
Un point sur l'évolution des réserves organiques des sols en France

J. Balesdent

INRA, Unité de Science du Sol, 78026 Versailles cedex

RÉSUMÉ

Plusieurs études locales font le constat de baisses des taux de matières organiques de sols cultivés français dans les dernières décennies. Bien que la tendance ne soit pas généralisable, il est nécessaire de s'en préoccuper dans une optique de gestion à long terme de la qualité des sols. Le présent article fait un point sur les connaissances de la dynamique du carbone et sur les causes possibles d'évolution des réserves organiques. Bien que l'augmentation globale de la production primaire agricole ait pu augmenter régulièrement les intrants carbonés au sol, il semble que l'intensification du travail du sol, la diminution des surfaces en fourrages pérennes au profit de fourrages annuels et l'accélération de la rotation des usages des terres soient les principaux facteurs explicatifs des baisses observées. L'agriculture tend et tendra toujours à optimiser la part de la production primaire carbonée destinée à l'exportation de l'agrosystème par rapport à la part qui arrive au sol. Cette tendance devrait être accompagnée de politiques de gestion des matières organiques des sols, régionales et si possible raisonnées à l'échelle du paysage.

Mots clés

Carbone organique - matières organiques - usage des sols.

SUMMARY

AN OVERVIEW OF SOIL ORGANIC MATTER LEVELS TRENDS IN FRANCE

Decreasing organic matter contents have been locally reported in French cultivated soils. There are not enough data to consider the phenomenon as general, but there is a need to be aware of it for long-term soil quality management. The present paper reviews our present knowledge of soil organic matter dynamics and the possible causes of the observed trends. Agriculture may have increased the organic carbon inputs to the soils in the past, due to a continuously progressing net productivity, but there are evidences that grassland abandon, use of annual forage cropping and more energetic tillage practices have reversely contributed to the decrease of soil organic matter levels. Agriculture tends to optimize the fraction of the primary production that is exported from the agrosystem and thus decreases the one returned to the soil. Since such a trend is expected to continue, it should be accompanied by regional and landscape-scaled soil organic matter management policies.

Key-words

Organic carbon - organic matter - land use change.

RESUMEN

EVOLUCIÓN DE LAS RESERVAS ORGÁNICAS DE LOS SUELOS EN FRANCIA

Varios estudios locales han constatado bajas en las tasas de materias orgánicas de los suelos cultivados franceses en las últimas decenias. A pesar de que esta tendencia no se pueda generalizar, la disminución de materia orgánica es un aspecto que debe ser considerado para una gestión a largo plazo de la calidad de los suelos. Este artículo presenta los conocimientos de la dinámica del carbono y las causas posibles de evolución de las reservas orgánicas. A pesar de que el aumento global de la producción primaria haya podido aumentar regularmente las entradas de carbono en el suelo, parece que la intensificación del trabajo del suelo, la disminución de las superficies en forraje perenne remplazadas por un forraje anual y la aceleración de la rotación de los usos de suelos sean los principales factores explicativos de las disminuciones observadas. La agricultura tiende y tenderá siempre a optimizar la parte de la producción primaria carbonada destinada a la exportación del agrosistema respecto a la parte que llega al suelo. Esta tendencia debería estar acompañada de políticas de gestión de las materias orgánicas de los suelos, a nivel regional y, si es posible, razonadas a escala del paisaje.

Palabras claves

Carbono orgánico - materias orgánicas - uso de los suelos

LE RÔLE DES MATIÈRES ORGANIQUES DANS LES SOLS

Matières organiques et fertilité

Les matières organiques ont de multiples propriétés qui leur confèrent des fonctions primordiales dans les agro- et les écosystèmes et en font une composante importante de la fertilité. L'idée de fertilité ne correspondant pas à des notions scientifiques ni économiques précises (Sébillotte, 1989), on préférera dire que les fonctions des matières organiques participent de façon générale à l'aptitude des sols à la production végétale. Rappelons-les brièvement. Les matières organiques assurent la cohésion des autres constituants du sol entre eux et contribuent à la structuration du sol et à la stabilité de la structure. Ceci est dû au grand nombre de liaisons électrostatiques et surtout de liaisons faibles que les matières organiques peuvent assurer, combiné avec le caractère macromoléculaire et la conformation souple des molécules. C'est ainsi que les matières organiques peuvent indirectement augmenter l'aération, la pénétration des racines, l'infiltration de l'eau, la résistance au compactage, diminuer l'énergie requise pour le travail du sol, diminuer la battance du sol et les accidents de levée, et, surtout, limiter les risques d'érosion, voire de perte du sol. Les matières organiques augmentent de façon générale la réserve en eau des sols. Ainsi dans certains agrosystèmes semi-arides, la réserve en eau du sol est peut être insuffisante pour alimenter la production jusqu'à maturité et seuls les amendements organiques permettent d'augmenter la réserve en eau au delà du seuil nécessaire à une production rentable. Les matières organiques contribuent classiquement à la fertilité chimique : elles sont une réserve d'éléments nutritifs, la principale pour l'azote, une des principales pour le phosphore et le soufre. Les matières organiques ont aussi une forte capacité d'échange qui, dans certains milieux comme les sols sableux, est la principale réserve des bases disponibles (K et Ca).

