

Les matières organiques des sols

Rôles agronomiques
et environnementaux

Raoul Calvet ■ Claire Chenu ■ Sabine Houot

2^e édition

Les matières organiques des sols

2^e édition

Raoul Calvet
Claire Chenu et Sabine Houot

Sommaire

Introduction: Les matières organiques, constituants majeurs des sols	VII
Références bibliographiques	XV
1 Nature, propriétés et abondance des matières organiques des sols	1
Constitution des sols	2
Méthodes de caractérisation des matières organiques des sols	9
Caractéristiques des matières organiques des sols	23
Le stock de carbone organique des sols	37
Notes complémentaires	52
Références bibliographiques	67
2 Biotransformations des matières organiques dans les sols	76
Nature et déterminisme des biotransformations des matières organiques	77
Facteurs liés aux matières organiques et influençant leurs biotransformations	82
Influence des facteurs du milieu sur les biotransformations	96
Modélisation mathématique des biotransformations des matières organiques des sols ..	120
Notes complémentaires	129
Références bibliographiques	143
3 Matières organiques des sols, agronomie et environnement	150
Rôles des matières organiques des sols	150
Matières organiques des sols et gaz à effet de serre	154
Matières organiques et qualité physique des sols	164
Matières organiques et qualité chimique des sols	183
Matières organiques et qualité biologique des sols	191
Matières organiques des sols et qualité des eaux	194
Notes complémentaires	206
Références bibliographiques	240
4 Usages des terres et matières organiques des sols	250
État organique des sols	250
Matières organiques des sols et couverts végétaux	256
Matières organiques et travail du sol	263
Les apports de matières organiques	277

Modélisation mathématique de la dynamique des matières organiques:	
modèles globaux	294
Notes complémentaires	313
Références bibliographiques	329
Liste des figures et tableaux	338
Index	347

Nature, propriétés et abondance des matières organiques des sols

Les sols sont des milieux poreux contenant une phase solide, une phase liquide (la solution du sol) et une phase gazeuse (l'atmosphère du sol). Les proportions et la composition de ces deux phases dépendent de la formation des sols (pédogenèse), des conditions climatiques et des modalités de leur utilisation. La phase solide est principalement constituée par divers minéraux, dont les plus abondants sont les minéraux argileux, les oxydes et hydroxydes métalliques (aluminium et fer) et les carbonates. La phase solide contient aussi des matières organiques représentant généralement 1 à 5 % de la masse des sols. Malgré cette petite proportion, elles déterminent en grande partie leurs qualités. On distingue les matières organiques mortes (diverses molécules, fragments de tissus végétaux) et les matières organiques vivantes (faune, racines vivantes et micro-organismes). Des méthodes physiques, chimiques et physicochimiques sont utilisées pour les séparer, les trier et les caractériser. La totalité des sols représente le plus grand stock de carbone organique dans la biosphère continentale. Toutefois, les stocks de carbone organique sont très différents selon le type pédologique, le climat, la nature du couvert végétal et les usages des sols.

Le carbone organique se trouve dans les sols sous diverses formes, dont l'ensemble constitue ce que l'on appelle les matières organiques des sols. Elles ont été un objet d'intérêt agronomique et pédologique depuis longtemps, au moins depuis l'époque romaine (Boulaine, 1989; Stevenson, 1994; Feller, 1997; Baldock et Nelson, 2000; Jabiol et coll., 2005). Comme le montrent les publications scientifiques de ces dernières années, elles ont fait l'objet de nombreux travaux de recherche et en suscitent encore aujourd'hui. Ces travaux ont conduit à une connaissance approfondie de leur constitution, de leurs propriétés et de leurs transformations. Tout n'est pas connu cependant, et plusieurs interrogations persistent encore comme nous le verrons dans les prochains paragraphes. Toutefois, avant de décrire les matières organiques et d'analyser leurs relations avec les problématiques agronomiques et environnementales, il est utile de donner quelques informations sur la constitution des sols.

matières organiques mortes, les organismes vivants du sol jouent un rôle considérable, particulièrement dans les biotransformations des composés organiques. Leurs interventions dans la dynamique des éléments chimiques et dans la formation de la structure du sol sont résumées dans le tableau 1.4.

