

SOLS et MATIERES ORGANIQUES



Mémento

**pour des notions utiles
et contre les idées reçues**

Auteurs :

**Olivier ANCELIN et
Jacques DURANEL**
Chambre d'Agriculture de la Somme
19 bis, rue Alexandre Dumas
80096 Amiens Cedex 3
Tél. 03 22 33 69 00
O.ANCELIN@somme.chambagri.fr

Christian DERSIGNY
Chambre d'Agriculture de l'Oise
Rue Frère Gagne
BP 40463
60021 Beauvais Cedex
Tél. 03 44 11 44 11
christian.dersigny@agri60.fr

Annie DUPARQUE
Agro-Transfert, Ressources et Territoires
2, Chaussée Brunehaut
80200 Estrées-Mons
Fax 03 22 85 75 81
a.duparque@agro-transfert-rt.org

Laurent FLEUTRY
Chambre d'Agriculture de l'Aisne
1, rue René Blondelle
02007 Laon Cedex
Tél. 03 23 22 50 50
laurent.fleutry@ma02.org

Coordination de la rédaction et réalisation :

Annie Duparque
Agro-Transfert Ressources et Territoires

Avec les conseils et l'aimable collaboration de :

Hubert BOIZARD,	Ingénieur de recherche, INRA de Laon-Reims-Mons
Michel DEGRENDEL	Expert Foncier
Jean-Pascal HOPQUIN,	Responsable R&D, Chambre Régionale d'Agriculture de Picardie
Jean-Luc JULIEN,	Directeur du Laboratoire d'Analyse et de Recherche de l'Aisne
Bruno MARY,	Directeur de recherche, INRA de Laon-Reims-Mons
Laurent MERCHAT,	Chargé de mission, AlternatécH
Olivier SCHEURER,	Enseignant, Institut Supérieur Agricole de Beauvais Institut Polytechnique Lasalle-Beauvais

Et l'assistance technique de :

Michel GUILBERT	Service PAO, Chambre d'Agriculture de la Somme
Mylène LINE	Secrétaire, Agro-Transfert Ressources et Territoires
Renée TEURKY	Service PAO, Chambre d'Agriculture de la Somme



En 2002, un groupe de conseillers des chambres d'agriculture de Picardie, le groupe régional « Sols et Matières Organiques » ou « Sols&MO », s'est constitué avec, comme point de départ, des questions d'agriculteurs concernant la gestion des matières organiques des sols. L'évolution des taux et des stocks de matières organiques dans les sols cultivés était une des premières préoccupations soulevées : « Se décline t'elle à la baisse ? Dans quelles situations en particulier ? Pourquoi ? Jusqu'où ? Y a t-il une limite à cette baisse ? Quelles peuvent en être les conséquences ? En particulier, un phénomène comme l'érosion est-il lié à un déficit relatif de matières organique dans le sol ? »

Les réponses à ces questions ne sont pas simples et de fait, les facteurs en jeu sont nombreux (nature des sols, fréquences climatiques, pratiques culturales,...) et leurs interactions sont difficiles à identifier.

Les premiers travaux du groupe régional ont consisté à faire un état des lieux des informations disponibles et à clarifier l'approche possible des problématiques relatives à la gestion des matières organiques en région. Ces actions se sont concrétisées par :

- un inventaire des données d'analyses de terre disponibles en Picardie,
- la réalisation à dire d'experts d'une typologie des situations de gestion des sols et des matières organiques dans les exploitations de Picardie,
- l'initiation de ce mémento.

De plus, la formulation des questions émanant des agriculteurs auprès d'Agro-Transfert et de l'INRA a conduit, en 2004 au lancement du projet de recherche-développement « Gestion et Conservation de l'Etat Organique des Sols dans les Exploitations de Picardie » conduit par Agro-Transfert Ressources et Territoires.



Agro-Transfert Ressources et Territoires est une plate-forme de conduite de projets de recherche-développement basée en Picardie.

Elle a pour objectif l'introduction de démarches et d'outils innovants dans les systèmes de production agricoles pour mieux répondre aux enjeux sociaux, économiques et environnementaux du développement durable.

Agro-Transfert conduit actuellement sept projets, attachés aux enjeux de diversification des cultures : **Qualtec Pomme de terre, Pois d'Hiver**, ou à l'optimisation du management de l'exploitation agricole et de la durabilité des pratiques culturales : **Gestion des Informations dans les Exploitations Agricoles, Management de la qualité et de l'environnement, Durabilité des exploitations d'élevage, Systèmes de Culture Intégrés, Gestion et Conservation de l'Etat Organique des Sols.**

Le projet « **Gestion et Conservation de l'Etat Organique des Sols** » vise le développement d'une démarche de conseil qui permette de mettre à la disposition des conseillers et des agriculteurs des connaissances fondées et des outils d'aide à la décision pour une gestion raisonnée de l'état organique des sols sur le long terme. En particulier, le développement d'un outil de simulation de l'effet des pratiques culturales sur l'évolution de l'état organique du sol, adapté aux systèmes de culture de la région est en cours.

Le projet est conduit en partenariat avec les Chambres d'Agriculture de Picardie, l'INRA de Laon-Reims-Mons, le Laboratoire d'Analyse et de Recherche de l'Aisne, l'Institut Lasalle-Beauvais, l'Union des Experts Fonciers du Nord de la France, la Fédération Régionale des Coopératives Agricoles et avec le soutien financier du Conseil Régional de Picardie. Les activités du groupe régional « Sols&MO » sont étroitement attachées aux principaux axes de travail du projet depuis son lancement.

Pour en savoir plus : www.agro-transfert-rt.org

Avant-Propos

L'idée de ce mémento a germé au sein du groupe régional « Sols et Matières Organiques » face aux difficultés auxquelles sont régulièrement confrontés les conseillers agricoles pour apporter des réponses claires et étayées aux questions des agriculteurs relatives aux matières organiques des sols. Fruit d'une collaboration avec Agro-transfert Ressources et Territoires, il permet aujourd'hui de proposer aux prescripteurs du monde agricole un point sur des termes couramment rencontrés sur le sujet mais souvent difficiles à cerner avec précision.

Son ambition est de favoriser l'usage d'un vocabulaire commun sur cette thématique vaste mais centrale pour qui s'intéresse au fonctionnement, à la gestion, à la conservation des sols, à leur perception par les agriculteurs et à la traduction de ces notions en termes de pratiques culturales.

S'il ne recherche pas l'exhaustivité, ce mémento « Sols et Matières Organiques » a été voulu suffisamment précis pour être fidèle à la réalité scientifique connue.

Privilégiant une présentation sous forme d'articles classés par ordre alphabétique et le recours à de nombreuses illustrations, il se veut également simple à consulter et éclairant en regard des préoccupations agricoles ou environnementales attachées aux sols et aux matières organiques rencontrées par les conseillers sur leur terrain d'activité, en région et au delà.

Mais ce document, bien loin d'être une fin, constitue la première version d'un recueil que ses auteurs souhaitent pouvoir enrichir de nouveaux articles, d'autres illustrations, en relation avec ses utilisateurs et en réponse à leurs attentes.

Nous vous donnons donc rendez-vous à l'adresse suivante, pour construire avec vous, sur la base de vos remarques et de vos suggestions, la prochaine version du Mémento « Sols et Matières Organiques »¹ :

memento@agro-transfert-rt.org

Les auteurs

¹ Sortie prévue : fin 2008

Sommaire

Les articles :

Analyse (teneur en matière organique)	page 5
Aptitude à la fissuration	page 7
Baisse des teneurs, baisse des stocks en matière organique	page 8
Battance	page 10
Bilan Humique	page 12
Biomasse microbienne	page 13
C/N (Rapport)	page 14
Carbonates	page 15
CEC : Capacité d'échange cationique	page 16
CBM (Caractérisation biochimique)	page 17
Cellulose (Hemicelluloses)	page 18
Coefficient isohumique (k1)	page 19
Coefficient de minéralisation (k2 ou k)	page 20
Densité Apparente	page 20
Echange paille-fumier	page 21
Effet de serre	page 22
Erosion	page 24
Fournitures d'azote	page 25
Humus	page 26

ISB (Indice de Stabilité Biologique)	page 27
Masse volumique	page 28
Matières organiques	page 29
Matière organique	page 29
Minéralisation	page 30
Modèle Hénin-Dupuis	page 30
Modèle AMG	page 31
Non-labour	page 31
Prix de l’humus	page 31
Profondeur de labour (Profondeur de travail du sol)	page 32
Restitutions humiques	page 34
Stabilité structurale (Indice)	page 35
Teneurs et stocks	page 37
Teneur souhaitable	page 39
Technique sans labour (TSL)	page 40
Valeur de l’humus	page 42
Références bibliographiques	page 43
Index des termes cités	page 46

***Nota bene :** les termes apparaissant en gras avec un astérisque dans le texte d’un article renvoient à un autre article du mémento.*

ANALYSE (TENEUR EN MATIERE ORGANIQUE DU SOL)

On ne mesure pas directement la teneur en matière organique du sol sur un échantillon de terre. Le laboratoire d'analyse détermine la **teneur en carbone organique** de la terre, par la méthode Anne² qui a été la plus généralement utilisée jusqu'à ces dernières années. La méthode Dumas³ tend à présent à se généraliser.

La teneur en matière organique est estimée en appliquant à la teneur en carbone organique déterminée par l'analyse un coefficient multiplicateur compris entre 1,7 et 2 :

$$\text{MO (g/kg)} = \text{C organique (g/kg)} \times \text{coefficient}$$

Le coefficient de 1,72 est couramment utilisé en France (taux de carbone de la MO = $1/1,72 = 58\%$), mais la Station Agronomique de l'Aisne a montré que le coefficient 2 était plus pertinent dans le contexte pédoclimatique et agricole picard (taux de carbone = 50%).

² **Méthode Anne** (oxydation par voie humide) : Détermination du carbone organique par oxydation en milieu acide (mélange sulfochromique) suivie d'un dosage par colorimétrie

³ **Méthode Dumas** (oxydation par voie sèche) : Détermination du carbone (et de l'azote total) à l'aide d'un analyseur élémentaire, par combustion en présence d'oxygène à plus de 1000°C. Les gaz issus de la combustion (CO₂, N₂) sont séparés par chromatographie et analysés par conductivité thermique. La méthode dose l'ensemble du carbone. Si le sol contient des **carbonates***, il faut retrancher la teneur en carbone de ces carbonates pour obtenir la teneur en carbone organique du sol.

Remarques :

Une **teneur** exprime un rapport de quantités, une concentration : quantité d'une substance contenue dans une matière composite pour une quantité donnée de cette matière.

La teneur en C organique de la terre s'exprime en **grammes** de C organique **par kg** de terre.

Un **taux** donne une proportion. Il s'exprime notamment en « pour-cent » (% ; 1/100), « pour-mille » (‰ ; 1/ 1 000), « parties-par-million » (ppm ; 1/ 1 000 000).

Une teneur de 10g de C organique/kg de terre correspond à un taux de C organique de 10 ‰ ou de 1 %.

Une teneur de 150 mg de K₂O par kg de terre correspond à un taux de K₂O de 150 ppm ou 0,150 ‰.

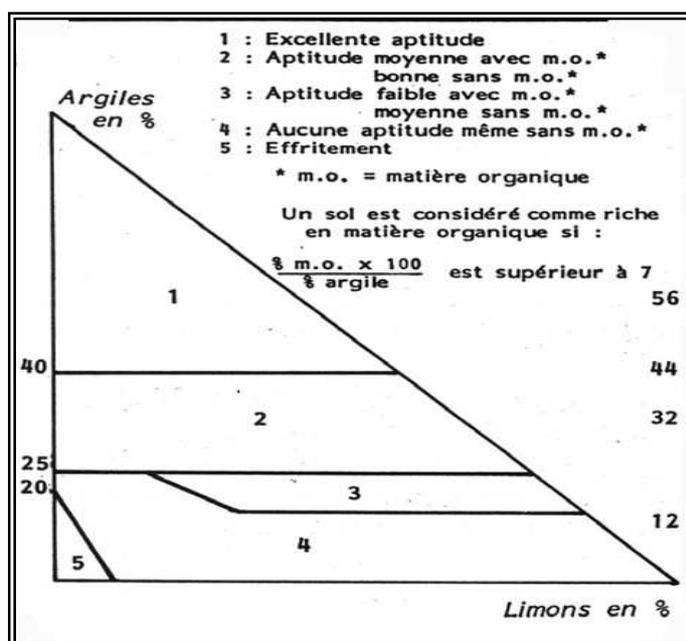
(voir aussi **Teneurs et Stocks***, **Teneur souhaitable***)

APTITUDE A LA FISSURATION D'UN SOL

L'aptitude à la fissuration d'un sol traduit l'intensité des mécanismes de division du matériau sol par gonflement et retrait sous l'effet des variations d'humidité (humectation et dessiccation) et sous l'effet combiné du gel et du dégel. Elle donne ainsi une indication sur la capacité d'un sol à se restructurer naturellement sous l'effet du climat. Elle dépend de la texture du sol, en particulier de sa teneur en argile et en matière organique et du type d'argile.