Les matières organiques sont le substrat énergétique des organismes hétérotrophes du sol. L'activité de ces organismes décomposeurs (mésosofaune, microorganismes) a généralement un effet positif sur les propriétés physiques. La variété des composés organiques présents dans le sol entretient d'ailleurs une grande diversité des organismes et des potentiels de biodégradation (Chaussod, ce numéro). Les matières organiques peuvent avoir d'autres fonctions biologiques, dont l'étude en est encore à sa préhistoire : les matières organiques du sol contiennent et libèrent des molécules de petite taille, directement actives sur les métabolismes végétaux et microbiens. Il apparaît que certains composés, soit émis par les organismes, soit résultant de leur activité de biodégradation, peuvent être des signaux dans l'interaction entre organismes, des régulateurs des populations microbiennes, voire de la croissance végétale.

De manière générale, les réserves organiques donnent à l'agro- ou à l'écosystème une capacité de résistance à différentes fluctuations, accidents ou agressions tels que des pertes ou des exportations d'éléments, des pollutions, ou l'action érosive des pluies. Les matières organiques ont ainsi un rôle de volant, de matelas, en plus de leur rôle de rapport : on peut définir la réserve organique comme un capital. L'entretien de ce capital, qui nécessite un certain coût, est au cœur de la gestion durable des agrosystèmes (Doran et al., 1996). Tiessen et al. (1994) illustrent le rôle de ce capital matières organiques dans la fertilité des sols en opposant des chernozems prairiaux canadiens à des sols forestiers ferrallitiques vénézuéliens. La mise en culture des premiers, sans intrants, est rentable pendant 65 ans, alors que les seconds sont impropres à la culture après trois ans. Au delà du climat et de la nature minérale du sol, le contraste est expliqué par la différence de vitesse de destruction des matières organiques.

Clarifier une vision parfois simpliste du rôle des matières organiques

Les relations étroites entre fertilité et matières organiques donnent souvent de ces dernières une vision manichéenne. Cette vision est entretenue par une perception affective souvent inconsciente des substances organiques du sol, que l'on retrouvera dans la racine commune des mots humain, humus et inhumier par exemple. La vision manichéenne est d'ailleurs mise en défaut par un paradoxe dans le discours courant : les matières organiques sont « bonnes », et l'activité biologique est « bonne » également ; or l'activité biologique est essentiellement la destruction des matières organiques, qui est la source d'énergie. On peut lever ce paradoxe en reprenant les termes financiers : si la réserve organique peut être assimilée à un capital, l'activité biologique sera assimilée au chiffre d'affaire correspondant. Les deux notions sont distinctes. L'activité biologique est d'autant plus élevée que les intrants carbonés, donc en général la production primaire, sont élevés.

Une perception positive des matières organiques ne peut d'ailleurs être définie que dans un cadre socio-économique donné. Les matières organiques présentent ainsi des effets négatifs pour certains objectifs agricoles ou environnementaux. En production viticole de qualité par exemple, des apports organiques peuvent provoquer une sur-alimentation azotée, ou une diminution de l'albedo du sol, qui altèrent la composition du raisin. De fortes concentrations en matières organiques biodégradables en certains points du sol peuvent localement provoquer une asphyxie au niveau des racines. Des objectifs économiques différents donneront généralement des perceptions différentes du rôle des matières organiques. Par exemple, sachant que les matières organiques augmentent la rétention des molécules pesticides dans les sols, l'effet pourra être recherché si la molécule est polluante, le même effet sera une contrainte si une forte biodisponibilité du produit est recherchée.

Matières organiques des sols et qualité de l'environnement

Les matières organiques des sols ne sont pas seulement une composante de la fertilité, elles ont des fonctions environnementales de premier plan. La stabilité structurale des couches superficielles des sols est essentielle à la stabilité des paysages et aussi à la qualité des eaux superficielles. L'entraînement de particules du sol par ruissellement se traduit non seulement par la turbidité des eaux et les envasements correspondants, mais aussi par l'entraînement de polluants associés aux particules (phosphore, métaux, polluants organiques). C'est généralement quand les teneurs en matières organiques sont descendues en dessous d'un niveau critique que le phénomène se produit (Tessier et al., ce numéro). La chute des réserves organiques des sols se traduit aussi par une minéralisation de l'azote organique, sa conversion en nitrates et la pollution des eaux tributaires. En revanche, les milieux engorgés et très organiques des zones de bas-fonds et des plaines alluviales sont propices à la dénitrification et à la dépollution des eaux qui les traversent. Au sein même des écosystèmes, les matières organiques amortissent de façon générale les risques de pollution : elles ont une grande affinité pour les métaux et les petites molécules organiques et augmentent ainsi la rétention de polluants métalliques ou organiques toxiques ; elles réduisent leur biodisponibilité et le risque de propagation dans les chaînes trophiques et alimentaires (Harter et Naidu, 1995, Chassin, ce numéro, Barriuso, ce numéro).

Enfin, récemment, le constat de l'augmentation du CO₂ dans l'atmosphère et de l'augmentation induite de l'effet de serre a amené la communauté internationale à se pencher sur le potentiel de stockage de carbone dans les sols. Sur la planète, le sol est en effet le plus gros réservoir superficiel de carbone (1500 Gt) échangeant du carbone avec l'atmosphère (750 Gt) par photosynthèse, mort des végétaux et biodégradation des composés morts dans le sol. Actuellement, les flux planétaires de carbone connus révèlent un défaut de bilan : par an, les combustibles fossiles apportent 5,5 Gt à l'atmosphère, la déforestation tropicale 1 à 1,5 Gt, l'océan piégerait 2 Gt ; or le carbone atmosphérique n'augmente que de 3,5 Gt. Il manque donc 1,5 Gt (avec une incertitude de ± 1 Gt), qui pourraient être piégés annuellement dans la végétation et les sols (Houghton, 1995). Un tel flux apparaît à la fois énorme (le quart des émissions de pétroles et charbon) et difficilement mesurable (augmentation annuelle de 1/1 000 du réservoir sol). Si du carbone est piégé dans les sols, la question est aussi de savoir pour combien de temps. Les matières organiques des sols sont aussi les sources majeures de deux autres gaz à effet de serre en augmentation : le méthane et le protoxyde d'azote.

