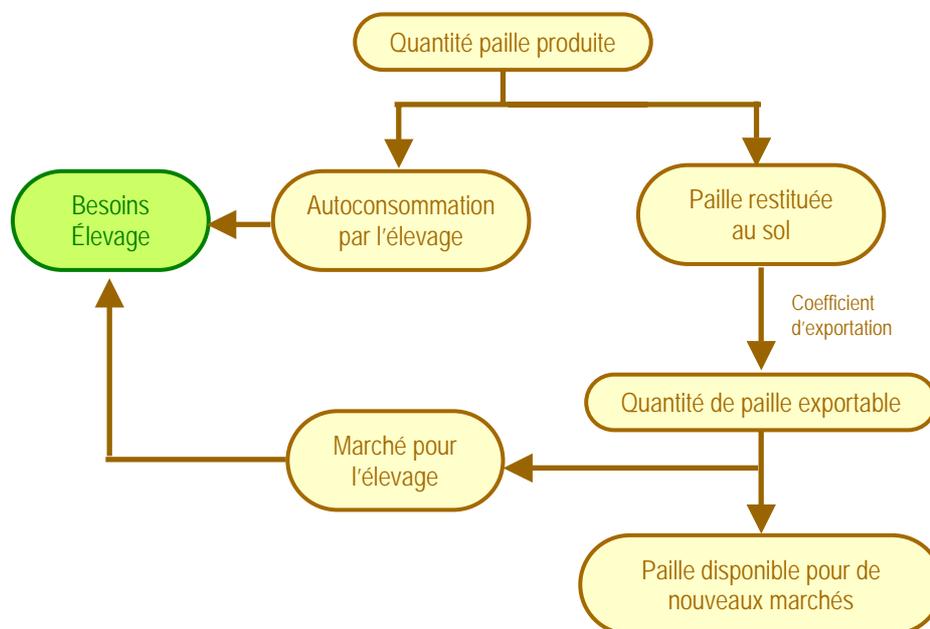


Figure 30 : Méthode GIE ARVALIS/ONIDOL utilisée pour définir la quantité de paille disponible durablement pour de nouveaux marchés

Source : JACQUIN, 2007

c. Exportation des pailles en fonction du système de production :

La prise en compte du type de sol pour la décision d'exporter ou non les pailles ne suffit pas, il faut également s'intéresser à l'orientation technico-économique de l'exploitation agricole.

En effet, en agriculture, les restitutions organiques peuvent être insuffisantes sur une grande période et entraîner une baisse significative du taux d'humus des sols et de leur fertilité à long terme. C'est le cas principalement en zone céréalière où l'absence d'élevage induit un déficit structurel de matières organiques (de nombreux sol ont vu passer leur taux d'humus de 2.4 % à 1.8 % en trente ans).

Dans d'autres situations au contraire, les apports de fumiers et de lisiers peuvent être largement excédentaires et poser des problèmes de pollution des eaux par l'ion nitrate suite à sa minéralisation importante.

Il existe donc une infinité de situations différentes qui réclament des traitements différenciés (VILAIN L., 2003), mais de grandes tendances peuvent être définies.

La carte, présentée figure 31, classe les communes françaises en fonction de l'orientation technico-économique des principales exploitations agricoles.

Quatre grandes catégories d'exploitations agricoles peuvent être définies :

- les exploitations orientées vers les grandes cultures,
- les exploitation orientées vers l'élevage (herbivore et granivore),
- les exploitations mixtes (exploitation polyculture élevage),
- les exploitations de cultures permanentes (essentiellement vignoble et vergers)