Un abaque s'appuyant sur le triangle des textures du G.E.P.P.A⁴. (Figure 1) répartit les sols en cinq classes d'aptitude à la fissuration.

Figure 1 :
Influence de la texture et de la teneur en MO sur l'aptitude à la fissuration des sols



Source : d'après Monnier et Stengel, 1982, cités par Soltner, 1999

Dans le cas des classes 2 et 3, la richesse du sol en matière organique est prise en compte ; elle est appréciée par un indice et permet de moduler l'appréciation établie d'après la texture seule : de fait, la matière organique modifie les propriétés de gonflement-retrait du sol. Si sa proportion par rapport à l'argile est suffisante (> à 7 % du taux d'argile), elle tend à diminuer l'aptitude à la fissuration.

⁴ G.E.P.P.A. : Groupe d'Etude des Problèmes de Pédologie Appliquée

BAISSE DES TENEURS, BAISSE DES STOCKS DE MATIERE ORGANIQUE DES SOLS

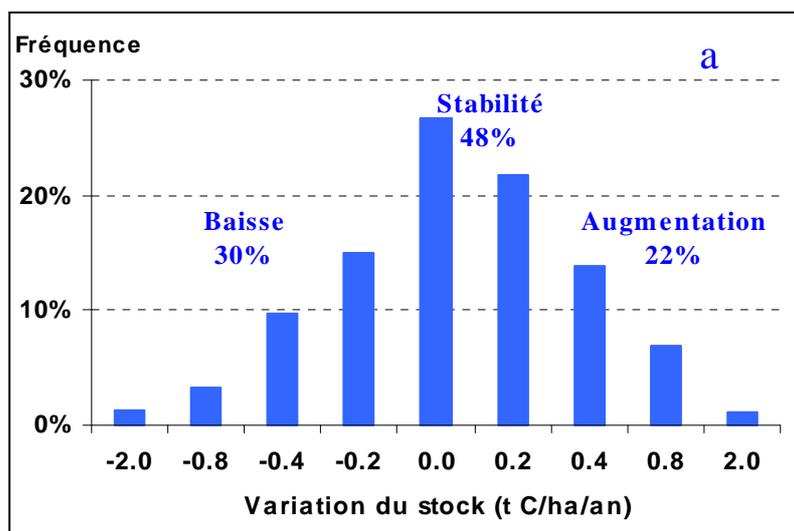
On a pu observer une baisse des teneurs en carbone organique de la couche travaillée des sols agricoles en France entre les années 1950 et 1980, à l'occasion notamment des retournements de prairies permanentes et d'approfondissements du labour.

Depuis la réforme de la PAC en 1992, les retournements de prairies sont beaucoup plus rares et au cours des vingt dernières années, les profondeurs de labour ont eu tendance à diminuer (10 à 25%).

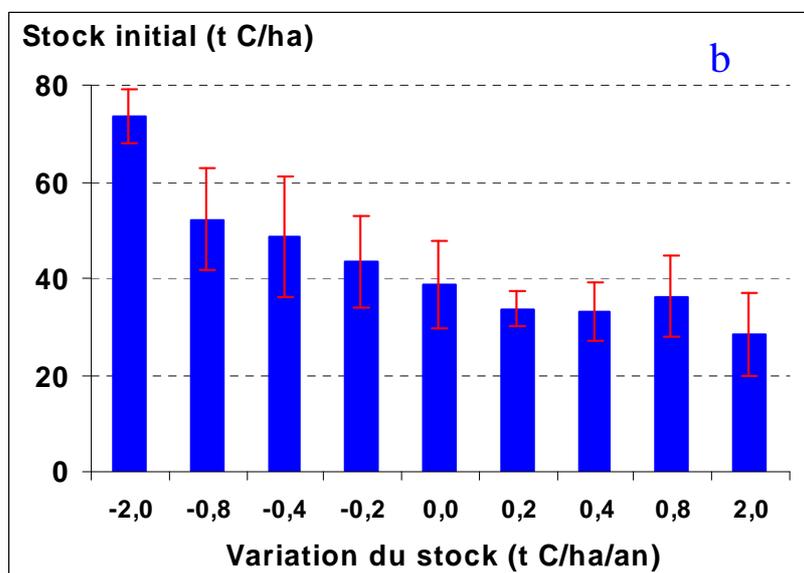
Une étude récente a été conduite à l'INRA de Laon (Wylleman, 1999 ; Wylleman et al, 2001) sur l'évolution du stock organique de près de 400 parcelles agricoles du département de l'Aisne. A l'encontre d'idées couramment véhiculées et de résultats d'études menées dans d'autres régions françaises, elle montre une stabilité globale des stocks de carbone organique sur une période de quinze à trente ans (Figure 2a) et un resserrement de l'étendue de la variation : dans les situations où le stock de carbone organique était faible, il tend à augmenter ; dans celle où il était important, il tend à diminuer (Figure 2b). Il est probable que ces tendances soient applicables aux deux autres départements picards.

Figure 2 :
Variation des stocks de C organique constatée sur un échantillon de 391 parcelles cultivées dans l'Aisne, entre 1970 et 2000 :

a) Distribution des variations constatées



b) Variations en relation avec le stock de carbone constaté en début d'étude



*Source : Bruno MARY
 INRA LAON*

BATTANCE

Le phénomène de battance est caractérisé par la destruction des agrégats à la surface de certains sols, notamment à texture limoneuse, sous l'impact des gouttes de pluie (effet « splash », où il y a éclatement des agrégats et détachement de particules de terre fine de la surface de ces agrégats), suivie de la formation d'une croûte de surface à structure plus ou moins feuilletée, plus ou moins continue. (Boiffin, 1984 ; Le Bissonnais et Le Souder, 1995). Les laboratoires calculent, à partir des résultats de l'analyse de terre, un indice dit « **indice de battance** » (IB) (Rémy et Marin-Laflèche, 1974), qui permet d'approcher la sensibilité *a priori* d'un sol vis à vis de ce phénomène :

$$IB = \frac{(1,5 \times \% \text{ de limons fins}) + (0,75 \times \text{limons grossiers})}{(\% \text{ argile} + 10 \times \% \text{ de matière organique})} - C$$

si pH < 7, C = 0 ;
si pH > 7, C = 0,2 (pH - 7)

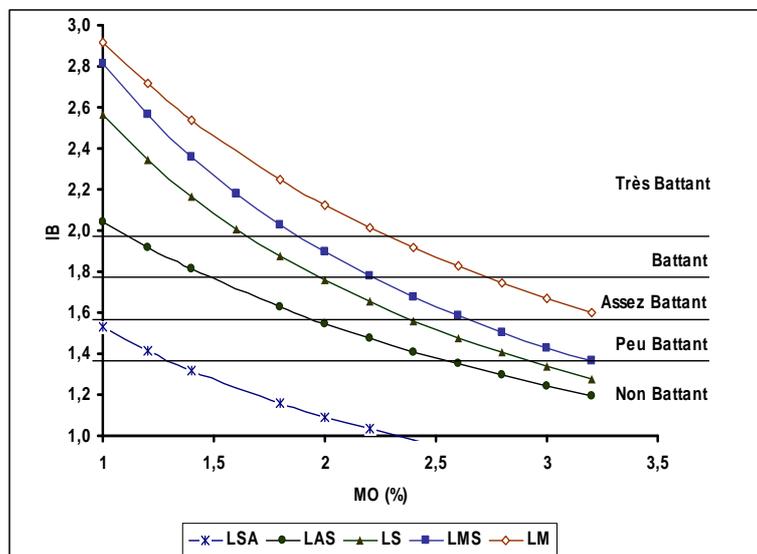
Interprétation :	IB > 2	très battant
	IB = 1,8 - 2	battant
	IB = 1,6 - 1,8	assez battant
	IB = 1,4 - 1,6	peu battant
	IB < 1,4	non battant

Pour un sol de composition granulométrique donnée, l'indice de battance diminue avec une augmentation de la teneur en matière organique de la couche de sol travaillée (Figure 3).

L'adoption de **techniques sans labour*** conduit en général à un enrichissement relatif de la couche superficielle du sol en MO. Pour certaines, elles favorisent le maintien des résidus de cultures en surface. Ces techniques peuvent ainsi contribuer à limiter la sensibilité du sol à la battance.

(Voir aussi **Erosion***)

Figure 3 :
Variations de
l'indice de
battance en
fonction de la
teneur en MO de la
couche travaillée
à pH=7.



Source : Agro-TransfertR&T

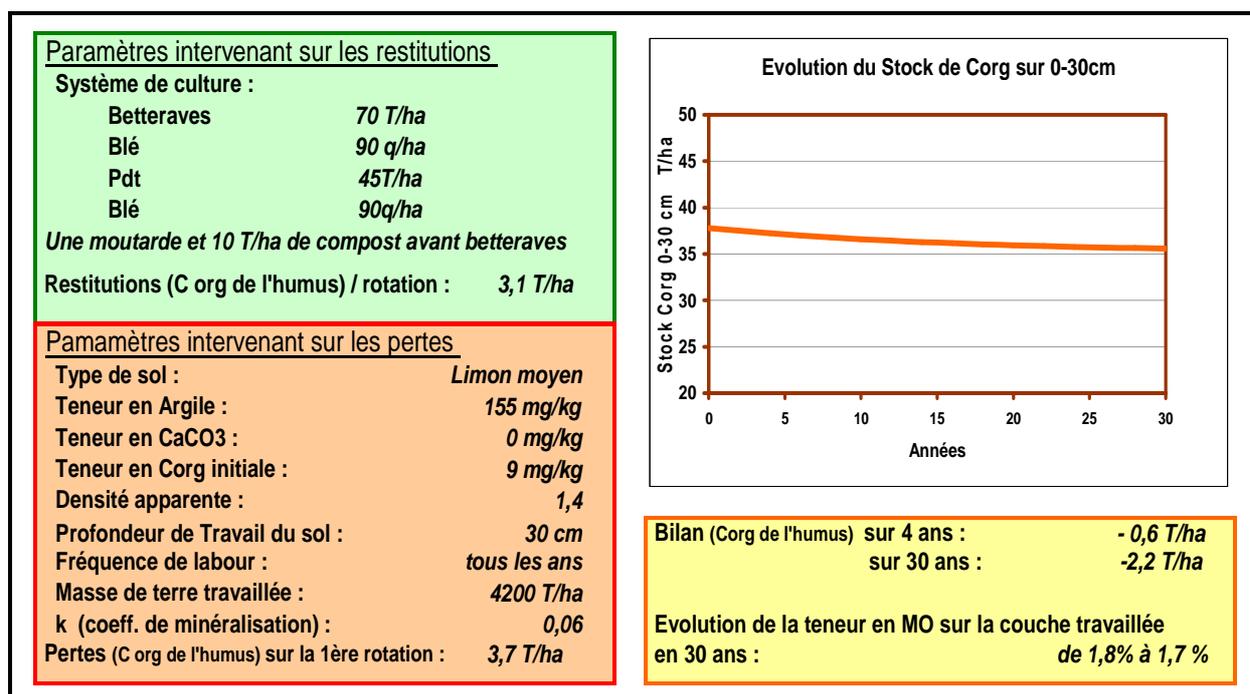
Application de la formule de Rémy et Marin-Lafliche à plusieurs types de sols : LMS : Limon Moyen Sableux, LS : Limon Sableux, LSA : Limon Sablo-Argileux, LAS : Limon Argilo-Sableux, Limon Moyen, d'après le triangle des textures de la Station Agronomique de l'Aisne

BILAN HUMIQUE

Le bilan humique consiste à comparer, sur une période donnée correspondant en général à la rotation, les « entrées » et les « sorties » d'**humus***. Les quantités d'humus « entrantes », résultent de la transformation dans le sol (humification) des matières organiques apportées ou restituées (résidus de cultures, amendements organiques, engrais verts, ...). Les quantités « sortantes » proviennent de la minéralisation. Ce calcul se fait à partir de modèles issus de la recherche. Le **modèle Hénin-Dupuis*** a été le plus utilisé jusqu'à présent. Il sera progressivement remplacé par une variante de ce modèle, mieux adaptée et appelée « **modèle AMG** »* (du nom de ses auteurs : A. Andriulo, B. Mary et J. Guérif ; références : Mary et Guérif, 1994 ; Andriulo et al, 1999).