Tableau 1.4: Principales interventions des organismes vivants dans la dynamique des éléments nutritifs et dans la formation de la structure des sols

	Dynamique des éléments nutritifs	Formation de la structure des sols
Bactéries, champignons	<ul style="list-style-type: none"> • Biodégradation des matières organiques • Minéralisation des formes organiques de C, N, P et S • Immobilisation des formes inorganiques de C, N, P et S par les synthèses microbiennes 	<ul style="list-style-type: none"> • Production de composés organiques liants (polysaccharides) • Production d'hyphes par les champignons; ils agrègent les particules de sol
Microfaune	<ul style="list-style-type: none"> • Régulation des populations bactériennes et fongiques • Intervention dans le recyclage des éléments nutritifs 	<ul style="list-style-type: none"> • Action indirecte sur la structure par son influence sur les bactéries et les champignons • Production de matières fécales
Mésafaune	<ul style="list-style-type: none"> • Régulation des populations bactériennes et fongiques • Intervention dans le recyclage des éléments nutritifs • Fragmentation des résidus végétaux 	<ul style="list-style-type: none"> • Action indirecte sur la structure par son influence sur les bactéries et les champignons • Formation de pores • Production de matières fécales
Macrofaune	<ul style="list-style-type: none"> • Fragmentation des résidus végétaux • Interactions avec l'activité des micro-organismes 	<ul style="list-style-type: none"> • Mélange des matières organiques et des minéraux • Transport des matières organiques • Formation de pores • Production de matières fécales
Racines vivantes	<ul style="list-style-type: none"> • Absorption des éléments nutritifs • Intervention sur la dynamique des éléments nutritifs par le pH et les composés organiques excrétés • Leur voisinage (rhizosphère) est un milieu favorable aux micro-organismes 	<ul style="list-style-type: none"> • Formation des pores • Action de compression • Agrégation de particules minérales et organiques • Production de mucilages agrégeants

Source : présentation adaptée d'après Linden et coll., 1994

Il existe de nombreuses interactions entre les organismes vivants dans le sol. Celles qui ont été observées entre les plantes, les micro-organismes et les insectes donnent souvent lieu à des synergies ou à des antagonismes (Bennett, 2013). D'autres ont donné lieu à plusieurs observations, par exemple entre les microarthropodes et les micro-organismes (Cole et coll., 2004), entre les nématodes et les végétaux (Korthals et coll., 2001) et entre les racines des plantes elles-mêmes par allélopathie (Pierik et coll., 2013).

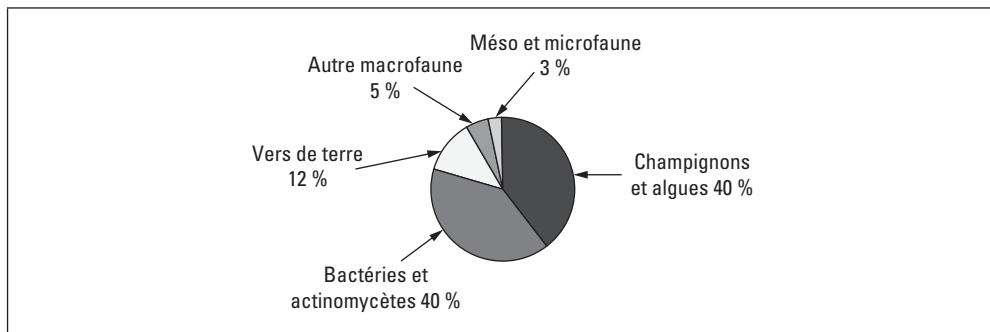


Figure 1.13 Les organismes vivants du sol.