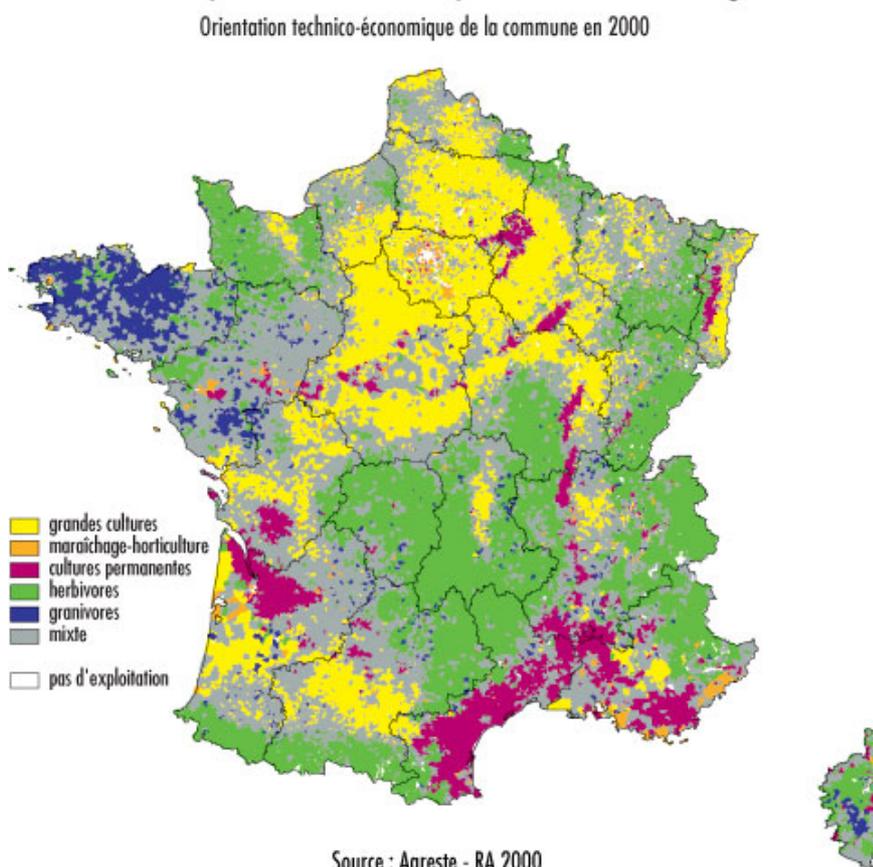


Figure 31: Orientation technico-économique de la commune en 2000

Source : Agreste, 2000

A ces 4 grandes orientations, 3 situations peuvent s'identifier facilement :

- 1 : *Equilibre* : exploitation en polyculture élevage comprenant entre 1 et 2 UGB/ha.

Sauf exportation de fumiers et lisiers produits, il n'y a globalement ni excès, ni déficit de matières organiques à l'échelle de l'exploitation, car l'exportation des résidus de cultures, dans un but d'autoconsommation, est équilibrée par l'épandage de ces produits sur les parcelles de l'exploitation. Si l'on compare la carte des OTEX avec celle présentée figure 20, « Distribution du carbone organique des sols de France », on s'aperçoit que ces sols contiennent en moyenne 2 à 3 % de matières organiques. Dans ce cas aucune mesure supplémentaire n'est nécessaire pour maintenir un taux en matières organiques acceptable.

- 2 : *Excédent structurel* : exploitations comprenant généralement plus de 2.5 UGB/ha, soit les exploitations orientées vers la production animale.

Dans les exploitations orientées vers la production animale, malgré une exportation quasi systématique des pailles, les sols de ces exploitations ne présentent jamais ou presque de déficit en matières organiques. La comparaison des deux cartes présentant d'une part le taux de C organique des sols en France et d'autre part l'orientation technico-économique des exploitations, montrent que généralement les sols de ce type d'exploitation sont riches en matières organiques avec un taux souvent supérieur à 2.5 %.

En effet, aujourd'hui la quasi-totalité des effluents d'élevages est épandue sur les parcelles de l'exploitation, à la fois intéressants pour leur valeur fertilisante, mais aussi pour leur teneur en matière organique.

Dans les situations 1 et 2, c'est-à-dire « à l'équilibre » ou avec « un excédent structurel », le taux de matières organiques des sols est principalement maintenu grâce à la présence, dans l'assolement, de prairies permanentes. En effet, les prairies permanentes fournissent au sol des résidus organiques (renouvellement et exsudats racinaires) qui sont déjà positionnés dans le sol. Ils sont donc rapidement protégés par le complexe argilo humique de la dégradation par les bactéries, ces résidus participent donc activement au stock de matières organiques stables. Les apports en matières organiques des cultures permanentes sont bien plus importants que ceux engendrés par l'épandage de produits résiduels organiques.

- 3 : *Déficit structurel* : exploitations sans prairie permanente, soit exploitations de grandes cultures.

Dans cette configuration, « maintenir les niveaux de matières organiques du sol » est plus problématique.⁴ Pour tenter de répondre à cette nécessité, le suivi dans le temps du taux de matières organiques des sols semble être un passage obligé.

Une analyse périodique pourrait constituer un repère capable de mettre en évidence une baisse éventuelle du taux d'humus des sols. Malgré sa difficulté de réalisation, un bilan humique annuel de la parcelle serait la méthode la plus pertinente.

Dans ces systèmes en déficit structurel, il existe des techniques permettant de limiter la dégradation du statut organique du sol ou de pallier temporairement à cette dégradation.

⁴ Des résultats présentés par Bruno MARY (INRA Laon) au cours d'un colloque qui s'est déroulé après la date de rédaction de ce rapport tempèrent l'impact négatif habituellement attribué aux systèmes de grandes cultures sur les stocks de carbone des sols. Il conclut dans le contexte des sols agricoles de l'aisne sur des stocks « stables avec même un début probable de restockage ». B Mary lie en particulier cette situation à l'augmentation constante des rendements agricoles sur les 25 dernières années.

Parmi ces techniques, la plus efficace est la mise en place de cultures pérennes dans la rotation des cultures.

✓ **La rotation :**

La rotation des cultures est une nécessité agricole pour limiter les risques d'infestations parasites (rupture des cycles reproductifs de nombreux ravageurs), mais aussi pour favoriser le fonctionnement biologique du biotope sol. Quand elles sont bien choisies, les successions culturales permettent également des synergies entre les cultures : par exemple l'introduction d'une légumineuse dans la rotation permet d'enrichir le sol en azote, et cet azote supplémentaire peut favoriser la minéralisation des résidus de récolte précédents.

Les rotations du nord de la France à base de betterave et de pomme de terre entraînent des baisses de matière organique.