Pratiquement, le bilan humique permet d'évaluer l'impact des systèmes de culture et des pratiques agricoles (notamment la gestion des résidus de culture et des amendements humiques) sur l'évolution à long terme du stock de carbone organique du sol.

Figure 4 : Exemple de calcul de bilan humique



Source : Agro-Transfert R&T : Calcul réalisé avec le modèle AMG - 2007

Un bilan négatif indique que le stock de carbone organique du sol tend à baisser jusqu'à un état d'équilibre théorique où les pertes (« sorties ») sont compensées par les restitutions (« entrées »).

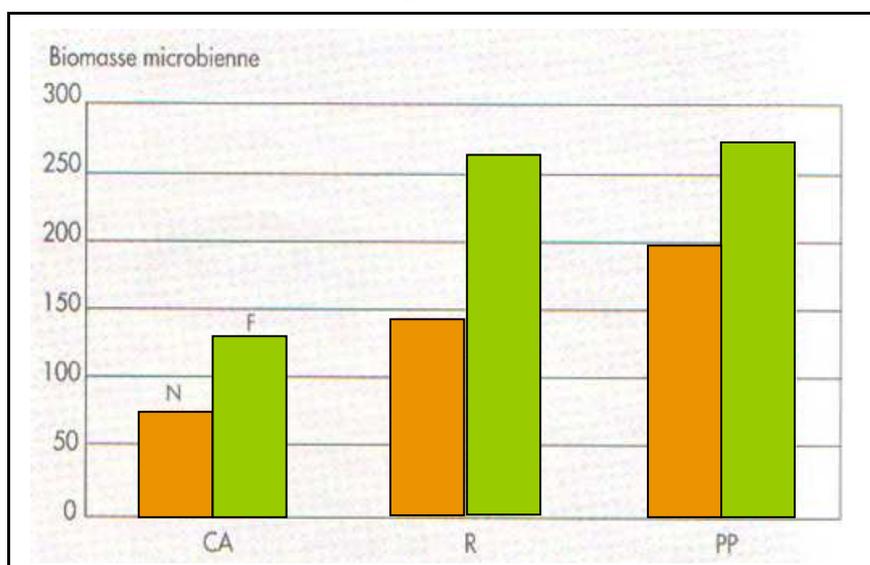
BIOMASSE MICROBIENNE

Le terme de "biomasse microbienne" désigne la masse de l'ensemble des microorganismes du sol (bactéries, champignons, actinomycètes). La biomasse microbienne est mesurable expérimentalement. Le carbone contenu dans ces microorganismes est mesuré après les avoir tués à l'aide de vapeurs de chloroforme (méthode dite « biocidale ») puis en mesurant le carbone organique solubilisé par ce fumigant. Cette méthode est basée sur la technique de « fumigation-extraction » : on mesure la différence entre le carbone extrait d'un échantillon de sol fumigé et d'un échantillon du même sol non fumigé. Le supplément de carbone rendu extractible par la fumigation est directement proportionnel à la biomasse microbienne présente dans le sol étudié. Cette méthode s'applique à tous les types de sol. Les échantillons de terre doivent cependant être traités frais et prélevés hors de périodes de déficit hydrique ou de stress thermique (Chaussod et Nouaïm, 2001).

L'interprétation des mesures de biomasse microbienne doit s'appuyer sur la détermination, en parallèle, des autres caractéristiques principales du sol (**teneur*** en C organique, texture, pH, **CEC***...). La biomasse microbienne d'un sol est un indicateur précoce et sensible des changements d'usage ou de gestion des sols (Powlson et al, 1987) : on peut donc supposer qu'elle est un bon indicateur de la fraction active du carbone du sol. Un changement d'occupation du sol peut la faire varier du simple au double (Loiseau et al, 1994) (Figure 5).

Figure 5 :
Effet du type de système de culture sur le niveau de biomasse microbienne

Source : d'après Loiseau et al, 1994



Trois systèmes de culture différenciés pendant 20 ans : CA : rotation de cultures annuelles ; R : rotation avec prairie temporaire ; PP : prairie permanente. Deux types de fertilisation pratiquées : F : Fumier ; N : Azote minéral.

C/N (RAPPORT)

Pour un sol donné, le rapport C/N (carbone organique/azote total) du sol est un indicateur du degré de décomposition ou de maturation de la matière organique du sol, hors situations de mise en culture récente.

Ainsi un rapport C/N > 12 exprime en général des mauvaises conditions de décomposition de la matière organique. L'intensification de l'agriculture a conduit à faire baisser ce rapport.

Le rapport C/N d'un produit organique destiné à être épandu donne une indication sur l'aptitude de ce produit à se minéraliser une fois incorporé au sol. On apprécie ainsi son caractère de produit plutôt fertilisant (nutrition des plantes) ou plutôt amendant (entretien des propriétés du sol). En tendance, un produit à faible C/N (inférieur à 8) se minéralise rapidement, libère de l'azote et participe peu à l'humification. Des produits à C/N élevé (notamment supérieur à 25), se transforment et se minéralisent peu et sont rapidement stabilisés (humus « hérité ») s'ils sont riches en lignine. S'ils sont plutôt riches en cellulose, leur rendement en humus stable est plus faible et leur dégradation dans le sol peut provoquer une phase d'organisation de l'azote minéral. Pour certains produits ayant subi une forte évolution avant d'être apportés au sol, comme les boues ou les composts, le rapport C/N n'est pas un bon indicateur. Il doit alors être complété ou remplacé par d'autres informations (analyses de résultats d'incubations en laboratoire, détermination d'un **ISB***).

Tableau 1 : Valeurs des rapports C/N de quelques produits organiques

Produits	Rapport C/N
Fumier de bovins très composté	11-14
Fumier de poulets de chair	9-11
Lisier de bovins	8-10
Lisier de porcs	4-6
Boue de papeterie	50
Boue liquide aérobie	4-5
Boue urbaine chaulée	8-11
Compost de déchets verts et boue résiduaire	15
Fientes de poules pondeuses	6-7
Eaux de sucrerie	12-22
Vinasses concentrées de sucrerie	7-9

Source : Chambres d'Agriculture de Picardie, 2001

CARBONATES

Les carbonates sont essentiellement des sels de l'acide carbonique H_2CO_3 .

Le carbonate de calcium $CaCO_3$ est le principal constituant des roches calcaires. Il est le composant principal des amendements basiques calciques crus. Il est très présent dans de nombreux sols cultivés. Ces sols sont généralement basiques ($pH > 7$).

Le carbonate de magnésium $MgCO_3$ intervient également dans la composition de certaines roches calcaires : ex. la dolomie (ou dolomite)

Pour déterminer la **teneur en C organique*** d'un sol, sa teneur en carbonates doit être prise en compte : en effet, la quantité de carbone présente dans les carbonates doit être déduite de la quantité totale de carbone mesurée par certaines méthodes d'analyse (méthode DUMAS*) afin d'accéder à la détermination de la seule part organique du carbone du sol.

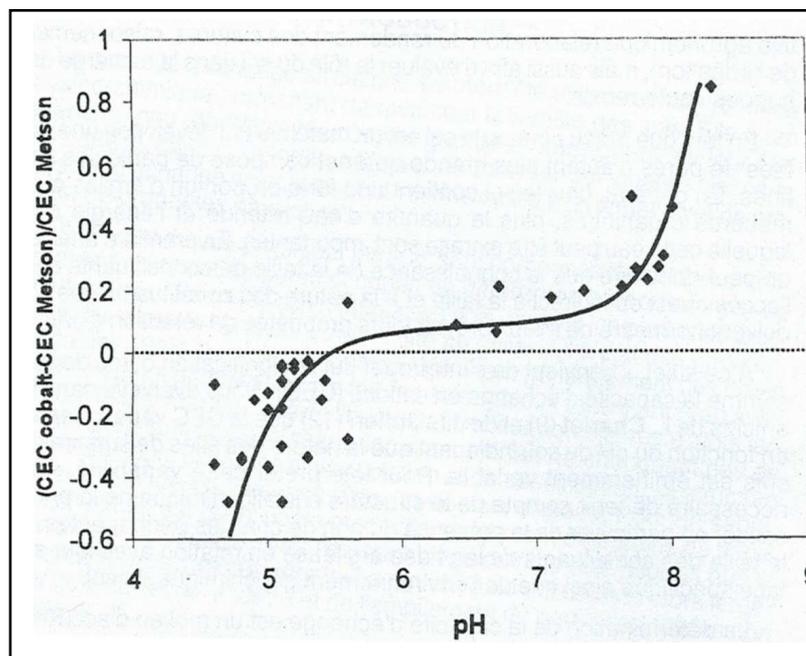
CEC : CAPACITE D'ECHANGE CATIONIQUE

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

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

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

Figure 8 :
Evolution relative de la CEC effective par rapport à la CEC à pH=7 dans les différents horizons de sols développés sur les plateaux du Dogger lorrain.
L'utilisation du rapport $CEC_e - CEC_7 / CEC_7$ permet de comparer des sols différents.



Source : Tessier et al., 1999

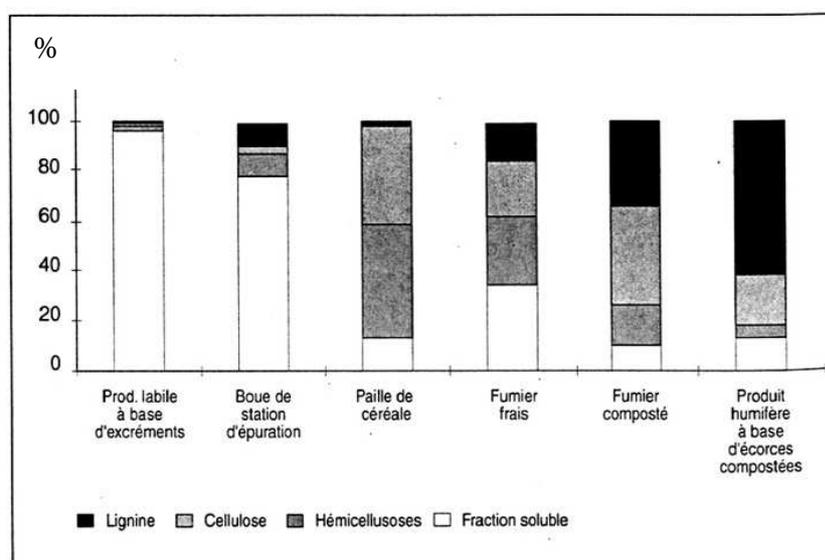
En-deçà de pH 5,5 et au-delà de pH 7,5, l'écart relatif entre la valeur de la CEC effective (CEC_e ou CEC cobalt.) et la CEC à pH 7 (CEC_7 ou CEC Metson) augmente rapidement. Dans ces cas, la CEC Metson n'est plus un bon indicateur de la CEC effective du sol.

CBM (CARACTERISATION BIOCHIMIQUE)

Cette méthode d'analyse des matières organiques a été décrite par Robin (1997). Elle vise à caractériser la manière dont un produit organique se comporte une fois incorporé au sol, en fonction de sa composition biochimique. Son principe est très proche de celui de l'**ISB***.

Elle associe une incubation du produit mélangé à de la terre, en conditions contrôlées, pendant 40 jours et un fractionnement biochimique du produit par la méthode de van Soest et Wine, qui donne ses teneurs en quatre composants : sucres solubles, hémicelluloses, cellulose, lignine (Figure 7). La teneur en matières minérales est également déterminée. Le résultat de l'incubation (carbone résiduel après 40 jours, variant entre 1 et 80% du carbone initialement présent) est un indicateur de la stabilité du produit.

Figure 7 :
Exemples de
composition
biochimique de la
partie organique
de produits
couramment
utilisés en
agriculture



Source : ITAB, 2001

Une relation statistique reliant les résultats des incubations à la composition biochimique des produits a été établie sur la base de résultats de nombreuses analyses :

$$C_{\text{résiduel}} = -0.32 \text{ Sucres solubles} - 0.72 \text{ Hemicell} + 0.67 \text{ Cell} + 1.89 \text{ LIG} + 0.003 \text{ Minéraux}$$

Elle conduit à distinguer quatre classes de produits :

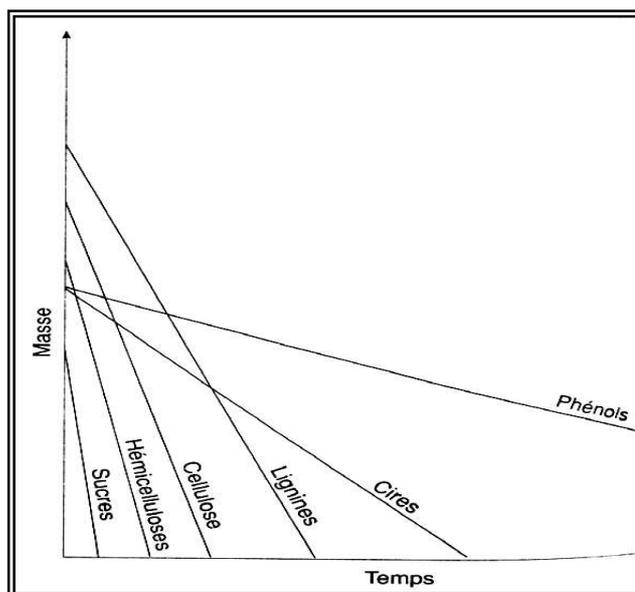
- Produits riches en fractions solubles et en azote total, facilement minéralisables (engrais organiques),
- Produits riches en hémicelluloses (> 15,5 % de la MS) (matières premières pour le compostage),
- Produits riches en cellulose et en lignine (> 65% de la MO) (amendements organiques vrais),
- Produits à faible teneur en matière organique (minéraux > 40% de la MS) (valeur fertilisante seulement)

CELLULOSE (HEMICELLULOSES)

Ces composants sont toujours présents dans les résidus de cultures, mais dans des proportions variées selon l'espèce cultivée et son stade de récolte ou de destruction.