Cette problématique a relancé l'activité scientifique internationale sur le cycle du carbone dans les sols. Elle a aussi généré une demande de la part du monde politico-

économique : dans une optique de limitation de l'effet de serre, un stockage durable de carbone dans le sol devrait être évalué dans les mêmes termes qu'une émission directe de gaz à effet de serre.

QUELQUES CONSTATS D'ÉVOLUTION DES RÉSERVES ORGANIQUES DES SOLS

Plusieurs études récentes ont fait le constat d'une évolution générale, au niveau local ou régional, des taux de matières organiques des sols. Nous en citerons quelques unes. Les premières sont des études de cas de mise en culture, les autres sont des cas où l'usage des sols évolue peu.

L'effet de la mise en culture : cas de terrasses alluviales des gaves pyrénéens.

Il s'agit d'une petite région où les écosystèmes natifs, des forêts-landes de pins maritimes dénommées Touyas, sont progressivement mis en monoculture de maïs depuis l'après-guerre (Arrouays et al. 1994). L'analyse chronoséquentielle montre une baisse importante, de plus de 50 % des réserves organiques en 35 ans (Figure 1). Les principaux traits de l'évolution sont une chute très rapide dans les premières années, puis une tendance lente qui perdurera pendant de nombreuses décennies. La baisse de la réserve organique ne semble pas devoir être expliquée par l'érosion des sols, ni par une diminution des apports carbonés au sol, car les restitutions par le maïs sont probablement plus fortes que les apports par la végétation forestière. Ce sont principalement les vitesses de destruction du carbone organique qui sont modifiées. En particulier la forte chute initiale montre l'existence de carbone très biodégradable, qui était protégé de la biodégradation sous végétation forestière. Les mécanismes en jeu seront discutés plus bas.

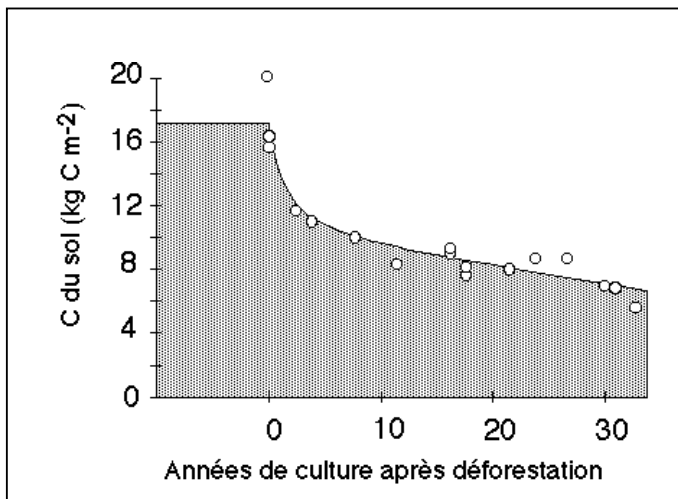
Cette conséquence de la mise en culture de sols forestiers a été décrite ailleurs en France (Plénet et al. 1993, Jolivet et al. in press), souvent avec une amplitude plus faible, mais elle semble générale. De nombreuses régions sont concernées, dont la forêt Landaise (Jolivet et al., in press). Le retournement de prairies pour la mise en culture conduit aussi à des baisses de la réserve organique, avec une amplitude plus faible (Burke et al., 1989). Boiffin et Fleury (1974) décrivent en Mayenne une baisse de 25 % des teneurs organiques en 20 ans. R. Chaussod (communication personnelle) observe des baisses moyennes annuelles de 2 % par an dans la vallée de la Saône.

La tendance générale en Bretagne

Des baisses sont suspectées en dehors des cas de mise en culture. Walter et coll. (1995) ont rassemblé les résultats d'ana-

Figure 1 - Chute des stocks de carbone des sols consécutive à la mise en culture de terrasses alluviales des gaves pyrénéens. Les points d'abscisse zéro correspondent à des sols forestiers. Le stock est celui de l'horizon travaillé des sols cultivés (26 cm) et de la couche équivalente (30 cm) des sols forestiers. D'après Arrouays et al., 1994.

Figure 1 - Soil organic carbon decrease following forest clearing and maize cultivation in the Pyrenean Piedmont. After Arrouays et al. (1994).



lyse des teneurs en matières organiques de plus de 90.000 échantillons traités par les laboratoires d'analyse de terre en Bretagne. Ils ont comparé les résultats des périodes 1980-1984 et 1990-1994. En regroupant les échantillons par commune d'origine, ils observent en moyenne une teneur diminuée de plus de 10 % en 10 ans. La baisse relative est d'autant plus importante que la teneur initiale en matières organiques est élevée, elle est de l'ordre de 15 % pour les teneurs de 70 mg/g de matières organiques. Bien que les auteurs n'excluent pas des biais liés à la non maîtrise de l'échantillonnage, ils invoquent l'évolution des pratiques agricoles, en particulier celles relatives à l'élevage.