Dans les sols fragiles (limons du Grand Ouest, des Dombes, sols sableux des Landes etc), les rotations à base de maïs fourrage entraînent des baisses de teneur en carbone.

Dans ces situations, seule l'introduction d'une prairie, à base de graminée (RGA), d'au moins 3 ans permet un maintien du taux de matière organique.

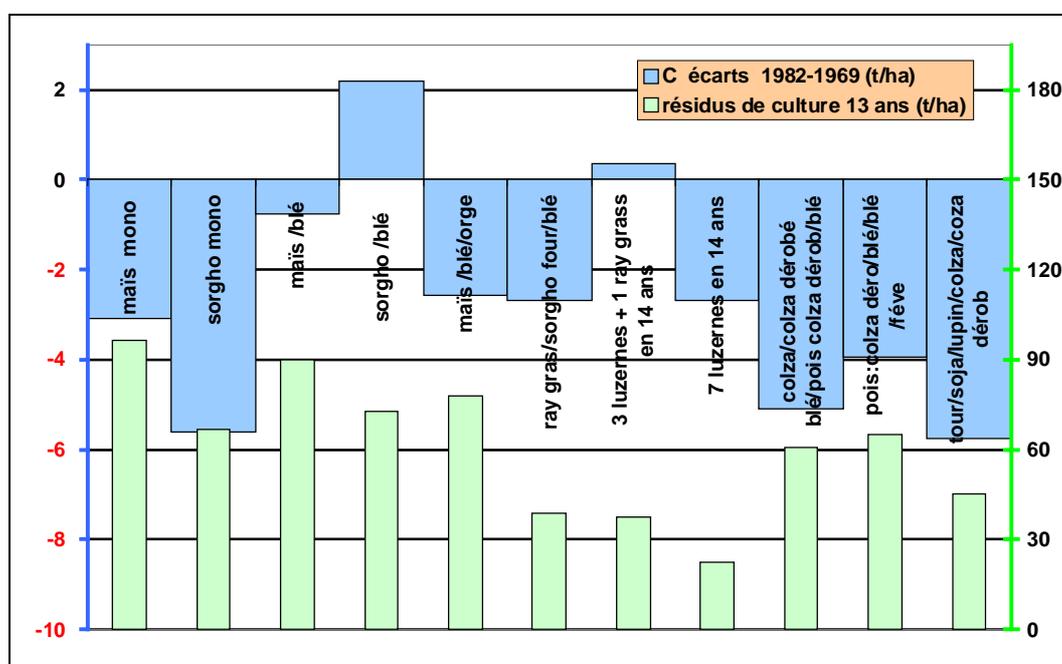


Figure 32: Essais de rotation d'Auzeville en sec

Source : Irène FELIX

La figure 32 montre que l'introduction d'une légumineuse fourragère (Luzerne) semble suffisante pour maintenir le taux de matière organique. Cependant il faut que cette légumineuse ait une pérennité d'au moins trois ans, car dans l'essai où 7 luzernes ont été plantées en 14 ans (soit une durée de vie de 2 ans), le taux de matières organiques du sol a chuté de 2.5 t de C/ha.

Selon Irène FELIX, dans les argilo-calcaires :

- la rotation à base d'oléo-protéagineux nécessite au moins 3 pailles en 4 ans avec l'enfouissement des résidus pour maintenir le taux de matières organiques des sol,
- pour une rotation maïs/blé ou maïs/blé/orge, il n'y a pas de problème lorsque les pailles sont enfouies.

Pour les sols plus limoneux, un léger déficit est observé pour les rotations maïs/blé ou maïs/blé/orge.

Dans les sols crayeux, le maintien des teneurs en matières organiques du sol est assuré, même avec peu de paille dans la rotation (Aulnay).

L'effet de la rotation sur la teneur en matières organiques du sol est variable : maintien, augmentation ou diminution. Il dépend du taux initial de matières organiques. Cependant, il ne faut pas oublier que la succession des cultures, en elle-même, a une importance moyenne sur l'évolution à long terme du statut organique des sols à travers le bilan humique parcellaire. Seul l'introduction de cultures pérennes dans la rotation peut permettre de maintenir un taux de matières organiques élevé.

✓ **Les apports organiques :**

Les déchets organiques sont, pour le sol, des sources potentielles de matières organiques exogènes pouvant permettre d'augmenter le stock de matières organiques des sols. Les déchets les plus efficaces ont une composition chimique telle que la matière organique sera stable.

Les fumiers, et autres effluents d'élevage, constituent la source majoritaire d'amendements organiques en agriculture. En revanche, dans les zones d'agriculture où l'élevage a pratiquement disparu, les déchets organiques d'origine urbaine ou industrielle constituent la source majoritaire d'approvisionnement en matières organiques pour les agriculteurs.

Aujourd'hui 80 % des apports organiques correspondent aux effluents d'élevage et 20% proviennent des industries et des villes.