Les vitesses de dégradation des celluloses et hémicelluloses sont assez voisines. Ces deux substrats sont très énergétiques pour les microorganismes. Ils contribuent tous les deux à l'humification. Contrairement aux celluloses qui ne contiennent pas d'azote, les hémicelluloses sont relativement riches en azote et contribuent à la libération d'azote minéral.

Figure 6 :
Vitesse de
dégradation
des principaux
produits
constitutifs de
la litière



*Source : Minderman, in Ellis & Mellor, 1995,
cité par Gobat et al, 1998*

COEFFICIENT ISOHUMIQUE (κ1)

Ce coefficient représente la quantité d'humus (kg de carbone organique du sol) formée par kilo de carbone de produit organique frais (produit amendant ou résidu de culture) apporté au sol. Attention : ce coefficient est spécifique du modèle d'évolution des MO que l'on choisit.

Les valeurs de k1 actuellement publiées (Rémy et Marin-Laflèche, 1976) sont celles qui correspondent au **modèle Hénin-Dupuis***. Les valeurs de k1 adaptées au **modèle AMG*** sont en cours d'estimation.

Tableau 2 : Valeurs du coefficient k1 (sans unité) pour différents résidus organiques selon le modèle appliqué

Culture ou amendement	Modèle HD	Modèle AMG
Blé tendre	0,094	0,213
Maïs grain	0,126	0,213
Betterave sucrière	0,094	0,182
Pois protéagineux	0,094	0,182
Colza	0,126	0,244
Pomme de terre	0,070	0,136
Engrais vert	0,039	0,076
Fumier	0,300	0,360
Boues	0,300	0,26 à 0,51

Source : Wylleman, 1999

Pour calculer la quantité de carbone humifié (carbone de l'humus) fournie par un apport donné de produit amendant (exprimé en tonnes de produits brut), il faut donc connaître la teneur en matière organique du produit brut (voir aussi **Restitutions humiques***).

Exemple : Humus fourni par un apport de 20 t/ha de fumier de bovins :

Quantité de C organique de l'humus fournie =

$$\text{Quantité de produit brut /ha} \times \text{teneur en carbone} \times k1 = 20 \times 0,09 \times 0,36 = 0,6 \text{ t/ha} \\ \text{(soit 1,3 t/ha d'humus)}$$

Attention : Les 1,3 tonnes de carbone de l'humus qui entrent ainsi dans le stock de carbone organique du sol à l'hectare sont aussi en partie minéralisées au cours de l'année de l'apport : le gain net d'humus par hectare et par an est donc moindre.

COEFFICIENT DE MINERALISATION (k_2 ou k)

Ce coefficient donne la proportion d'**humus*** transformé en matières minérales chaque année. Sa valeur (en an^{-1}) varie en fonction des caractéristiques pédoclimatiques : température et humidité du sol, teneurs du sol en argile et en calcaire. Pour le **modèle Hénin-Dupuis***, trois formules ont été proposées successivement par Rémy et Marin LAFLECHE (1974), MACHET *et al* (1990) et MARY *et al.* (1999).

Tableau 3 : Valeurs du coefficient de minéralisation par année, estimées pour quelques sols dans un climat picard, selon les deux modèles Hénin-Dupuis et AMG.

Type de sol	A ‰	CaCO3 ‰	Modèle HD Remy*	Modèle HD Machet**	Modèle HD Mary***	Modèle AMG
Argileux	302	2	0,012	0,012	0,012	0,041
Limon argileux	242	6	0,013	0,013	0,014	0,048
Limon moyen	115	9	0,018	0,019	0,021	0,074
Sable limoneux	74	0	0,022	0,022	0,026	0,092
Limon calcaire	90	271	0,009	0,015	0,017	0,059
Calcaire	118	594	0,005	0,010	0,011	0,037

* Equation $k_2 = 1200 / [(A + 200).(CaCO_3+200)]$

** Equation $k_2 = 1200 / [(0,2*T-1)/(A+200).(0,3 CaCO_3+200)]$

*** Equation $k_2 = 2900 / [(A + 110).(CaCO_3+600)]$

Source : Wylleman, 1999

Le coefficient de minéralisation k_2 est encore assez largement utilisé aussi pour estimer la quantité d'azote minéralisée par hectare et par an à partir de l'**humus*** du sol (voir **Fournitures d'azote** *) : cette valeur est alors un des termes du calcul de bilan prévisionnel utilisé pour raisonner la fertilisation azotée des cultures. Le logiciel AZOFERT (GIS Fertilisation Raisonnée ; JM Machet, INRA de Laon, publication en cours) propose cependant aujourd'hui une estimation plus précise de cette valeur.

DENSITE APPARENTE

On désigne ainsi la **masse volumique*** de la terre.

ECHANGE PAILLE-FUMIER

Les échanges de fumier contre de la paille entre éleveurs et céréaliers sont des pratiques courantes. La question est de savoir **quelle quantité de paille ou de fumier fournir pour que l'échange soit équitable, compte tenu de la quantité d'humus fournie au sol et des éléments minéraux disponibles dans l'année suivant l'apport.**

Le tableau suivant donne des indications à ce sujet.

Tableau 4 : Estimation de la valeur économique de fumiers en fonction de leur composition minérale et de leur rendement en humus

Fumier A : Fumier de bovins très compact de litière accumulée
Fumier B : Compost de fumier de bovins

Estimations pour une tonne de fumier (valeur avant sortie d'étable)	Éléments minéraux								Humus	
	N		P2O5		K2O		MgO			
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
Composition en minéraux (1) ou rendement en humus (2) (kg/T de PB)	5,8	8	2,3	5	9,6	14	1,5	2,2	63	105
Coef. de valorisation des minéraux (3)	0,2	0,1	1		1		1		/	
Quantité d'éléments valorisables dans l'année suivant l'apport	1,16	0,8	2,3	5	9,6	14	1,5	2,2	/	
Valeurs unitaires des éléments (4)	0,7 €/kg		0,46 €/kg		0,34 €/kg		0,65 €/kg		0,069 €/kg	
Valeurs totales des éléments (€/T de fumier)	0,81	0,56	1,06	2,3	3,26	4,76	0,98	1,43	4,35	7,25

Valeurs des deux types de fumiers : Fumier A : 10,46 €/T; Fumier B : 16,30 €/T

(1) source des données : *Fertiliser avec les engrais de ferme*, (Institut de l'élevage et al, 2001)

(2) Rendement en humus du fumier = Qté PB * teneur en MO * coef. Isohumique k1 :

Fumier A : 180 kg MO/T de produit brut et k1=0,35 ;

Fumier B : 210 kg MO/T de produit brut et k1=0,5 ;

(3) coefficients d'équivalence engrais, d'après , *Fertiliser avec les engrais de ferme*, (Institut de l'élevage et al, 2001)

(4) sources : Élément minéraux : prix distributeurs constatés sur la campagne 2006-2007

Humus : voir **Valeur de l'humus** *

Source : Estimations par le groupe régional Sols &MO et Agro-Transfert R&T, 2007

Sur cette base, en tenant compte du prix du marché de la paille à 17 €/T (février 2007) et en excluant tout coût de manutention, de transport ou de compostage :

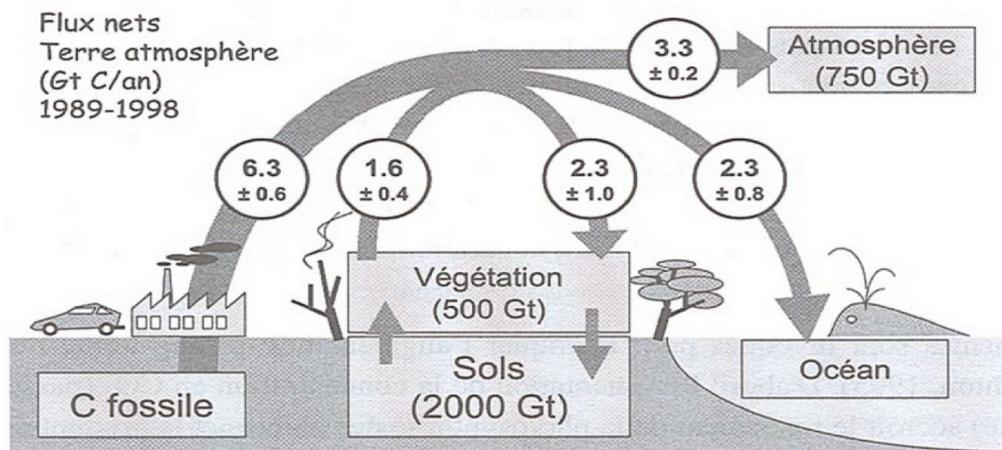
1T de paille en andain ⇔ 1,6 T de fumier (type A), à enlever sur site,
⇔ 1 T de compost de fumier (type B), à enlever sur site.

Traduit autrement : pour un hectare de céréale à paille produisant 3,5 T de paille exportable, l'échange conduirait à un apport d'environ 5,7 T de fumier de type A et 3,6 T de compost de fumier de type B.

EFFET DE SERRE

Il s'agit d'un phénomène naturel, accentué par les activités humaines. Il est lié à la présence de certains gaz dans l'atmosphère de la Terre (CO_2 , H_2O , CH_4 , N_2O essentiellement). Ces gaz absorbent une partie du rayonnement ré-émis par le sol, ce qui permet de conserver une partie de l'énergie que la Terre reçoit du soleil. Le gaz le plus abondant et le plus responsable de l'effet de serre est le CO_2 . Pour réduire les émissions vers l'atmosphère, on peut favoriser son stockage.

Figure 9 : Cycle global du carbone : flux nets terre-atmosphère



Source : Groupe Intergouvernemental d'Experts sur le Climat (GIEC) 2001, cité par Arrouays et al, 2002 a

Le stockage de carbone ne peut avoir lieu de façon sensible à échelle humaine que dans les compartiments bois et matière organique des sols. C'est à ce niveau qu'apparaissent les enjeux pour l'agriculture. Différentes voies peuvent être envisagées pour accroître le stockage de carbone dans les sols.

Tableau 5 : Hypothèses et résultats de simulations de stockage additionnel de carbone

Changement d'usage ou de pratique	Stockage annuel moyen (scénario sur 20 ans)	Contraintes agronomiques et applicabilité	Potentiel de surface retenu dans l'estimation	Stockage additionnel annuel pour le territoire français (scénario à 20 ans)
Conversion de terres labourées en prairies permanentes	0,5 t C/ha/an	Ne peut concerner que des terres rattachées à une exploitation avec élevage	De 10000 à 80000 ha par an (90000 ha/an pendant 20 ans correspondraient à la restauration de ½ de la STH perdue depuis 1970)	0,06 à 0,45 Mt C/an
Adoption du semis direct	0,2 t C/ha/an	Maîtrise des adventices et ravageurs Contraintes liées au sol, compactage	Base : 18 Mha de terres cultivées Adoption progressive, en 20 ans, sur 20 à 50% des cultures + hypothèse de labour tous les 4 ans	0,4 à 1 Mt C/an 0,23 à 0,58 Mt C/an
Implantation de cultures intermédiaires	0,16 t C/ha/an	Interculture longue + semis de printemps Concurrence pour l'eau avec la culture suivante Organisation du travail	Base : 4 Mha en cultures de printemps Adoption sur 0,5 à 2,5 Mha	0,07 à 0,33 Mt C/an

Source : Arrouays et al, 2002 b

Néanmoins, la problématique de l'effet de serre ne se résume pas au seul dioxyde de carbone (CO₂). Plusieurs autres molécules sont concernées, dont certaines proviennent aussi de l'activité agricole (méthane CH₄ ; protoxyde d'azote N₂O).