Exemple d'abondances relatives approximatives des organismes vivants autres que les racines dans une couche de sol de 20 cm d'épaisseur contenant une biomasse totale de 12 000 kg/ha.

Source : d'après Gobat et coll., 1998

Les micro-organismes jouent un rôle considérable dans les biotransformations des matières organiques des sols par la production de nombreuses enzymes. Il en existe deux catégories selon la source de carbone qu'ils utilisent. Les micro-organismes hétérotrophes sont les plus abondants; ils tirent leur énergie des réactions d'oxydation des composés organiques. Au contraire, les micro-organismes autotrophes utilisent le dioxyde de carbone et les carbonates comme source de carbone. Toutefois, d'autres critères sont aussi utilisés pour les distinguer comme leur caractère aérobie ou anaérobie, leur tolérance à l'égard de la température et de l'acidité (*chapitre 2*). À un instant donné, tous les micro-organismes ne présentent pas la même activité (*note 1.8*). De ce point de vue, on distingue la biomasse active, la biomasse potentiellement active et la biomasse dormante selon la rapidité de leur réaction à l'apport de substrats (Blagodaskaya et Kuzyakov, 2013).

Les bactéries et les actinomycètes sont les micro-organismes les plus nombreux. Ils n'occupent pas la totalité de l'espace poral, les pores trop petits inférieurs à environ 0,2 à 0,3 μm , ne leur étant pas accessibles. Une grande partie se trouve au voisinage des racines, dans la rhizosphère, où les substances nutritives que sont les exsudats et les mucilages sont abondantes. Les champignons représentent une part souvent importante de la biomasse microbienne des sols, jusqu'à 80 % selon Foster (1988). Ils sont localisés dans les pores de plus grandes dimensions à l'extérieur des agrégats, contrairement aux bactéries qui le sont principalement dans les micropores internes aux agrégats. Beaucoup d'espèces végétales (environ 94 %) sont associées à des mycorhizes et la plupart en dépendent pour le prélèvement de leurs nutriments (Dickie et coll., 2013). Une fraction de l'ordre de 10 à 20 % de la production primaire nette est transférée aux mycorhizes et contribue ainsi au transfert de carbone dans le sol. Les micro-organismes ont des rôles très divers, y compris des actions néfastes dans le cas des espèces pathogènes. Ils participent aux cycles biogéochimiques des éléments chimiques et sont des agents de la pédogenèse par la néogenèse de minéraux comme, par exemple, les carbonates et les oxydes et hydroxydes de fer (Huang et Bollag, 1998). Si la rhizosphère est un milieu particulièrement favorable aux micro-organismes, il faut indiquer que la proximité des particules de résidus végétaux, parfois appelée

Sa valeur n'est pas précisément connue puisqu'elle dépend de la nature des matières organiques et donc de tous les facteurs qui ont une influence sur sa composition. Selon les données publiées, C_{conv} est très variable, de 1,5 à 2,5 environ, une valeur de 1,72 étant fréquemment utilisée. On voit donc qu'il est préférable, pour caractériser un sol, d'utiliser les teneurs en carbone organique qui, elles, sont accessibles à l'analyse chimique.

La réponse à la deuxième question nécessite la connaissance de la masse volumique apparente, ρ_{app} , de la couche de sol considérée. À l'échelle de la parcelle, il est possible de faire plusieurs prélèvements et de déterminer une valeur moyenne de ρ_{app} . Cependant, des valeurs mesurées de ρ_{app} ne sont pas toujours disponibles, surtout quand il s'agit de grandes surfaces et de plusieurs profondeurs. Dans ce cas, on peut faire appel à des estimations basées sur des fonctions de pédotransfert (Belkacem et coll., 1998). Il s'agit là d'une source d'incertitude importante qui peut engager parfois à utiliser les estimations de stocks de carbone organique avec beaucoup de prudence. Par ailleurs, des valeurs moyennes de ρ_{app} ont été publiées pour l'ensemble des sols du monde par Batjes (1996).