L'apport d'amendements et déchets organiques au sol a des effets variés qui dépendent très fortement de l'origine et de la nature des produits. Brièvement, les résidus d'élevage, les boues ou les composts apportés au sol peuvent améliorer les propriétés physiques : stabilité de la structure, protection contre l'érosion, et augmentation de la rétention de l'eau. En sols sableux, on peut ainsi augmenter la CEC. Les amendements organiques sont aussi des sources d'éléments fertilisants par minéralisation (N, P, K). Leur apport peut augmenter les populations vivantes du sol et la biodiversité.

Cependant, il peut également y avoir des conséquences environnementales négatives, telles que les pollutions par les nitrates et les phosphates dans les eaux ou par les ETM.

✓ **Les engrais verts :**

La pratique de l'engrais vert consiste à mettre en place une culture intermédiaire, c'est-à-dire une deuxième culture dans l'année (en hiver en général, avant une culture de printemps) et à détruire cette dernière sans la récolter. Pour une action plus efficace sur les matières organiques du sol, il apparaît préférable que la destruction de l'engrais vert se fasse avec un travail de sol minimal : sans enfouissement par labour. Souvent destinée à limiter les pollutions azotées, cette pratique permet également un stockage de C dans le sol, car elle augmente la production primaire annuelle. De plus, en accroissant la durée d'occupation du sol, on augmente la quantité de C fixé, tout en contribuant à l'amélioration de la structure du sol (action des racines) à la lutte contre l'érosion, au piégeage des nitrates, voire à la lutte contre les parasites.

Selon le stade de développement de l'engrais vert au moment de l'enfouissement, l'impact sur la teneur en matières organiques du sol va varier : l'enfouissement d'un engrais vert jeune aura un effet important sur le court terme (par stimulation de la biomasse microbienne au moment de sa décomposition qui est rapide après l'enfouissement), tandis que celui d'un engrais vert mature aura un effet plus important sur l'évolution du stock de C du sol dans le long terme (tout en étant limité). Il reste donc à trouver un compromis pour le stade d'enfouissement de l'engrais vert, car s'il reste trop longtemps en place, l'engrais vert consomme de l'eau en fin d'hiver et début de printemps ce qui pourrait être préjudiciable pour la culture suivante.

✓ **Les techniques culturales simplifiées (TCS) :**

Est considéré comme « conservant le sol », tout mode de travail du sol et/ou implantation des cultures qui permet de maintenir au moins 30 % des résidus de la culture à la surface du sol après semis. Cette définition regroupe une très large gamme de techniques culturales ou d'itinéraires techniques simplifiés, dont le plus commun est la suppression du labour. (INRA, 2002)

Le labour tend à engendrer une dilution des matières organiques de surface sur une profondeur de sol plus importante, ce qui rend la structure du sol plus instable en surface. La déstructuration du sol par les intempéries dans les premiers centimètres est donc favorisée, d'autant plus que le sol est exposé longtemps (durée du sol nu), et que la préparation du lit de semence est fine. Les matières organiques sont alors rendues plus accessibles à la biodégradation. Le labour expose une nouvelle couche de terre chaque année à ce processus, tendant à appauvrir tout l'horizon travaillé.

La suppression du labour a pour conséquence essentielle d'annuler le mélange des résidus de culture avec des horizons profonds. Il y a accumulation des matières organiques en surface. Cet accroissement est sensible et a des effets positifs sur la battance et la portance du sol au bout de 3 ou 4 ans de non labour. Parallèlement, dans l'horizon anciennement travaillé, la teneur en matières organiques diminue.

Néanmoins, des travaux ont montré que le stock de matières organiques du sol augmente sensiblement, car la minéralisation de cette matière organique stable semble être légèrement plus faible de part son positionnement par rapport à la couche de surface. (VIAUX P., 2000)

L'effet qui prime dans le non labour est le ralentissement des biodégradations. (Balesdent et al, 2000)

Nous disposons en France d'un remarquable essai « travail du sol » situé à Boigneville, au sud de Paris, conduit par l'ITCF depuis 1970. Il compare 3 modalités de travail du sol : labour, travail superficiel et semis direct, avec comme rotation principale (40 parcelles) maïs-blé. Le semis direct ne comporte aucun travail du sol, excepté celui réalisé par le disque du semoir. Le travail superficiel a été effectué à une profondeur moyenne de 10 cm. Le labour a été pratiqué depuis le départ de l'essai à une profondeur moyenne de 23 cm.

Les données obtenues ont été simulées par le modèle AMG. Les résultats obtenus sont présentés dans la figure 33.

Les résultats obtenus indiquent que la réduction du travail du sol diminue le coefficient de minéralisation k_2 , et ceci d'autant plus que la profondeur de travail est réduite. Le coefficient d'humification k_1 diminue également en cas de semis direct, c'est-à-dire lorsque les résidus se décomposent à la surface. Donc le rendement des résidus en humus est également plus faible.