EROSION

« Dans quelle mesure l'érosion est-elle due à une diminution des **teneurs*** en **matière organique*** des sols ? »

Il reste difficile d'apporter une réponse scientifique précise à cette question car il est difficile de quantifier l'influence des matières organiques du sol sur les déterminants principaux de ce type d'événement. On rappelle cependant les points suivants :

En préalable au phénomène d'érosion proprement dit, qui se traduit par l'entraînement de terre par l'eau, il y a une déstructuration des mottes en surface du sol, d'autant plus sensible que la **stabilité structurale du sol*** en surface est faible. C'est à ce moment que les matières organiques du sol jouent leurs rôles :

- La matière organique stable (humus) et plus encore, la matière organique en cours de décomposition, augmentent la stabilité structurale et réduisent le risque de **battance*** en particulier en sols limoneux.
- Les matières organiques fraîches, lorsqu'elles sont laissées en surface, assurent une protection physique du sol vis-à-vis de l'action des pluies (impact des gouttes qui créent un effet « splash », où il y a éclatement des agrégats et détachement de particules de terre fine de la surface de ces agrégats) .

L'adoption des **techniques culturales sans labour*** favorise significativement ces deux fonctions. La pratique de cultures intermédiaires en cas d'interculture longue devant une culture de printemps permet d'assurer une protection de la surface du sol en hiver.

FOURNITURES D'AZOTE

La fourniture d'un sol en azote pour une culture est la somme d'un reliquat d'azote minéral présent dans le sol au départ et de la minéralisation nette d'azote par le sol. Si tous les autres facteurs sont identiques, la minéralisation nette d'azote est supposée proportionnelle au stock d'azote organique du sol (lui-même très lié au stock de matières organiques du sol). L'exemple donné dans le tableau ci-dessous concerne un sol de limon non calcaire labouré à 30 cm.

Tableau 6 : Exemples de fournitures d'azote minéral aux cultures provenant de la minéralisation de l'azote de l'humus

Teneur en C organique du sol (g/kg)	Minéralisation N pour la betterave (kg N par ha)	Minéralisation N pour le blé (kg N par ha)
7	59	29
11	92	46

Source : logiciel AZOBIL – INRA LAON

Méthode de calcul :

$$N \text{ minéralisé (kg/ha)} = \text{Taux de C organique} \times \text{Rapport N/C} \times \text{Masse de terre} \times k_2 \times \text{TOS} \times 1,3$$

Rapport N/C des matières organiques du sol = 0.10 ; Masse de terre = 4200 t/ha ; coefficient de minéralisation annuelle $k_2 = 0,02 \text{ an}^{-1}$;

TOS : (Temps d'Occupation du Sol) ce coefficient est fonction de la coïncidence plus ou moins forte entre la période de minéralisation active de l'azote du sol et la phase d'absorption importante d'azote par la culture. TOS = 1 pour la betterave et 0,5 pour le blé ;

Le coefficient multiplicateur de 1,3 permet de tenir compte de l'azote minéral fourni par les horizons sous le niveau du fond de labour.

(voir aussi **Coefficient de minéralisation k_2 ou k^***)

HUMUS

Le terme « Humus » est souvent synonyme de « **matière organique*** stabilisée » (au singulier).

L'humus est issu de la transformation d'une partie des matières organiques incorporées au sol. L'ensemble des processus correspondant à cette transformation est appelé « Humification ». La part des matières organiques fraîches évoluant en humus est plus ou moins importante selon la nature de ces matières organiques.

Le rendement de la transformation de matières organiques fraîches en humus correspond au **coefficient isohumique k_1 *** des modèles **Hénin&Dupuis*** ou **AMG***.

ISB (INDICE DE STABILITE BIOLOGIQUE)

Cette méthode de caractérisation de la stabilité des matières organiques exogènes a été décrite par Linères et Djakovitch (1993). Elle vise à caractériser la manière dont un produit organique se comporte une fois incorporé au sol en fonction de sa composition biochimique. Son principe est très proche de celui du **CBM***.

L'indice de stabilité ISB est calculé à partir du résultat d'une incubation de longue durée (6 mois) conduite en conditions contrôlées sur le produit organique mélangé à de la terre et sur un échantillon de terre témoin sans produit organique.

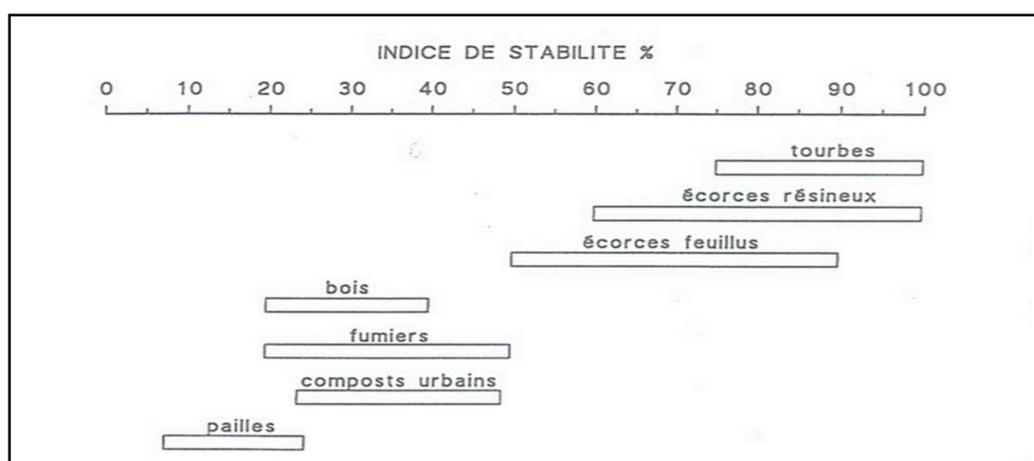
La composition du produit (teneurs en sucres solubles, hémicelluloses, cellulose et lignine) est par ailleurs déterminée par les méthodes de fractionnement biochimique (méthodes de Wende et de van Soest et Wine).

Des relations statistiques sont ajustées sur la base des résultats de nombreuses analyses. Elles sont du type :

$$\text{ISB} = a - b.\text{Sucres solubles} - c.\text{Hémicelluloses} - d.\text{Cellulose} + e.\text{Lignine}$$

Elles permettent de calculer l'ISB de produits organiques à partir de leur composition biochimique.

Figure 10 : Classement de quelques résidus de cultures et amendements organiques (67 échantillons) en fonction de leur indice de stabilité biologique déterminé par analyse biochimique



Source : Linères et Djakovitch, 1993

MASSE VOLUMIQUE

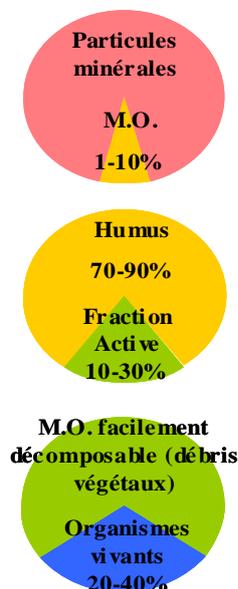
Ce paramètre correspond à la masse sèche ramenée au volume d'un échantillon de terre humide, prélevé sans perturbation (sans modification de sa structure).

Il est notamment utile pour calculer un stock d'éléments présents dans un sol à partir des résultats d'une analyse qui donne la concentration de la terre en cet élément. (voir **Teneurs et Stocks***). Elle permet aussi de caractériser l'évolution de la structure d'un sol cultivé sous l'effet des pratiques de travail du sol et des tassements liés aux chantiers d'installation, d'entretien et de récolte des cultures.

MATIERES ORGANIQUES

Ce terme regroupe l'ensemble des constituants organiques morts ou vivants d'origine animale, végétale ou microbienne, transformés ou non, présents dans les sols. La partie « **humus** »* représente 80 à 90% du total.

Figure 11 :
Place et composition des
matières organiques du sol



Source : cité par Chenu et Balabane, 2001

Tableau 7 : Quantification des principales fractions des matières organiques du sol.

Type de matière organique	Quantité (tonnes de carbone par hectare)
Résidus organiques frais, « libres »	0 à 4
Résidus organiques évolués (MOP)	2 à 4
Macrofaune	0,5
Biomasse microbienne	1 à 2
« Humus »	35
TOTAL	40

Source : B. MARY, INRA Laon-Reims-Mons

MATIERE ORGANIQUE

Utilisé au singulier, ce terme fait couramment référence à la seule fraction humifiée des matières organiques, aussi appelée **humus***.

MINERALISATION

Ce terme recouvre un ensemble de processus au cours desquels les matières organiques sont transformées en matières minérales par action des microorganismes du sol. Ce phénomène concourt en particulier à la **fourniture d'azote*** minéral mobilisable par les cultures. (Voir aussi **coefficient de minéralisation k_2^***).

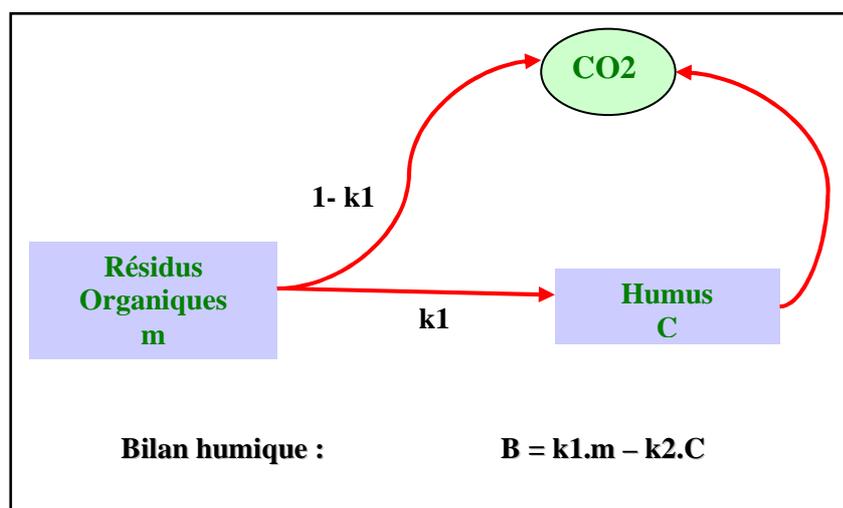
MODELE HENIN-DUPUIS

C'est un modèle simple de calcul du **bilan humique*** des sols cultivés.

Dans son principe (Figure 12), le modèle prend en compte la quantité de biomasse (m) des matières organiques (amendements ou résidus de cultures) apportées au sol et le rendement de transformation du carbone de cette biomasse en carbone humifié (**k_1 , coefficient isohumique***). L'humus « entrant » ainsi alimente le stock de carbone organique du sol (C). La part de carbone de la biomasse apportée qui n'est pas humifiée est minéralisée (transformation en CO_2). Simultanément, le stock de carbone organique du sol est diminué chaque année par la minéralisation de l'humus : la quantité de carbone minéralisé est proportionnelle au stock du sol ($= C \cdot k_2$, avec **k_2 : coefficient de minéralisation annuelle de l'humus***).

Une particularité de ce modèle est que le stock d'humus du sol est considéré comme un compartiment unique. Il est actuellement remis en question pour ses mauvaises prédictions à long terme des stocks de carbone du sol : il en surestime les baisses dans les situations à faibles quantités d'apports et les hausses dans les situations à fortes restitutions organiques.

Figure 12 :
Schéma du
modèle Hénin-
Dupuis



Source : Hénin et Dupuis, 1945

MODELE « AMG »

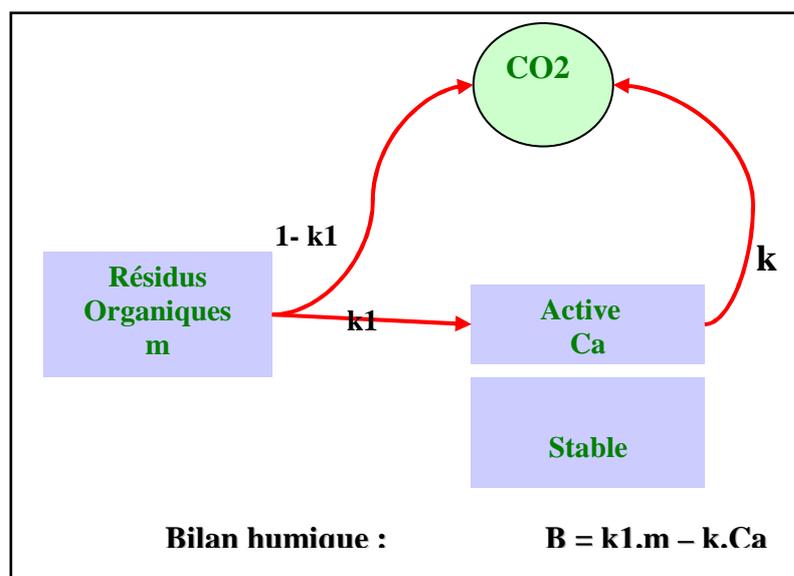
AMG = pour les initiales des noms de ses auteurs A. Andriulo, B. Mary, J. Guérif.