La démarche conduisant à une valeur du stock de carbone organique dans une couche de sol limitée est schématisée dans la figure 1.14.

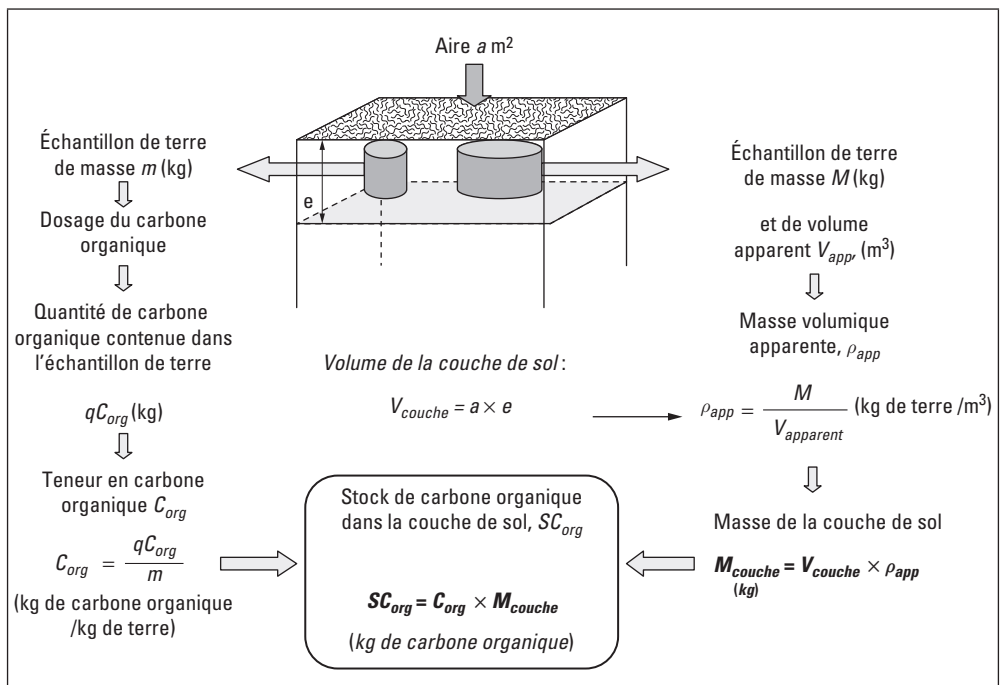


Figure 1.14 Procédure de détermination du stock de carbone organique d'une couche de sol à partir du prélèvement d'échantillons de forme cylindrique de volumes connus

Les flèches verticales indiquent la succession des calculs.

Le calcul du stock de carbone organique est ainsi effectué en deux étapes: d'abord, la détermination de la teneur en carbone organique, puis celle de la masse volumique apparente.

Remarque: SC_{org} (kg de carbone organique) est la masse de carbone organique contenue dans une couche de sol de surface $a \text{ m}^2$ et d'épaisseur $e \text{ m}$.

STOCKS DE CARBONE ORGANIQUE ET CLIMATS

Les vitesses des biotransformations dépendent de la température et de la teneur en eau des sols (*chapitre 2, « Influence des facteurs du milieu sur les biotransformations »*). Cela explique la dépendance des quantités de carbone organique à l'égard des conditions climatiques, bien qu'il soit difficile de séparer complètement leur influence de celle des sols et de la végétation.