L'évolution dans une exploitation céréalière

Des variations importantes ont été également observées dans certains agrosystèmes, sans que l'on invoque des changements importants d'usage du sol. Au sein d'une exploitation céréalière de la Beauce, Fardeau et al. (1988) déduisent des résultats d'analyse de terre une baisse de la teneur moyenne en matières organiques, de 40 mg/g à près de 20 mg/g en 16 ans, entre 1971 et 1987. Les auteurs invoquent l'évolution des pratiques de travail du sol et l'irrigation.

L'évolution des sols forestiers de l'Est de la France

Il n'est pas observé que des baisses des teneurs en matières organiques. On rapporte ici les résultats d'une évolution des teneurs en azote des sols forestiers de l'Est de la France. Thimonier et Dupouey

(1992) ont rééchantillonné en 1990 des stations forestières décrites en 1970. Un résultat principal est l'augmentation significative, de plus de 10 %, de la teneur en azote de l'horizon A. Le résultat est confirmé par les relevés floristiques révélant l'augmentation des populations nitrophiles. L'effet est plus important sur les lisières au vent des massifs forestiers. Une des explications proposées est la fertilisation du système par les dépôts atmosphériques azotés, en augmentation nette depuis 1970. Bien que l'augmentation de l'élément carbone ne soit pas significative, on peut conclure à une évolution importante du statut organique des sols.

Difficultés dans la mise en évidence de tendances

On ne peut pas généraliser actuellement des résultats comme ceux suspectés en Bretagne ou en Beauce. D'une part l'intercomparaison de résultats d'analyse de terre peut comporter différents biais ; d'autre part, elle n'est pas une mesure directe de l'évolution moyenne des réserves organiques. L'approfondissement des labours peut contribuer aux effets observés. D'autres études du même type manquent, et il est d'ailleurs fort probable que des études ayant conclu à des teneurs organiques inchangées n'aient pas été publiées.

La mise en évidence d'évolutions de la réserve organique est difficile. Il ne suffit pas de mesurer les teneurs, mais les stocks de matières organiques par unité de surface, dans une couche donnée. Il est nécessaire de connaître la masse volumique sèche (dite densité apparente) et enfin de choisir une couche de référence pour les comparaisons. Le changement d'occupation modifiant la densité du sol, il est nécessaire de prendre en compte une couche de masse donnée, et non pas de profondeur donnée, qui ne serait pas conservatoire. Par exemple, on comparera les 30 premiers cm de sols labourés aux 35 ou 40 premiers cm de sols prairiaux ou forestiers, selon la densité. La mise en évidence de l'évolution du stock de matières organiques d'un sol est aussi très délicate car les tendances à long terme sont masquées par la variabilité à court terme (en particulier la variabilité saisonnière et la variabilité climatique inter-annuelle) et la variabilité spatiale. Pour toutes ces raisons, la plupart des teneurs en matières organiques publiées de façon isolée sont peu utilisables pour une étude des tendances. Finalement, les meilleurs renseignements sur l'évolution des réserves organiques sont apportés par les expérimentations de longue durée, telles celles menées par les Ecoles d'Agronomie, les Instituts Techniques comme celui des Céréales et des

Fourrages, les Chambres d'Agriculture, l'INRA, etc.

LE POIDS DE L'HISTOIRE DE L'USAGE DU SOL

Des changements de réserves organiques sont attendus et prévisibles du seul fait des changements récents d'usage des sols. Sachant que les taux de matières organiques sur un type de sol donné sont largement dépendants de l'usage et, parmi les usages agricoles, du système de cultures (Colomb et al., 1989), les changements d'usage vont se traduire par des changements de réserves organiques des sols. Dans la figure 2, nous avons classé quelques grands types d'usage en fonction de leur capacité de stockage de matières organiques. Un premier constat est que les terres labourables (sols destinés principalement aux cultures annuelles) sont celles qui stockent

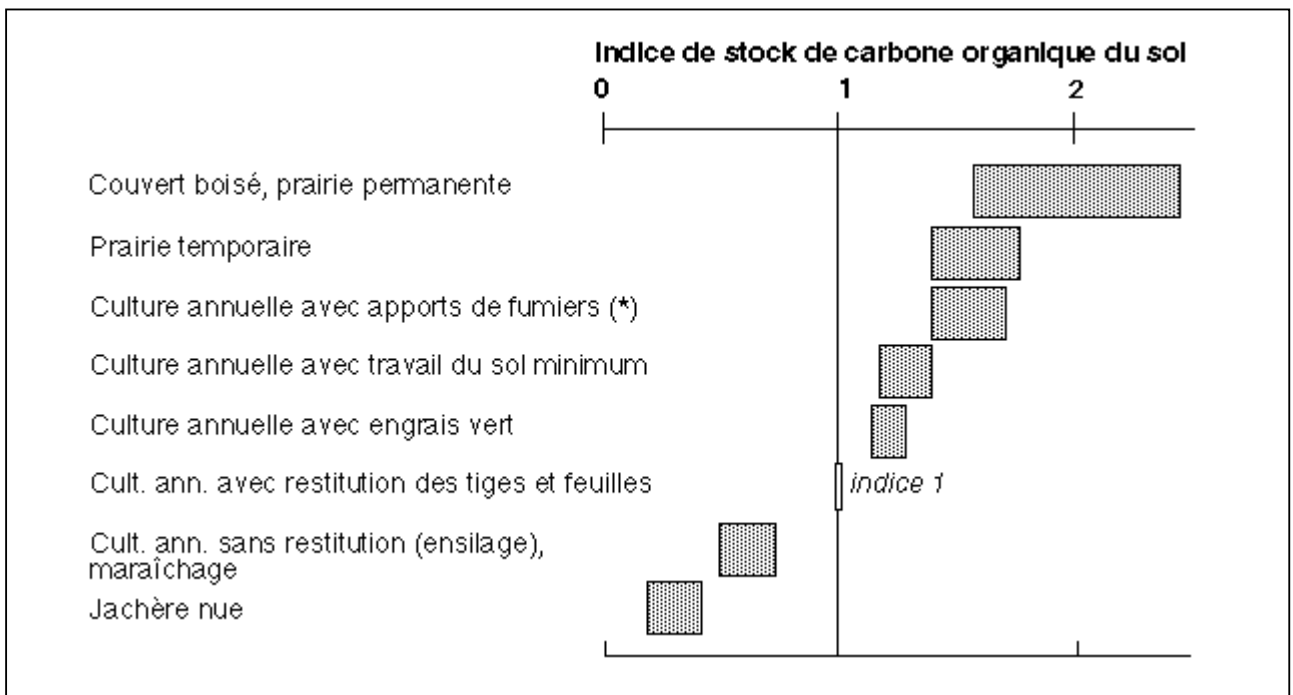
le moins de carbone. Comme de nombreuses parcelles en terres labourables ont été sous végétation pérenne dans un passé plus ou moins lointain, il est naturellement attendu que leur stock de matières organiques baisse. La vitesse moyenne de destruction des matières organiques étant de l'ordre du cinquantième par an, l'arrière effet d'un passé différent peut être sensible pendant un siècle.