C'est un modèle de calcul du **bilan humique*** des sols cultivés dérivé du modèle **Hénin-Dupuis***.

Comparé à ce dernier où l'humus est considéré comme un tout, le modèle AMG distingue deux fractions de l'humus (Figure 13) : la fraction « stable » qui se comporte comme une constante dans le modèle (elle est supposée avoir un taux de renouvellement de l'ordre de 1000 ans) et la fraction « active » qui est seule affectée par les flux d'entrée et de sortie (son temps de renouvellement est de l'ordre de 25 ans). La nature exacte de cette fraction reste encore à définir.

Le **coefficient de minéralisation annuelle*** du stock de carbone « actif » du sol est ici noté **k**

Figure 13 :
Schéma du
modèle
AMG



Source : B. Mary, INRA Laon-Reims -Mons

NON-LABOUR (voir article **Techniques sans labour***)

PRIX DE L'HUMUS (voir article **Valeur de l'humus***)

PROFONDEUR DE LABOUR (PROFONDEUR DE TRAVAIL DU SOL)

La profondeur de labour a un effet déterminant sur la teneur en carbone organique de la couche de sol concernée par l'analyse de terre.

Par exemple : une terre labourée à 25 cm et dont la teneur en carbone organique serait de 10 g/kg (environ 2% de MO) verrait cette teneur baisser brutalement à 7 g/kg (1,4 % de MO) si une année donnée le labour était effectué à 35 cm de profondeur. En fait, le labour profond opère dans ce cas une « dilution » de la matière organique dans la couche labourée (la MO présente dans la masse de terre présente sur 25 cm est brusquement diluée dans la masse de terre plus importante), d'où une baisse brutale de la teneur.

A l'opposé, une remontée de la profondeur de labour⁵ et son maintien en tant que profondeur maximale de travail du sol, sans autre changement du système de culture, entraînera une augmentation certaine mais lente de la teneur en carbone organique sur la couche travaillée : dans ce cas, le phénomène s'explique par l'accumulation progressive d'humus issu des apports organiques (résidus et amendements) dans une masse de terre plus faible que dans le système de travail du sol d'origine et par une minéralisation moins intense de l'humus. Le retour à un labour plus profond réduira en une seule intervention les gains de teneurs en matière organique réalisés après de nombreuses années.

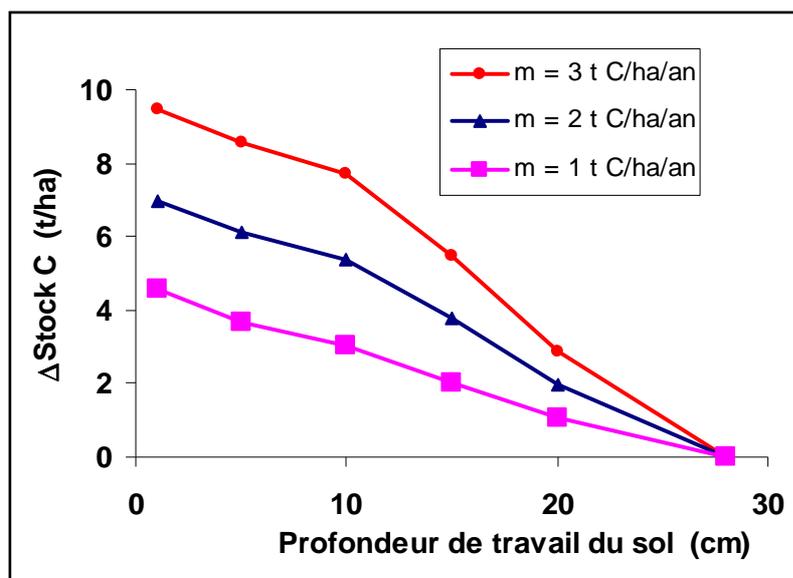
La profondeur de labour influe aussi sur le stock de carbone organique du sol. Dans le cas d'un approfondissement durable du labour (ex. : passage de 25 à 35 cm), le stock de C organique présent dans les 25 premiers centimètres du sol est d'abord simplement réparti dans la masse de terre des 35 premiers centimètres : mesuré sur 0-35 cm il est alors équivalent à celui qui pouvait être mesuré sur la couche 0-25 cm avant l'approfondissement. Au fil des années, le stock sur 0-35 cm aura cependant tendance à diminuer, la minéralisation de l'humus étant plus intense qu'elle ne l'était initialement avec un labour moins profond. L'effet opposé est prévisible en cas de réduction de la profondeur de labour (figure 14).

(Voir aussi **Techniques sans labour*** et **Teneurs et Stocks***)

⁵ **Attention** : On a constaté en Picardie que les remontées progressives de labour (de 40 cm à environ 28-30 cm de profondeur) ont souvent entraîné la formation d'un horizon compact continu parfois appelé « semelle de labour », en particulier dans les sols à dominante limoneuse.

Figure 14 :

Simulation de la variation du stock de carbone par hectare sur 100 ans en fonction de la profondeur de travail du sol, pour trois niveaux d'apports de C organique par les résidus de cultures (pailles).



Source : Travaux de B. Mary, INRA de Laon, d'après les résultats de l'essai de longue durée de Boigneville (voir dans Wylleman et al., 1999).

Le labour à une profondeur de 28 cm est pris comme référence. (Stock de C organique initial = 40 t/ha)

RESTITUTIONS HUMIQUES

On parle de « restitutions humiques » ou parfois de « restitutions organiques ». Ces termes désignent les matières organiques fraîches produites sur une parcelle, non récoltées et donc laissées sur le sol ou incorporées au sol de cette parcelle, où elles se dégradent et fournissent de l'humus (**humification***) et des éléments minéraux (minéralisation « primaire », intervenant au cours de la biodégradation).

En fait, la matière organique qui constitue les résidus de cultures provient en grande partie du carbone du CO₂ de l'air (processus de la photosynthèse). Par conséquent, ce carbone organique n'est pas à proprement parler « restitué » mais « apporté » au sol et il faudrait parler d'« apports organiques par les résidus de cultures ».

On distingue souvent, pour chaque type de culture, des « restitutions obligatoires » et des « restitutions facultatives ».

Tableau 8 : Exemples de restitutions obligatoires ou facultatives pour différents types de cultures :

Culture	Restitutions obligatoires	Restitutions facultatives
Blé	Racines + chaumes	pailles
Betterave	Partie du système racinaire non récoltée	Collets + feuilles
Culture intermédiaire piège à nitrates (CIPAN)	Toute la plante	/

Le calcul des apports de C organique par les résidus de cultures se fait de la manière suivante :

$$\text{Carbone de l'humus formé (t C/ha)} \\ = (\text{MBa} \times \text{MSa} / 100 \times \text{Ca} / 100 \times \text{k1a}) + (\text{MBr} \times \text{MSr} / 100 \times \text{Cr} / 100 \times \text{k1r})$$

avec :

MBa = matière brute des parties aériennes non récoltées des plantes (t/ha)

MBr = matière brute des parties racinaires non récoltées des plantes (t/ha)

Msa, MSr = teneurs en matière sèche des résidus, respectivement, aériens et racinaires (% de la MB)

Ca, Cr = teneurs en carbone des résidus, respectivement aériens et racinaires (% de la MS)

k1a, k1r = **coefficients isohumiques***, respectivement, parties aériennes et parties racinaires

NB : Cette quantité correspond à la part prise par les résidus de culture dans le terme « k1.m » intervenant en entrée du bilan humique (voir **Modèle Hénin&Dupuis*** et **Modèle AMG***)

STABILITE STRUCTURALE (INDICE)

La stabilité de la structure est l'aptitude du sol à résister à l'action désagrégante de l'eau lors des pluies.

Des tests de laboratoire ont été mis au point pour mesurer la stabilité structurale des sols. Réalisés en laboratoire en conditions standards, ils permettent de comparer des sols différents.

Le test proposé par Y. Le Bissonnais (INRA Orléans) prend en compte trois régimes d'humectation des agrégats de sol, mimant les situations suivantes :

1. pluie intense sur sol sec,
2. pluie sur sol humide,
3. pluie faible sur sol sec ou peu humide.

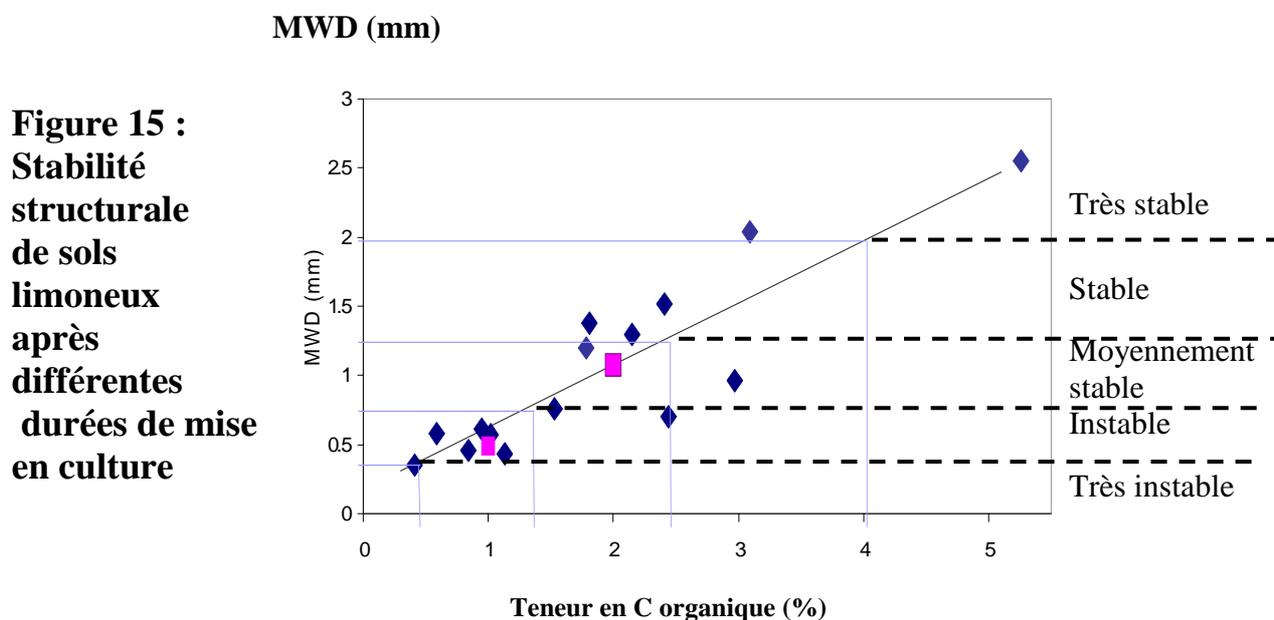
Chacun de ces traitements fournit un indice de stabilité. La moyenne des trois indices permet de classer les sols testés selon leur stabilité structurale (Tableau 9).

Les relations entre les résultats de ces tests et le comportement du sol au champ, vis à vis des risques de **battance***, de ruissellement ou d'**érosion*** sont cependant plus complexes et restent difficiles à établir de façon opérationnelle.

Tableau 9 : Proposition de seuils d'interprétation du test de stabilité structurale (type INRA Orléans)

Indice (= diamètre moyen des agrégats de sol après application du test)	Stabilité	Battance/érosion
< 0.4 mm	Très instable	Systematique
0.4 à 0.8 mm	Instable	Très fréquente
0.8 à 1.3 mm	Moyennement stable	Fréquente
1.3 à 2.0 mm	Stable	Occasionnelle
> 2.0 mm	Très stable	Très rare

La teneur en matière organique est, avec la teneur en argile, un facteur déterminant qui conditionne la valeur d'indice de stabilité structurale (Figure 15).



Source : d'après Le Bissonnais et al, 2003

TENEURS ET STOCKS

Attention, la confusion est fréquente entre ces deux termes bien qu'ils expriment des notions différentes :

- une teneur est une concentration (on la relie aux propriétés du sol : indicateur de qualité)
- un stock correspond à une masse (indicateur de quantité)

Le laboratoire mesure une teneur (Voir **Analyse (teneur en matière organique)***). Le stock est calculé ensuite à partir de cette teneur et d'autres paramètres. Ainsi, on peut estimer des stocks équivalents en matière organique pour deux sols dont les teneurs sont très différentes : il suffit pour cela que les profondeurs de labour soient sensiblement différentes. Le prélèvement de terre et par suite le calcul se font en effet classiquement sur la masse de terre labourée.