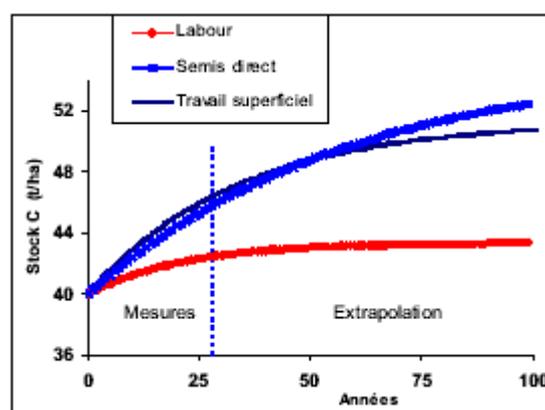


Figure 33: Evolution simulée du stock de C dans l'essai du travail du sol de Boigneville

Source : Arrouays et al. Expertise INRA, 2002

La simulation sur 100 ans (figure 33) confirme bien le fait que le travail simplifié du sol permet de stocker une quantité plus importante de C dans le sol que dans le cas d'un labour traditionnel. Par ailleurs, elle indique également que le travail superficiel permettrait de stocker plus vite du C mais en moins grande quantité sur le long terme que le semis direct.

Le labour occasionnel est aujourd'hui très pratiqué chez les agriculteurs ayant choisi des techniques culturales simplifiées ; mais il faut savoir qu'un labour réalisé une année sur quatre entraîne par rapport à la pratique continue de semis direct, une chute du gain de matières organiques, à long terme, de près de 50 %.

La réduction du travail du sol et en particulier le semis direct a des effets positifs sur le sol. Ces techniques améliorent la stabilité de la structure en quelques années. Les sols sont de ce fait et grâce au mulch moins sensibles à l'érosion et à la battance. Par contre, il semble que ces techniques culturales simplifiées n'aient pas d'effet ni sur la réserve en eau du sol, ni sur la fourniture des plantes en éléments nutritifs. Enfin, les populations microbiennes et la faune sont également plus abondantes en surface.

Ces pratiques peuvent également induire des effets négatifs tels que la compaction du sol, le développement des adventices, et donc l'utilisation plus importante de produits pesticides et d'herbicides.

Cependant, les techniques culturales simplifiées rendent d'une part plus difficiles, dans certains contextes, la lutte contre les ravageurs et/ou les adventices. D'autre part dans des sols à ressuyage un peu lent, le nombre de jours disponibles pour les préparations de sol est plus réduit en TCS car le ressuyage de la couche superficielle du sol est plus lent qu'en labour.

En conclusion, le non labour ne permet pas d'augmenter la teneur totale des matières organiques du sol, mais simplement celle de la couche de surface. Dans tous les essais réalisés, les résidus de récolte étaient enfouis ; l'impact des TCS est méconnu dans le cas d'un prélèvement des pailles.

✓ **La mise en place de cultures pérennes :**

Une autre solution, de loin la plus efficace pour maintenir ou augmenter le taux de matières organiques dans les sols, est de remplacer des cultures annuelles par des cultures pérennes. En effet, le stockage additionnel maximum est obtenu par le passage d'une culture annuelle à une végétation pérenne, qui cumule plusieurs effets :

- des apports de carbone souvent plus élevés (notamment les organes souterrains),
- des matières organiques plus résistantes à la dégradation,
- une incorporation accrue par voie racinaire, très dépendante de l'espèce cultivée, qui assure une protection physique du sol sur les matières organiques plus importante,
- une stabilisation notamment par la suppression du travail du sol, et des agrégats qui protègent les matières organiques (**ARROUAYS D., 2002B**).

Même si on exporte les parties aériennes de ces cultures pérennes, le bilan reste positif pour les matières organiques du sol car le système n'est pas aéré tous les ans, ce qui engendre un ralentissement de la vitesse de minéralisation : celui-ci est divisé par deux environ. Ce changement de cultures permet également une restitution considérable de matières organiques dans le sol par le système racinaire, car le système racinaire des cultures pérennes est fasciculé et se renouvelle à chaque coupe. De plus, le système racinaire est déjà installé dans la couche cultivée et est en contact direct avec le sol, ce qui permet une meilleure stabilisation des matières organiques par les fractions minérales du sol.

Parmi les cultures pérennes, les plus efficaces mais aussi les plus extrêmes sont les prairies permanentes, car seule la moitié de la production de biomasse est récoltée, et les forêts : les stocks de carbone actuels moyens en France sont de 40 tC/ha sous cultures annuelles, et de 70 tC/ha sous prairies ou forêts. Les durées pour atteindre ces équilibres sont de l'ordre d'un siècle. En revanche dans le cas de mise en place d'un verger ou de vignes, l'effet positif sur les matières organiques du sol reste à démontrer.

Suite à l'installation d'une prairie sur sol cultivé, plusieurs facteurs concourent à un stockage du carbone :

- le mode d'incorporation des entrées organiques, essentiellement par voie racinaire, favorise le stockage et l'incorporation directe dans la matrice du sol permettant une protection plus importante,
- la nature des matières organiques sous une prairie ou sous une rotation avec des légumineuses semble plus aromatique que sous une monoculture céréalière et donc plus résistante à la dégradation,
- l'agrégation et la stabilité structurale du sol sont augmentées par les racines, la microflore associée (champignon, bactéries) stabilise les agrégats des sols. Cette stabilisation est plus rapide que l'évolution des stocks de C lors d'une mise en prairie. Les agrégats protègent les matières organiques de la biodégradation et l'absence de travail du sol contribue au stockage des matières organiques.