Des réserves à la baisse depuis 1980 ?

Pour estimer les effets sur les réserves organiques des grands changements d'usage des sols, examinons leur évolution depuis le siècle dernier (Figure 3). Celle-ci est considérable, les grands traits sont, avant 1970, une diminution continue des terres labourables, accompagnée de la disparition de la jachère traditionnelle, au profit de surfaces d'abord prairiales, puis forestières. A partir des années 1970, la tendance principale est une baisse des surfaces en prairies, autant per-

Figure 2 - Effet de l'usage du sol sur le stockage de carbone dans le sol. A chaque type d'usage est associé un stock de carbone, celui vers lequel tendrait le système s'il était maintenu indéfiniment. Seule la couche équivalente aux trente premiers cm des sols cultivés est prise en compte. La valeur est rapportée à celle de cultures annuelles de référence sur le même sol. (Estimation d'après les données de Rémy et Marin-Lafèche, 1976 ; Sébillotte, 1989 ; Plénet et al., 1993 ; Loiseau et al., 1995, Nys et al., 1995 ; Balesdent, 1995).

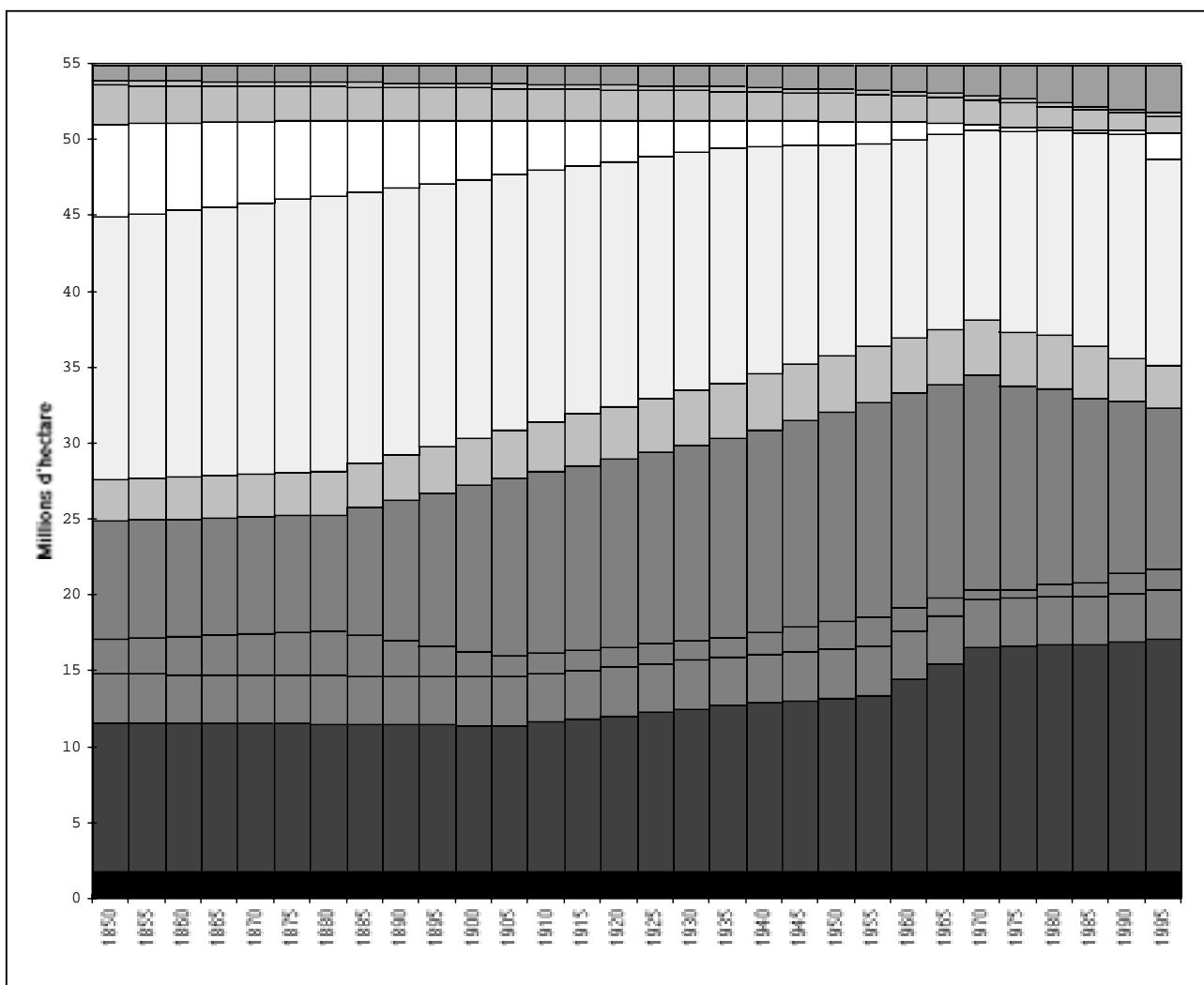
Figure 2 - Potential for topsoil organic carbon storage related to land use (after data from Rémy et Marin-Lafèche, 1976 ; Sébillotte, 1989 ; Plénet et al., 1993 ; Loiseau et al., 1995, Nys et al., 1995 ; Balesdent, 1995). (*) under a medium cattle/arable land ratio, after Sébillotte et al. (1989).