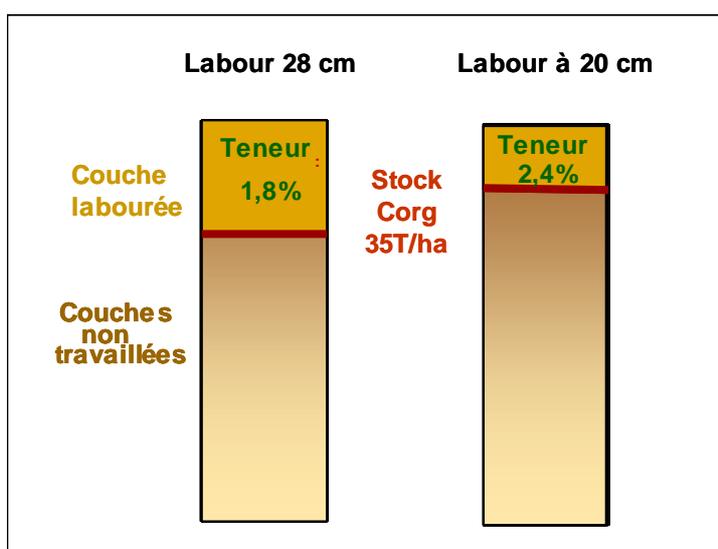
$$\text{Stock de C organique (t/ha)} = \text{Masse de terre fine (t/ha)} \times \text{Teneur en C org (g/kg)}$$

$$\text{Masse de terre fine (t/ha)} = 100 \times \text{Epaisseur de la couche labourée (cm)} \\ \times \text{masse volumique de la couche labourée (g/cm}^3\text{)}$$

Exemple :

Un stock de 35 tonnes de carbone organique à l'hectare, pour une **masse volumique*** de la couche labourée de 1,4 peut correspondre à une teneur en C organique de 9 g/kg (soit une **teneur en MO*** d'environ 1,8%) si profondeurs de labour et de prélèvement sont de 28 cm, ou à une teneur de 12,5 g/kg (soit une **teneur en MO*** d'environ 2,4 %) si ces profondeurs sont de 20 cm (Figure 16).

Figure 16 :
Exemple de
correspondance
entre teneurs et
stocks de C organique
dans un sol cultivé



Source : Agro-Transfert Ressources et Territoires

Au travers de l'exemple précédent, on comprend qu'il devienne difficile de réaliser un suivi fiable de l'évolution des stocks de MO de sols travaillés à des profondeurs variables au cours des années. De fait, la tendance à une remontée des labours, à une baisse de leur fréquence, voire à leur suppression dans certains systèmes rend discutables les conseils classiquement donnés quant à la profondeur de réalisation des prélèvements de terre (= **profondeur de labour** ou du travail du sol le plus profond).

Une nouvelle méthode est à instaurer, préconisant un prélèvement à une profondeur fixe au cours du temps, voire standardisée (à 30 cm par exemple), quel que soit le système de travail du sol adopté. Il s'agit en fait de se donner les moyens de faire porter les analyses successives réalisées sur une parcelle donnée, sur des masses de terre identiques d'une mesure à la suivante.

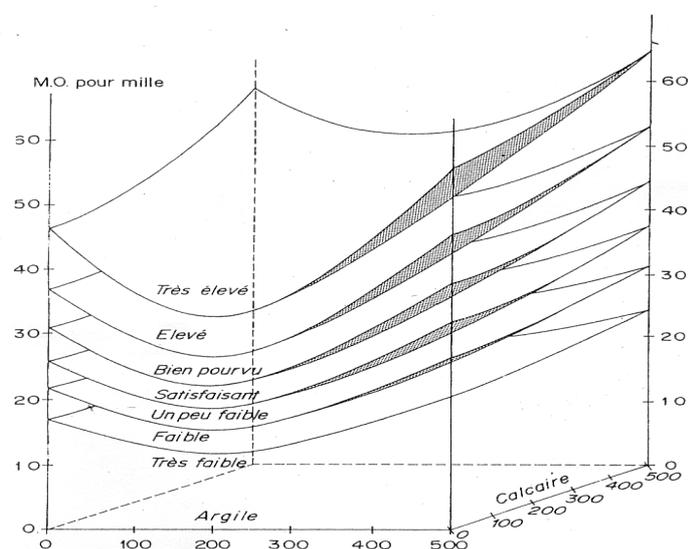
Cette disposition, pour être efficiente, devra s'accompagner d'autres précautions : la réalisation des prélèvements élémentaires utiles aux analyses successives toujours dans la même zone précisément repérée et à la même période de la succession culturale (au mieux entre la récolte d'une céréale à paille et le déchaumage).

Source : B. Mary, INRA Laon et Projet GCEOS, Agro-Transfert R&T

TENEUR SOUHAITABLE

On peut chercher à définir une teneur en matière organique "souhaitable", c'est-à-dire permettant d'obtenir des propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol acceptables. Rémy et Marin-Laflèche (1974) ont proposé un abaque permettant de qualifier l'état organique d'un sol cultivé suivant sa teneur en matière organique et ses teneurs en argile et en calcaire (figure 17). L'appréciation fournie par cet abaque est établie à dire d'experts. Très global, il n'a pas été rattaché à des effets précisément mesurés des **matières organiques*** sur le comportement et les propriétés du sol. De ce fait, son utilisation est fortement remise en question actuellement.

Figure 17 :
Appréciation de l'état organique du sol en fonction de sa teneur en argile et en calcaire d'après l'abaque de Rémy et Marin-Laflèche



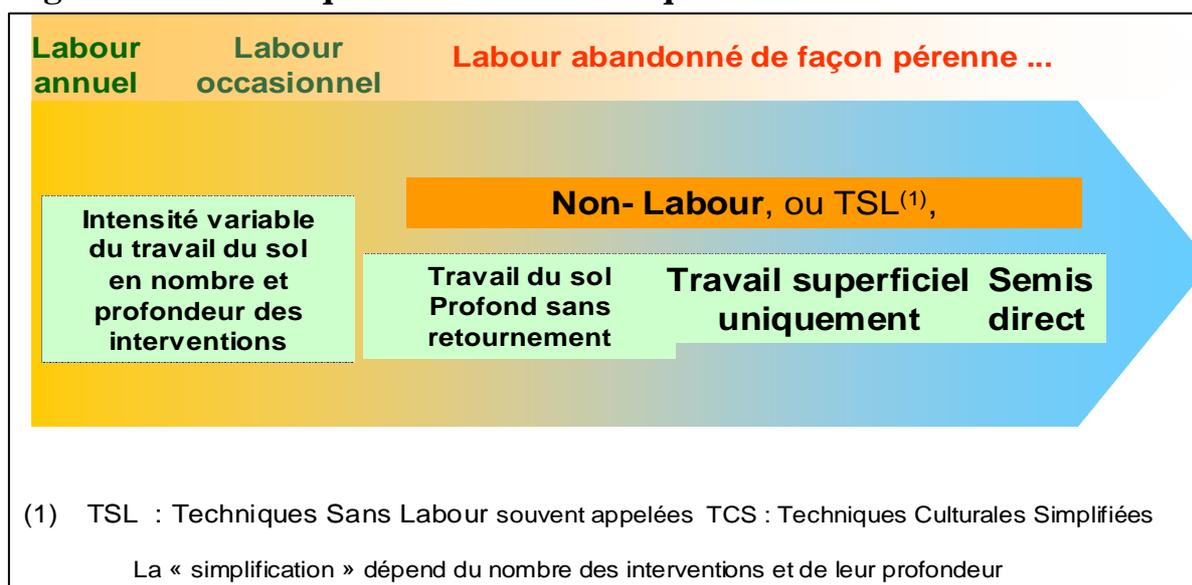
Source : Rémy et Marin-Laflèche, 1974

Plus récemment, une étude britannique s'est attachée à établir des relations entre le taux de **matière organique*** ou de carbone organique des sols et les rendements des cultures ou les comportements de sols cultivés, sur divers exemples pris en régions tempérées (Loveland et Webb, 2003). Elle conclue qu'il reste très difficile de parler de seuils de teneurs satisfaisantes, même si l'on s'intéresse à une catégorie de sols donnée et à un type de propriété défini de ces sols. Une attitude à privilégier serait plutôt de suivre certains indices, tels que l'évolution de la part « active » du carbone du sol (voir **Modèle AMG*** et **Biomasse microbienne***), qui se révèlent des indicateurs intéressants de la qualité des sols.

TECHNIQUES SANS LABOUR (TSL)

Les techniques sans labour recouvrent différentes pratiques

Figure 18 : Techniques sans labour : ce que recouvrent ces termes.



Source : Chambre d'agriculture de l'Oise, 2002

Dans le cas de TSL sans travail profond, on constate généralement deux effets quant au statut organique du sol :

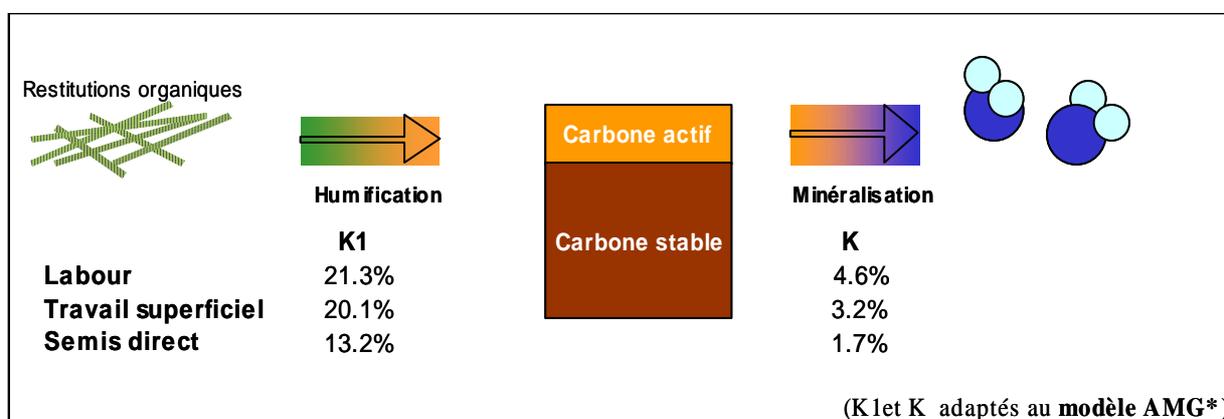
1. Un effet 'teneur' : la teneur dans la couche superficielle du sol augmente, alors que la teneur des couches sous-jacentes diminue progressivement. L'augmentation de la teneur de surface, alliée à la présence de résidus végétaux en surface, permet de retarder le processus de battance dans les sols sensibles.
2. Un effet « stock » : la concentration des matières organiques fraîches et humifiées dans la couche de surface du sol modifie la dynamique des processus de minéralisation et d'humification. L'effet principal est un ralentissement du taux de minéralisation (k_2 diminué de plus de 60% par rapport au labour). L'effet résultant est un accroissement du stock de MO en non labour ("séquestration" du carbone).

Le stockage additionnel de carbone lié au semis direct (aucun travail du sol) par rapport au labour a été estimé à 200 kg C/ha/an par Arrouays et al (2002 a) et à 100 kg C/ha/an sur le dispositif de Boigneville en 30 ans (Mary et Wylleman, 2002).

(voir aussi **Profondeur de labour***)

Notons que cet aspect positif des techniques sans labour sur le stockage de carbone dans les sols est bien celui qui est visé lorsqu'on parle de « puits de carbone » pour limiter la production de **gaz à effet de serre***. Malheureusement il semble que les TSL entraînent par ailleurs une augmentation notable des émissions de N₂O, gaz dont l'effet de serre très puissant réduirait à néant l'intérêt de l'effet « puits de carbone ».

Figure 19 : Impact du travail du sol sur les taux d'humification et de minéralisation des matières organiques (modèle AMG) sur l'essai "travail du sol" de Boigneville.



Source : d'après Wylleman, 1999

VALEUR DE L'HUMUS

L'importance économique de la **matière organique*** est difficile à quantifier. Elle est très dépendante du contexte pédologique de l'exploitation ainsi que de son système de production et des choix techniques de l'agriculteur.

La tonne d'**humus*** a une importance économique plus grande pour un agriculteur biologique que pour un agriculteur conventionnel. Chez le premier, un défaut de fourniture d'azote par minéralisation de l'humus du sol l'oblige à se fournir en engrais azotés organiques à des prix très élevés.