✓ **Le projet « Dmostra » :**

Actuellement en cours, le projet « Dmostra » (Diversité biologique – Matières Organique – STRucture – Agriculture), coordonné par l'INRA, unité science du sol à Versailles a pour objectif de quantifier les effets des systèmes de culture, sur les matières organiques et la stabilité de la structure du sol, d'approcher leurs effets sur des communautés du sol, microorganismes et lombriciens, et d'améliorer les connaissances sur les facteurs explicatifs des changements des propriétés du sols sous différents systèmes simplification du travail du sol (couverture végétale permanente du sol, réduction plus ou moins drastiques des intrants et alternance cultures prairies), dans le cadre du contexte pédoclimatique des sols limoneux du nord de la France.

Les premiers résultats montrent que l'ensemble des changements de pratiques liées au passage d'un système productif à un système soit intégrés, soit biologique ne s'est pas traduit, au terme de 6 années d'étude, en un changement significatif du stock de C du sol. A contrario, l'ensemble des changements de pratique liés au passage du même système productif à un système sous couvert végétal sans travail du sol s'est traduit, en 5 ans, en une augmentation du stock de C d'environ 8%.

L'analyse de la réponse du stock de C du sol à la mise soit en prairie temporaire, soit en non travail du sol avec couvert végétal permanent, soit en non travail du sol sans couvert végétal permanent, amènent à suggérer que le flux important des entrées de C dans le sol jouerait davantage que le non labour en tant que tel dans le stockage additionnel de C observé sous prairies temporaires et sous non travail du sol avec couverture permanente du sol.

Concernant la stabilité structurale du sol, les résultats acquis dans le cadre de Dmostra, montrent que la mesure de la stabilité structurale est un indicateur sensible et fiable de l'effet des différents systèmes sur le sol. Trois types de différenciations ont été observés :

- une évolution faible ou absente de la stabilité (en 6 ans) pour les systèmes intégrés et biologiques
- une augmentation importante de la stabilité, avec des indices de différenciation entre 1.5 et 2 pour le travail superficiel et le semis direct à Boigneville (30 ans) et pour le système sous couvert végétal sans travail du sol (6 ans)
- une augmentation très forte de la stabilité (indice de différenciation >2) et rapide pour les prairies temporaires. L'amélioration est très rapide et très forte pour les prairies temporaires (dès 2 ans), alors que l'implantation d'un semis direct ou d'un travail superficiel à Boigneville aboutit à une différenciation plus faible, même en 30 ans. On peut en déduire que l'implantation d'un couvert végétal permanent est plus efficace pour la stabilité structurale que l'absence de travail du sol. Ceci mettrait en avant le rôle des systèmes racinaires et de la rhizosphère dans la stabilité de la structure. Cette amélioration de la stabilité structurale est toujours corrélée à une augmentation de la teneur en C, et donc de la teneur en matières organiques du sol.

6. Conclusion :

Les matières organiques du sol sont composées d'éléments organiques, organismes vivants et humus. Elles sont constamment accumulées et décomposées, libérant du carbone dans l'atmosphère sous forme de CO₂, lequel est recapturé par les processus de photosynthèse.

Les matières organiques jouent un rôle central dans le maintien des fonctions clés du sol et sont essentielles notamment pour la résistance à l'érosion et les composantes de la fertilité du sol. Elles assurent également le pouvoir fixateur et tampon du sol, contribuant à limiter la diffusion d'éléments potentiellement polluants vers les nappes d'eaux souterraines ou superficielles.

Une diminution des quantités de matières organiques dans un sol ou la modification des flux de constitution et dégradation des stocks de matières organiques peut affecter ses fonctionnalités.

Les inventaires réalisés en France montrent que l'évolution des stocks de matières organiques des sols n'est dans l'ensemble pas préoccupante, puisque les stocks mesurés sont restés stables dans la majorité des cas. En revanche, cette moyenne cache des situations contrastées et des sensibilités différentes des sols à des régimes de prélèvements/restitutions de biomasse au sol. .

La synthèse des connaissances acquises sur les matières organiques du sol, leur rôle, leur évolution et leur utilisation à des fins diverses, reste une tâche délicate. Leur étude est complexe et nécessite des essais de longue durée peu nombreux actuellement.

Sans doute en lien avec ce manque de données et protocoles expérimentaux en place, les avis d'experts sur le sujet sont variables, voire contradictoires. Les opinions varient entre : les partisans d'une attitude conservatoire à l'égard des matières organiques du sol, compte tenu des nombreuses fonctionnalités liées dont on peine à prévoir l'évolution et, les tenants d'une démarche plus active de gestion pour répondre aux nouveaux besoins en acceptant dans certains sols moins sensibles, de réduire le retour au sol d'une partie de la biomasse.

La difficulté réside en la définition de ce que seraient dans tous les cas des teneurs souhaitables en matière organiques dans les principales situations culturales. Ces teneurs souhaitables doivent prendre en compte le type de sol, les données climatiques et l'occupation du sol et répondent tant à des objectifs de préservation des potentialités agronomiques des sols qu'à la préservation de leurs qualités en matière de protection environnementale. Par ailleurs la question posée reste celle de la variable pertinente pour caractériser le statut organique des sols : teneur (mgC/kg de terre) ou stock (tC/ha).