(*) dans des exploitations comptant 1 Unité de Gros Bétail par hectare de terre labourable, d'après Sébillotte et al. (1989).

Figure 3 - Une estimation de l'évolution 1850-1995 des superficies correspondant aux principales classes d'usage des sols en France. Etablie d'après diverses sources, principalement Ministère de l'Agriculture (1991 et 1996a).

Figure 3 - 1850-1995 evolution of the main land use areas in France. After Ministère de l'Agriculture (1991 et 1996a).



manentes que temporaires, au profit de cultures annuelles et notamment du maïs fourrager. Enfin, à partir de 1993, les directives européennes ont imposé la jachère, qui était souvent nue, sans végétation, jusqu'en 1995. De ces grands changements, on peut tirer un bilan pour le carbone des sols (en combinant les données des figures 2 et 3). Les teneurs moyennes des surfaces cultivées auraient atteint un maximum vers 1980, principalement par l'entrée d'anciennes prairies dans le pool des terres labourables, mais elles seraient ensuite en baisse continue, de par le passé prairial d'une part, et par le remplacement de fourrages pérennes par des fourrages annuels, surtout le maïs fourrage, dont les restitutions organiques au sol sont particulièrement faibles, d'autre part. En

- S'artificialisé
- Jardins
- Vignes et Fruits
- Jachère
- Cultures annuelles
- Prairies Art. et Tempor.
- Prairies permanentes
- Autres herbages
- Landes, Friches, Garr., Maq.
- Surface boisée
- Rochers et eaux

zones d'élevage, cette évolution des pratiques, concernant aussi la conduite des prairies pâturées et les modes d'affouragement, peut être interprétée de façon très générale comme une optimisation de la part de la production primaire consommée par les animaux, aux dépens de la part retournant au sol. Un autre effet s'ajoute à cette tendance : de nombreuses exploitations mixtes polyculture-élevage, voire des régions entières, ont abandonné l'élevage, et ne bénéficient plus des apports de fumiers.

Enfin, plus récemment et de façon épisodique, la jachère nue imposée par les directives européennes en 1992, qui a été pratiquée ensuite pendant trois à quatre ans, a probablement contribué à abaisser significativement les réserves organiques car, d'une part, aucune restitution carbonée ne compense la minéralisation, d'autre part, la consommation d'eau par la végétation étant nulle, l'humidité du sol reste importante et favorise cette minéralisation, surtout en été au maximum de l'activité des microorganismes.

L'effet de la profondeur de labour est classiquement invoquée pour expliquer les baisses de la teneur en matières organiques, par la simple dilution avec l'horizon sous-jacent. Un labour à 30 cm, par rapport à un labour à 20 cm, tend classiquement à diminuer la teneur en carbone d'environ 20 %. Sachant que cette dilution est peu réversible à l'échelle des décennies, le labour le plus profond dans l'histoire récente du sol tend à imposer le taux. Sans même qu'il y ait une tendance systématique à l'approfondissement, la seule occurrence statistique de labours plus profonds qu'auparavant, même épisodiques, provoque une baisse des teneurs en carbone en surface, sans pour autant modifier la réserve totale. L'effet profondeur de labour n'affecte pas directement la réserve organique, mais peut diminuer considérablement la concentration en surface, et donc la sensibilité à la dégradation physique du sol.

Des inconnues

Les changements d'usage des terres sont plus importants que les seuls changements nets de superficie rapportés à la figure 3, en raison de rotations des usages sur le territoire français, comme par exemple le déboisement dans certaines régions et l'abandon agricole simultané dans d'autres. Ces rotations s'accroissent d'ailleurs actuellement, avec l'accélération des mutations socio-économiques. Bien que les mutations d'usage du territoire national soient actuellement estimées par les enquêtes photographiques systématiques du territoire TER-UTI (Ministère de l'Agriculture, 1996b), leur incidence est encore à déterminer.

Une donnée de base manque pour estimer les tendances nationales des réserves organiques : l'effet de l'augmentation de la productivité agricole. Cette augmentation est considérable : le rendement moyen en blé a par exemple été multiplié par plus de 8 entre 1852 et 1996 (Démonet, 1987). La produc-

tion primaire nette et les restitutions au sol ont aussi augmenté, dans une proportion moindre mais sûrement très élevée. Les expérimentations agronomiques de très longue durée, qui pour la plupart ont été maintenues à des rendements bas, nous apportent quelques enseignements. Les réserves organiques y sont d'une part assez stables dans le temps et d'autre part plus basses que celles de l'agriculture moderne, mais dans une proportion moindre que la différence de rendement. C'est le cas dans l'essai Dehéralin à Grignon (Morel, 1984), dans l'essai de Rothamsted en grande Bretagne (Jenkinson et al., 1992). On suspecte que l'intensification du travail du sol et de la fertilisation minérale dans l'agriculture moderne aient contribué, en sens inverse de l'augmentation de productivité, à augmenter les vitesses de minéralisation, mais le bilan n'est pas connu.