Le stock de carbone du sol est principalement déterminé par la température (Litton et Giardina, 2008). La compilation d'un ensemble d'observations et de simulations montre que la production primaire nette et la minéralisation augmentent avec la température, mais avec des sensibilités différentes (Kirschbaum, 2000). La production primaire nette augmente moins que la minéralisation et d'une façon d'autant plus marquée que la température est basse. Il en résulte que le stock de carbone organique des sols décroît quand la température augmente. Comme le montre l'analyse de nombreuses données, la production primaire nette (accumulation photosynthétique par les plantes) a tendance à être plus grande dans l'hémisphère nord que dans l'hémisphère sud (Potter et coll., 2012), ce qui est illustré par la figure 1.20. Elle représente les valeurs moyennes estimées pour diverses zones écologiques. On peut observer l'influence importante de la température sur l'accumulation du carbone organique.

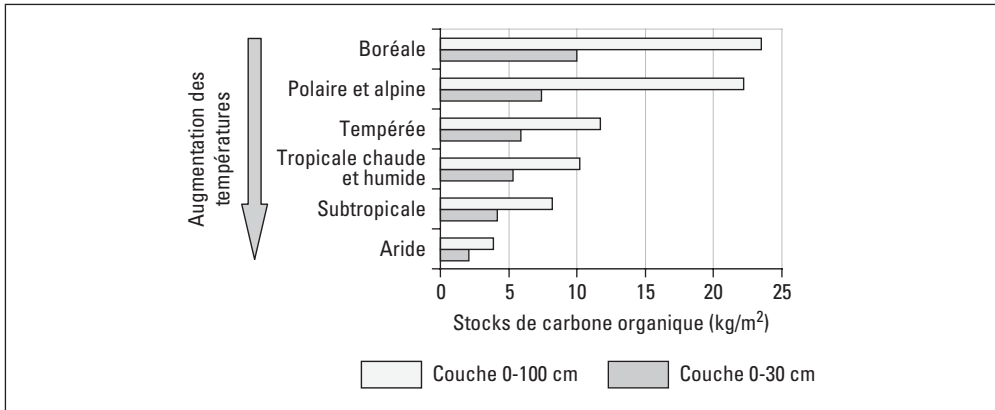


Figure 1.20 Moyennes des stocks de carbone organique dans diverses zones écologiques

Source : d'après Batjes, 1999, cité dans le rapport FAO, 2002

Plus la température est élevée, moins les sols contiennent de carbone organique.

Données sur l'estimation spatialisée des stocks de carbone organique

Les teneurs en carbone organique sont très variables dans l'espace et présentent des distributions spatiales hétérogènes difficiles à décrire. L'acquisition de données spatialisées

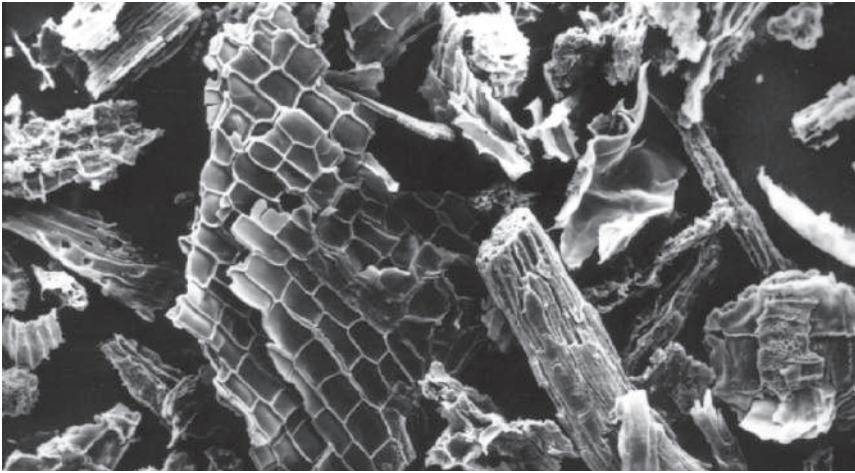


Figure 1.25 Matière organique particulaire séparée du sol et observée au microscope électronique à balayage