L'impossibilité actuelle de définition de telles teneurs à l'échelle nationale, conduit à se reporter sur des évaluations à plus petite échelle, tenant compte des pratiques culturales et permettant, principalement par la préservation d'un bilan humique positif, de maintenir les principales fonctionnalités du sol liées.

Dans ce contexte, la décision d'exporter ou non une partie des pailles ou de prélever une plus grande part de la biomasse produite, est propre à chaque situation culturale et tient compte essentiellement :

- du type de sol,
- du système de culture,
- de l'évaluation des risques de battance et d'érosion

Le prélèvement des pailles peut alors induire des effets connexes sur :

- la gestion de l'azote minéral du sol en phase hivernal et sa sensibilité au lessivage
- la fertilisation minérale en P et K

Ces effets pourront être limités par l'adoption de pratiques adéquates parmi lesquels l'introduction de cultures pièges à nitrates ou l'ajustement des niveaux de fertilisation.

Ce sont l'ensemble de ces éléments qui sont pris en compte lors des évaluations de gisement en biomasse agricole disponible qui sont faites en lien avec les projets bioénergie.

Devant la difficulté de définition de ce que serait dans l'absolu une teneur souhaitable en matières organiques par type de sol, les travaux de recherche s'orientent désormais vers la mise en relation de teneurs en matières organiques avec des niveaux de fonctionnalités à préserver. D'autres travaux restent à initier qui permettraient de définir, par fonctionnalité, des seuils critiques en deçà desquels ces fonctionnalités seraient irrémédiablement perdues.

Compte tenu des besoins exprimés en biomasse pour des utilisations énergétiques il est désormais indispensable de progresser dans la définition partagée des situations pouvant faire l'objet de pratiques de prélèvement plus importants sans conséquences dommageables sur les composantes de la fertilité des sols. Ceci permettra d'aboutir sur une évaluation plus précise du potentiel de biomasse disponible mais également d'accompagner une modification éventuelle de la dynamique de retour au sol de la biomasse par des préconisations permettant d'en limiter l'impact.

Table des illustrations

Figure 1: Carte simplifiée des sols de la France métropolitaine	2
Figure 2: Constituants des matières organiques du sol	5
Figure 3: Les matières organiques humifiées améliorent la rétention en eau du sol	7
Figure 4: Variation de l'humidité du sol en fonction du devenir des pailles	8
Figure 5: Stabilité structurale et formation de la croûte de battance en fonction du taux de matières organiques.....	9
Figure 6: Les matières organiques humifiées augmentent la limite de plasticité.....	9
Figure 7: Influence de la présence de compost sur le développement de la fusariose vasculaire du lin.....	10
Figure 8: Lutte contre l'effet de serre : potentiel de stockage de C dans les sols français.....	12
Figure 9: Récapitulatif des principales fonctionnalités des matières organiques.....	12
Figure 10: Calcul des quantités d'humus fournies chaque année pour des sols non calcaires – Chiffres recommandés par Rémy et Marin-Laflèche, INRA Laon	14
Figure 11: Représentation schématique du modèle de Hénin et Dupuis.....	16
Figure 12: Représentation schématique du modèle de AMG	17
Figure 13: Structure du modèle ROTH C	17
Figure 14: Comparaison des modèles Hénin Dupuis et AMG.....	18
Figure 15: Evolution simulée des teneurs en matières organiques sur un sol de craie de l'Aube	19
Figure 16: Evolution simulée des teneurs en matières organiques sur un sol argilo calcaire ..	20
Figure 17: Evolution simulée des teneurs en matières organiques sur un limon battant	20
Figure 18: Occupation et stocks de carbone organiques des sols (0-30cm).....	21
Figure 19: Types de sol et stocks de carbone organique (T/ha, 0-30 cm).....	22
Figure 20: Distribution géographique du carbone organique dans les sols de France	23
Figure 21: Fréquence des variations de stocks de C observées sur 391 parcelles agricoles de la Picardie entre 1970 et 1998	24
Figure 22: Estimation d'une teneur souhaitable en C du sol en fonction de critères de production et d'environnement	25
Figure 23: Abaque des teneurs en matières organiques des sols de l'Aisne élaboré par Rémy et Marin-Laflèche.....	26
Figure 24: Estimation, selon le modèle AMG., des quantités de matières organiques humifiées à apporter pour un redressement de 10 % en 10 ans. Résultat global obtenu en tonnes par département	27
Figure 25: évolution de la teneur en matières organique des sols de Bretagne entre 1985 et 1995.....	30
Figure 26: Structure du territoire par grands ensembles de sols	31
Figure 27: Caractéristique des grands ensembles de sols	31
Figure 28: Carte d'aléa d'érosion des sol, annuelle et intégrée par petite région agricole.....	32
Figure 29: Potentiel énergétique mobilisable sans risque des pailles en 1997.....	33
Figure 30 : Méthode GIE ARVALIS/ONIDOL utilisée pour définir la quantité de paille disponible durablement pour de nouveaux marchés	33
Figure 31: Orientation technico-économique de la commune en 2000	34
Figure 32: Essais de rotation d'Auzeville en sec	36
Figure 33: Evolution simulée du stock de C dans l'essai du travail du sol de Boigneville	38