Concernant les prairies et les forêts, les surfaces ont augmenté depuis un siècle. Il est donc attendu que de nombreux sols sous prairie permanente ou sous forêt (40 à 50 %), cultivés autrefois et voient actuellement leur réserve de carbone augmenter progressivement. Et, ici aussi, l'augmentation de la production sylvicole ou prairiale a pu avoir des conséquences sur les réserves organiques des sols, mais aucune étude n'en a fait le bilan en France.

DYNAMIQUE DU CARBONE DES SOLS : MÉCANISMES ET ÉTAT DES CONNAISSANCES

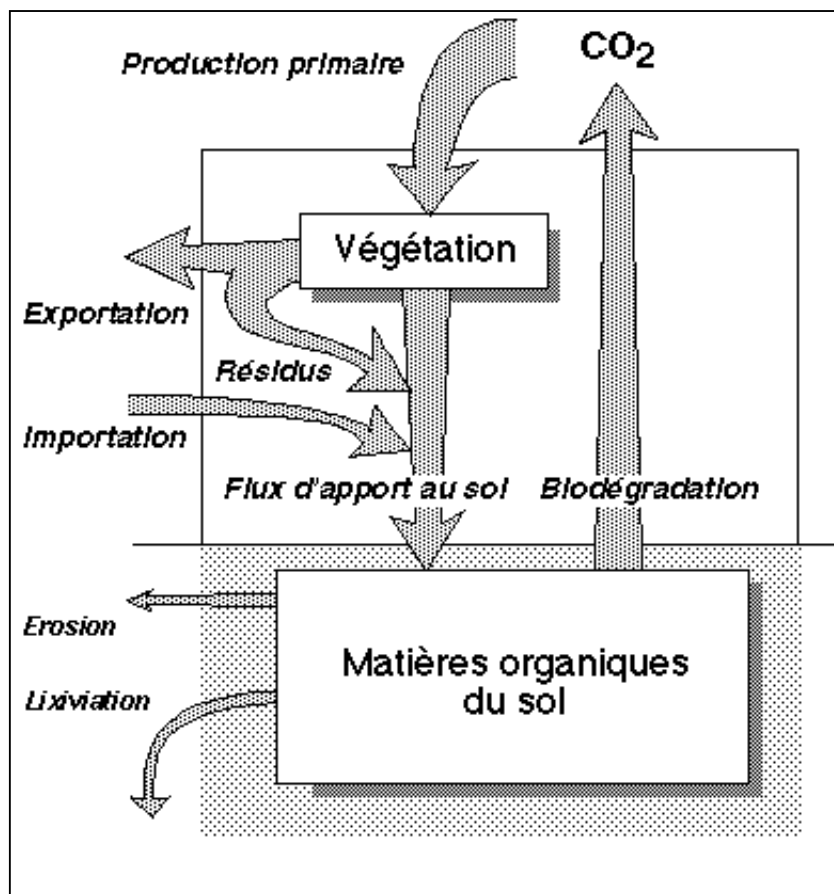
Le stock de carbone d'un sol est fonction d'une part des flux entrants au sol et d'autre part des vitesses de minéralisation du carbone, ou donc des temps de transit du carbone dans le sol (Figure 4). Les flux entrants sont dans les grandes lignes égaux à la production primaire nette, déduction faite des exportations et de la consommation animale ; ces flux sont largement maîtrisés par l'homme. En revanche, les vitesses de minéralisation sont variables et moins bien maîtrisées. C'est pour cette raison que la recherche s'est principalement focalisée sur ces vitesses de biodégradation, c'est à dire sur la dynamique du carbone dans les sols.

Progrès des méthodes de mesure de la dynamique du carbone

Les méthodes isotopiques de traçage du carbone et de l'azote, utilisant les composés enrichis en azote 15, en carbone 13 (Maillard et Bonhomme, 1995), en carbone 14, ainsi que la datation des matières organiques du sol (Jenkinson et al., 1992) sont à la base de ce progrès. Un outil nouveau s'est ajouté à la panoplie des chercheurs à la fin des années 1980 : le traçage naturel du carbone des sols par l'isotope ^{13}C (Balesdent, 1991). Le principe repose sur la différence naturelle de rapport $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ entre les plantes C3 et les plantes C4. En France, la quasi-totalité des

Figure 4 - Cycle du carbone dans un agro- ou un écosystème. Postes du bilan des matières organiques du sol.

Figure 4 - Flows driving the soil carbon balance in agro- and ecosystems.



végétations terrestres est du type C3, le maïs est C4. Quand on plante une culture de maïs, le carbone nouveau apporté par le maïs au sol va progressivement remplacer le carbone ancien. La mesure du rapport $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ des matières organiques donne directement la proportion de carbone ancien et de carbone nouveau. Si l'on fait des mesures à différents intervalles de temps, on trace le devenir du carbone arrivant au sol et l'on mesure directement le turnover du carbone. La méthode, mise au point par Cerri et al. (1985) s'est avérée extrêmement puissante, sans équivalent, car elle permet de tracer le carbone in situ, sans perturbation, et sur des durées s'étendant de l'année au siècle, voire aux millénaires. Le principe peut être appliqué à toute fraction séparable, permettant de distinguer les matières organiques labiles (rapidement renouvelées) et les matières organiques stables (non renouvelées) et d'établir les voies de transformation.