Source: Chenu, 2003

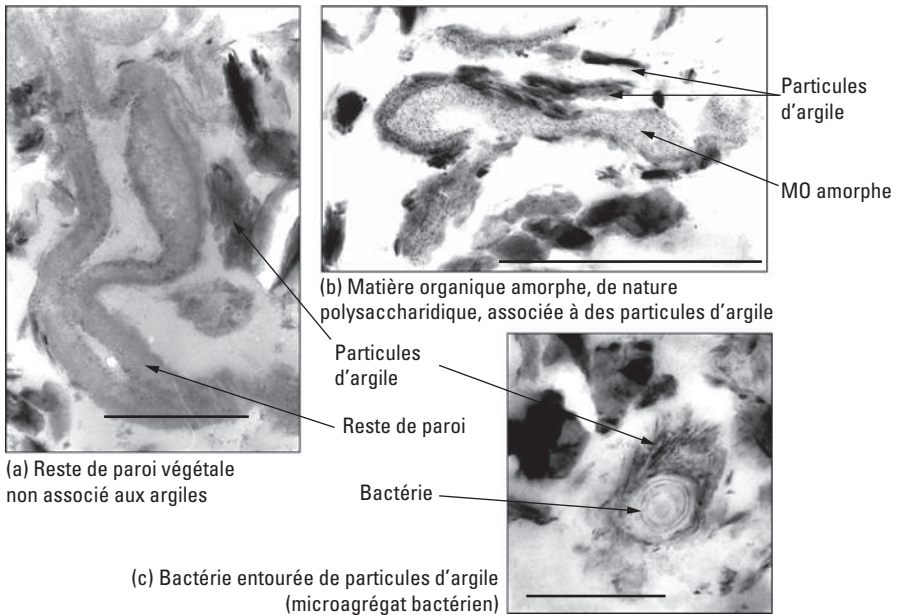


Figure 1.26 Observation de matières organiques du sol en microscopie électronique à transmission

La barre représente 1 μm .

Photographies a et b: Chenu, non publiées; c: Chenu et coll., 2009.

La fertilité des sols, leur dégradation, la pollution des eaux superficielles et souterraines et les gaz à effets de serre sont des préoccupations du monde agricole. La description, la compréhension et la résolution des problématiques scientifiques et techniques correspondantes reposent sur les connaissances de la constitution, des propriétés et de l'évolution des sols. Ces connaissances montrent que les matières organiques mortes et vivantes qu'ils contiennent jouent un rôle important du fait de leurs propriétés et de leurs transformations abiotiques et biologiques.

Cette deuxième édition actualisée apporte des données récentes sur les matières organiques des sols et donne de nouveaux éclairages pour comprendre les enjeux agro-environnementaux actuels en relation avec les sols. Elle donne également un exposé des grandes lignes des démarches possibles pour y répondre. Elle est construite autour de quatre questions :

- Quelles sont la nature et les propriétés des matières organiques des sols ?
- Quelles sont les biotransformations des matières organiques des sols ?
- Quelles sont les conséquences environnementales et agronomiques des propriétés et des biotransformations des matières organiques ?
- Quels usages des terres et quelles pratiques mettre en œuvre pour maintenir les matières organiques des sols à un niveau suffisant en relation avec leurs qualités physique, chimique et biologique ?

Cet ouvrage présente l'essentiel des connaissances sur les matières organiques des sols. Les réponses aux questions posées sont exposées de la manière la plus simple possible, compatible avec une information scientifique suffisante pour étayer les descriptions et les interprétations des observations et des résultats expérimentaux.

***Raoul Calvet** est ingénieur agronome, docteur ès sciences physiques et professeur honoraire de l'Institut national agronomique Paris-Grignon.*

***Claire Chenu** est agrégée de sciences naturelles, docteur ès science, professeure à l'AgroParisTech, et directeur de recherche à l'INRA et au CNRS.*

***Sabine Houot** est ingénieur agronome, docteur ès science, et directeur de recherche à l'INRA.*

ISBN : 978-2-85557-379-3



9 782855 573793