Bibliographie

AGRESTE, décembre 2001. Spécial recensement agricole 2000, Publication – Cahiers n°3/4, http://agreste.agriculture.gouv.fr/publications_2/cahiers_54/2000_les_1202.html

ATTOU MJ., 2004. La Biomasse et la gestion des coproduits agricoles, Projet Biomasse Energie Bazancourt, Communiqué de presse, <http://www.chamtor.fr/fr/actus/Com-presse-17-06-04.pdf>

ARROUAYS D., BALESDENT J., GERMON JC., JAYET PA., SOUSSANA JF., STENGEL P., 2002. Contribution à la lutte contre l'effet de serre, Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ?, Rapport d'expertise scientifique réalisé par l'INRA à la demande du Ministère de l'écologie et du Développement Durable, Editeurs scientifiques, 334p.

ARROUAYS D., BALESDENT J., GERMON JC., JAYET PA., SOUSSANA JF., STENGEL P., 2002B. Contribution à la lutte contre l'effet de serre, Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ?, Synthèse du rapport d'expertise scientifique réalisé par l'INRA à la demande du Ministère de l'écologie et du Développement Durable, 33p.

BALESDENT J., 1996. Un point sur l'évolution des réserves organiques des sols en France, Association Française de l'Etude des Sols, Etude et Gestion des Sols, 3 (4), pp.245-260

BEAUCHAMP J., 2003. Propriétés des sols, Université de Picardie Jules Verne, <http://www.u-picardie.fr/beauchamp/mst/sol.htm>

BODET JM., PARNAUDEAU V., 2001. Matières organiques et activités biologiques des sols cultivés : Effets des produits organiques recyclables, Perspectives Agricoles, n°272, pp. 58-61

CCE, 2002. Vers une stratégie thématique pour la protection des sols. Communication de la Commission au Conseil, au Parlement européen, au Comité économique et social et au Comité des régions. Commission des Communautés européennes, Bruxelles, 39p.

CHENU C., BALABANE M., 2001. Matières organiques et activités biologiques des sols cultivés : Une approche des matières organiques par leurs fonctions, Perspectives Agricoles, n°272, pp. 42-45

CHAUSSOD R., 1996. La qualité biologique des sols : Evaluation et implications, Association Française de l'Etude des Sols, Etude et Gestion des Sols, 3(4), pp.261-277

CHAUSSOD R., NOUAIM R., 2001. Matières organiques et activités biologiques des sols cultivés : Des indicateurs agronomiques, Perspectives Agricoles, n°272, pp. 46-48

CLAUDET G., 2006. Production de carburant par transformation thermochimique de la biomasse, CEA Grenoble, http://lpsc.in2p3.fr/grp/Dautreppe/Caludet/Caludet_texte.htm

FELIX I., 2001. Matières organiques et activités biologiques des sols cultivés : Le point en huit questions, Perspectives Agricoles, n°272, pp. 63-65

FELIX I., 2006. Nature, dynamique et rôle des matières organiques du sol, Fichier Power Point, <http://intranet.arvalis-fr.com>

GATEL P., 1996. La paille en France : Une ressource renouvelable à ne pas négliger !, Perspectives Agricoles, n°214, pp. 36-42

GREGORICH EG. et al., 2003. Modification de la matière organique du sol, http://res2.agr.ca/publications/hs/chap05_f.htm

HEIM R., 2005. Les résidus végétaux des cultures, <http://earlheim.fre.fr>

LE SOUDER C., 1996. Enfouissement des pailles : Piéger temporairement l'azote, Perspectives Agricoles, n°214, pp. 51-52

MASSE J., 1996. Gestion des pailles : Quel impact sur l'équilibre organique et minéral du sol ? Perspectives Agricoles, n°214, pp. 53-54

ROUSSEL O., BOURMEAU E., WALTER Ch., 2001. Evaluation du déficit en matière organique des sols français et des besoins potentiels en amendement organiques, Association Française de l'Etude des Sols, Etudes et Gestions des Sols, 8(1), pp.65-81

SOLTNER D., 1996. Les bases de la production végétale, TOME I: Le sol et son amélioration, Collection Sciences et techniques agricoles, 21^{ème} Edition, pp.302

THECLE V., Octobre 2004. L'exportation de la paille en assolement céréalier, La France Agricole - Archives, <http://www.lafranceagricole.fr>

VIAUX P., Juin 2000. Les techniques simplifiées : les effets positifs sur l'environnement, Perspectives agricoles, n°258, pp. 30-33

WHITWHAM M., septembre 1999. Biomasse et Electricité, La biomasse d'origine agricole, Les Cahiers du CLIP, n°10, pp. 19 – 21, www.iddri.org/iddri/telecharge/cahier-du-clip/clip_10

WYLLEMAN R., MARY B., MACHET JM., GUERIF J., DEGRENDEL M., 2001. Evolution des stocks de matière organique dans les sols de grande culture : analyse et modélisation, Perspectives Agricoles, n°270, pp. 8-14