Cependant une approche pragmatique consiste à estimer la valeur de la tonne d'humus à partir du prix de marché de la paille.

$$\text{Valeur de l'humus} = \frac{\text{Valeur de la paille en andain} - \text{valeur éq. engrais de NPKMg de la paille}}{\text{Rendement en humus de la paille fraîche}}$$

Rendement en humus de la paille

$$= 1T \text{ paille fraîche} * \text{Teneur MS}_{\text{paille}} * \text{Teneur en C Org}_{\text{paille}} * 2 * \text{coefficient isohumique } k1_{\text{paille}}$$

Exemple de calcul :

$$\text{Rendement en humus de la paille} = 0,85 * 0,45 * 0,213 * 2 = 0,163$$

$$1 \text{ t d'humus} = \frac{[17 \text{ €} - (0\text{€}_N + 1,058 \text{ €}_{P2O5} + 4,08 \text{ €}_{K2O} + 0,65\text{€}_{MgO})]}{0,163}$$

$$1 \text{ t d'humus} = 68,8 \text{ €}$$

NB : Cette valeur reste indicative : elle ne constitue pas une référence officielle mais un repère pour un agriculteur qui s'interroge dans le cadre d'un **échange paille-fumier***.

Hypothèses de calcul :

Teneur en MS paille fraîche : 85% ; Teneur en Corg de la MS : 450 g/kg

$k1_{\text{paille}} = 0,213$ valeur utilisée pour le modèle AMG (Wylleman, 1999)

Coefficient 2 : pour passer de Corg à humus

Prix de la paille en andains estimé en Picardie (février 2007) = 17 €/T

Unité de P : 0,46 € ; Unité de K : 0,34 € ; Unité de Mg : 0,65 €

(prix distributeurs constatés sur campagne 2006-2007)

Composition de la paille : P₂O₅ : 2,3 ; K₂O : 12 ; MgO : 1 en kg/T

Coefficients d'équivalence engrais pour la paille : N = 0 ; P, K, Mg = 1

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Andriulo A., B. Mary et J. Guéris. 1999. Modelling soil carbon dynamics with various cropping sequences on the rolling pampas. *Agronomie*. 19. 365-377.

Arrouays D., J. Balesdent, JC Germon, PA Jayet, JF Soussana, P. Stengel 2002 a. *Contribution à la lutte contre l'effet de serre. Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ?*. Rapport d'expertise INRA. Octobre 2002. 332 p.

Arrouays D., J. Balesdent, JC Germon, PA Jayet, JF Soussana, P. Stengel 2002 b. *Contribution à la lutte contre l'effet de serre. Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ?*. Synthèse du rapport d'expertise INRA. Octobre 2002. 32p.

Baize D., 1988. Guide des analyses courantes en pédologie. Ed. INRA. Paris. 172 p

Boiffin J., 1984. La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies. Thèse de docteur-ingénieur. INA-PG, 320 p.

Boiffin J., J. Kéli Zagbahi et M. Sébillotte, 1986. Systèmes de culture et statut organique des sols dans le Noyonnais : application du modèle de Hénin-Dupuis. *Agronomie* 6 (5) – 437-446.

Chambres d'Agriculture de Picardie, 2001. *Guide d'Utilisation des effluents organiques en agriculture- La situation en Picardie-* Chambres d'Agriculture de Picardie, Conseil régional de Picardie, ADEME

Chambres d'Agriculture de Picardie, 2004 « *Vers une meilleure utilisation des composts* », plaquette. Chambres d'Agriculture de Picardie, Conseil régional de Picardie, ANDA, ADEME

Chaussod R et R. Nouaïm, 2001. Caractérisation biologique d'échantillons de sol et applications agronomiques. *Alter Agri*, n°45 – 16-21

Chenu C. et M. Balabane, 2001. Matières organiques et activités biologiques des sols cultivés. Une approche des matières organiques par leurs fonctions. In *Perspectives Agricoles*, n°272, p 42-45.

Gobat JM, M. Ragno et W. Matthey. 1998. *Le sol vivant. Bases de pédologie, Biologie des sols.* Coll Gérer l'environnement. Presses polytechniques et universitaires romandes- Lausanne. 522 p.

Guérif, J. et G. Monnier, 1982. Evolution de la fertilité physique des sols dans les systèmes de cultures fourragères de l'ouest de la France. Compte-rendu du forum des Fourrages de l'Ouest. Rennes, 23-24 novembre 1982 Ed. ITCF, Paris. 113-129

Hénin S. et M. Dupuis. 1945. Essai de bilan de la matière organique du sol. Annales Agronomiques. 19-29

ITAB, 2001. *Guide des matières organiques.* Tomes 1 et 2. Deuxième édition. 240p+annexes

Institut de l'Élevage, ITAVI, ITCF, ITP. 2001. Fertiliser avec les engrais de ferme. 104 pages.

Le Bissonnais Y, O. Duval et C. Chenu. 2003. Comment mesurer la stabilité structurale des agrégats du sol pour évaluer sa sensibilité à la battance et à l'érosion ? In *Les fertilités du sol et les systèmes de culture.* Sixièmes rencontres de la fertilisation raisonnée (COMIFER) et de l'analyse de terre (GEMAS). 18-19 novembre 2003 Blois- France. 9-106.

Le Bissonnais Y. et C. Le Souder, 1995. Mesurer la stabilité structurale des sols pour évaluer leur sensibilité à la battance et à l'érosion. *Etude et gestion des sols*, 2(1). 43-56.

Linères M et JL Djakovitch, 1993. Caractérisation de la stabilité biologique des apports organiques par l'analyse biochimique. In *Matières organiques et Agricultures*, Quatrièmes journées de l'analyse de terre (GEMAS) ; Cinquième forum de la fertilisation raisonnée (COMIFER) 16-18 novembre 1993, Blois-France. 159-168.

Loiseau P., R. Chaussod et R. Delpy. 1994. Soil microbial biomass and in situ nitrogen mineralization after 20 years of different nitrogen fertilization and forage cropping système. *European Journal of Agronomy*, 3 (4), 327-332.

Loveland, P. et J. Webb, 2003. Is there a critical level of organic matter in the agricultural soils of temperate regions : a review. *Soil and tillage research* 70. 1-18.

Machet JM, P. Dubrulle et P. Louis. 1990. Azobil : a computer program for fertilizer N recommendations based on a predictive balance sheet method. First congress of European Society of agronomy, Paris. S2-21.

Mary B. et J. Guérif, 1994. Intérêts et limites des modèles de prévision de l'évolution des matières organiques et de l'azote dans le sol. *Cahiers Agricultures*, 3. 247-257

Mary B., N. Beaudoin, E. Justes et JM Machet, 1999. Calculation of nitrogen mineralization and leaching in fallow using a simple dynamic model. *European Journal of Soil Science*.

Monnier G., 1993. Matières organiques et agricultures. Historique et situation actuelle. In *Matières organiques et Agricultures*, Quatrièmes journées de l'analyse de terre (GEMAS) ; Cinquième forum de la fertilisation raisonnée (COMIFER) 16-18 novembre 1993, Blois-France. Article introductif, Tiré-à-part.

Monnier G. et P. Stengel, 1982. La composition granulométrique des sols : un moyen de prévoir leur fertilité physique. *BTI*, 370-372- 503-512.

Powlson DS, PC Brookes, BT Christensen, 1987. Measurement of soil microbial biomass provides an early indication of changes in total organic matter due to straw incorporation. *Soil biology and biochemistry*, 19, 159-164.

Rémy JC et A. Marin-Laflèche, 1974. L'analyse de terre : réalisation d'un programme d'interprétation automatique. *Annales Agronomiques*, 25(4), 607-632.

Rémy JC et A. Marin-Laflèche, 1976. L'entretien organique des terres. Coût d'une politique de l'Humus. *Entreprises agricoles*. N°84. 3-7.

Robin D., 1997. Intérêt de la caractérisation biochimique pour l'évaluation de la proportion de matière organique stable après décomposition dans le sol et la classification des produits organominéraux. *Agronomie*, 17, 157-271.

Soltner D. 2000. Les bases de la production végétale. Tome I : le sol. Ed. Sciences et techniques agricoles. 22^e édition. 472 p.

Tessier D., F. Bigorre, A. Bruand, 1999. La capacité d'échange : outil de prévision des propriétés physiques des sols. *CR Acad. Agric. Fr.* 80(2).37-50.

Wylleman, R., 1999. *Caractérisation et modélisation de l'évolution des stocks de matière organique des sols de grande culture en Picardie*. Rapport de fin d'étude. INRA Laon, 87 pp + annexes.

Wylleman, R., Mary B., Machet J.M., J. Guérif et Degrendel M., 2001. Evolution des stocks de matière organique dans les sols de grande culture : analyse et modélisation. *Perspectives Agricoles*, n°270, juillet-août 2001 : 8-14.

Index

Termes cités dans les articles faisant l'objet de renvois ou non

pages

Amendements basiques	15
Amendements organiques	12, 14, 17, 19, 27, 30, 32
Analyse de terre	5 , 10, 15, 16, 28, 32, 37
Argile	7, 10, 16, 20, 35, 39
Azote minéral	13, 14, 18, 20, 25 , 42
Azote organique	25
Bilan humique	12 , 30, 31
Biomasse microbienne	13 , 29
Boue	14, 19
Calcaire, CaCO ₃	15, 20, 25, 39
Carbonates (CaCO ₃ , MgCO ₃)	5, 15
Cations	16
CBM (Caractérisation biochimique)	17 , 27
CEC (Capacité d'Echange Cationique)	13, 16
Cellulose	14, 18 , 17, 27
CH ₄ (méthane)	22
CO ₂ (gaz carbonique)	22, 30, 34
Coefficients :	
- d'équivalence engrais	21, 42
- isohumique	19 , 21, 30, 31, 34, 42
- de minéralisation	20 , 25, 30, 31
- multiplicateur	5, 25
Composition biochimique	17, 27
Compost	14, 21
Décomposition	14, 24
Densité apparente	20 , 28
Effet de la pluie	10, 24, 35
Eléments minéraux	17, 20, 21, 30, 34, 42
Engrais	17, 42
Engrais verts, cultures intermédiaires	12, 19, 22, 24
Evolution	8, 12, 14, 19, 28, 37, 39
Fraction active du carbone du sol	13, 29, 31, 35
Fraction stable du carbone du sol	31
Fractionnement biochimique	17, 27
Fournitures d'azote	25 , 30, 42
Fumigation-extraction	13
Gonflement-retrait	7
Granulométrie	10
Hémicellulose	16 , 17, 27
Humification	12, 14, 18, 21, 26, 29, 34, 40, 42
Humus	12, 19, 20, 21, 24, 25, 26 , 29, 30, 31, 32, 34, 42
Incubation	14, 17, 27
Indice	10, 27, 35, 39

Indicateur	13, 14, 16, 17, 37
Lignine	14, 18, 17, 27
Masse volumique	20, 28
Matières organiques	5, 7, 8, 10, 14, 16, 17, 19, 22, 24, 26, 29 , 32, 34, 35, 37, 39, 42
- fraîches	24, 26, 30, 34, 40
- libres, liées	29
Méthodes :	
- Anne	5
- Dumas	5, 15
- van Soest & Wine	17, 27
Microorganismes	13, 18, 30
Minéralisation	12, 14, 19, 20, 25, 30 , 31, 32, 34, 40, 42
Modèle	12, 19, 20, 30 , 31 , 41
N ₂ O (protoxyde d'azote)	22, 41
Organisation	14
Organismes vivants	29
Paille	21, 32, 34, 42
pH	10, 13, 15, 18
Phénols	14, 18
Prélèvement de terre	37, 38
Profondeur de travail du sol, de labour	32 , 37, 40, 41
Propriétés du sol	7, 14, 37, 39
Puits de carbone	8, 41
Reliquats d'azote minéral	25
Rendement en humus	21, 26, 30, 31, 42
Résidus de cultures	10, 12, 18, 27, 30, 33, 34, 40
Retournement (labour)	40
Retournement de prairie	8
Retrait	7
Semis direct	22, 40
Seuil	35, 39
Stabilité des matières organiques	27
Stock de carbone organique du sol	8, 9, 12, 19, 25, 28, 30, 31, 32, 33, 37 , 38, 40
Stockage de carbone dans les sols	8, 22, 23, 41
Structure du sol	7, 10, 28, 35
Sucres solubles	17, 18, 27
Système de culture	12, 13, 30, 31, 32
Température	20
Teneur en carbone organique, taux	5 , 6, 7, 8, 11, 13, 15, 17, 19, 20, 24, 25, 27, 30, 32, 34, 36, 37 , 39, 40, 42
Texture	7, 10, 13
Travail du sol	7, 10, 11, 28, 32, 33, 37, 40, 41
Triangle des textures	7, 11
Type de sol	20
Valeur économique	21, 42

Réalisation et coordination



Partenaires Scientifiques et Techniques



Soutiens financiers



CASDAR