Une approche compartimentale du carbone

Avec cette méthode, on a pu mesurer les vitesses de biodégradation et établir une compartimentation du carbone du sol, c'est à dire une répartition en sous-ensembles, de vitesses de biodégradation différentes. Dans le cas de l'horizon travaillé des sols limoneux sous cultures céréalières, on peut par exemple proposer une répartition du carbone en quatre compartiments homogènes : l'un, très labile, est biodégradé dans l'année, sa quan-

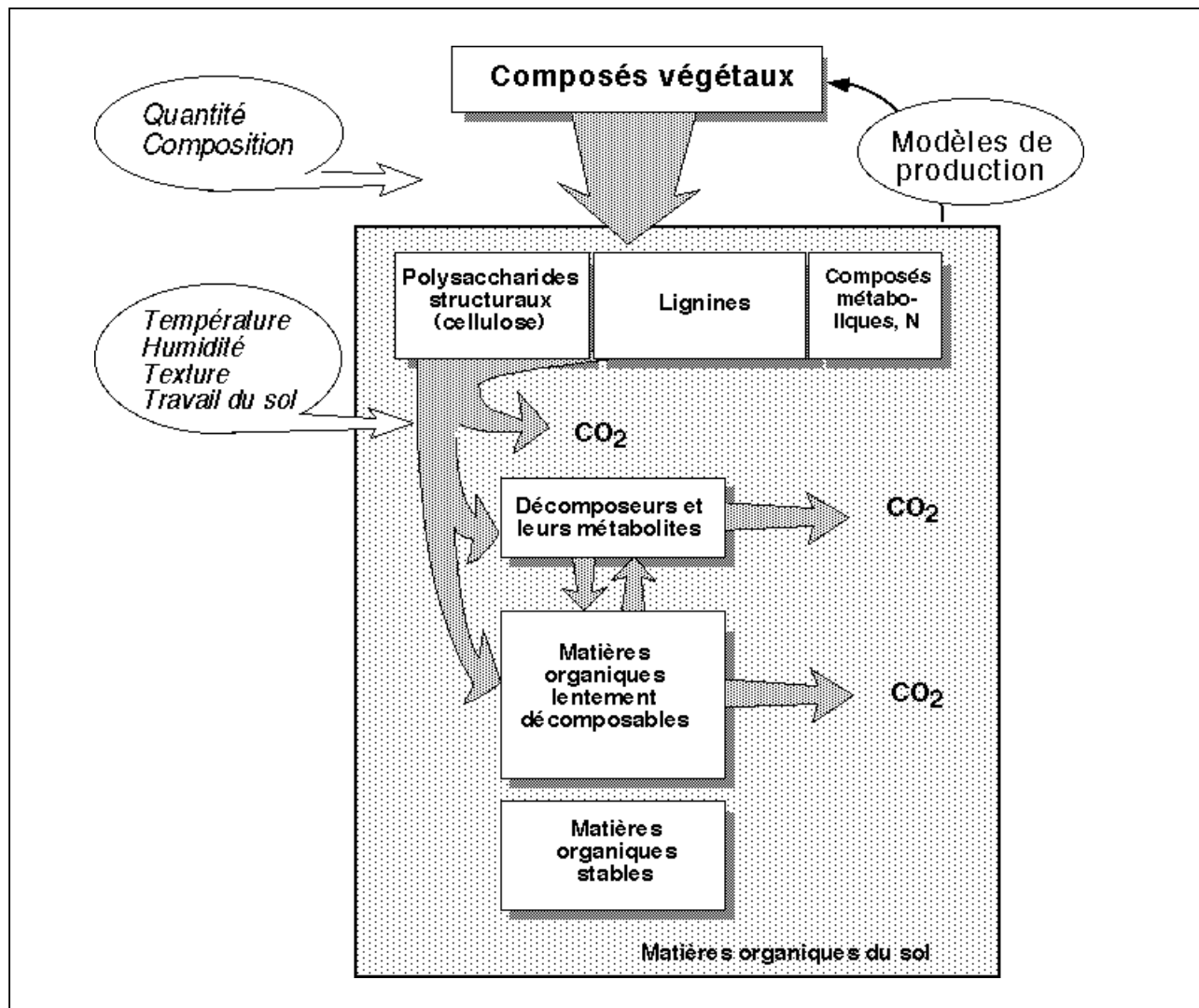
tité dans le sol est minime, mais il accueille environ 75 % de l'apport annuel. Le reste peut être réparti en trois compartiments d'âges moyens respectifs 4 ans, 40 ans et plus de 1 000 ans. Ils représentent en moyenne 15, 65 et 20 % du carbone du sol. Ces valeurs sont bien sûr affectées par le type de sol et le climat. Les mêmes outils isotopiques peuvent être appliqués aux tentatives d'identification et d'isolation de ces compartiments. Les méthodes de fractionnement physique des matières organiques, telles les méthodes de fractionnement densimétrique (Hénin et al., 1959) ou granulométrique (Feller, 1979, Balesdent et al., 1991) permettent une assez bonne isolation du compartiment de durée de vie de quelques années, essentiellement composée de débris végétaux fins. En revanche, le compartiment stable ne paraît pas isolable actuellement.

La même méthode isotopique a aussi confirmé que les racines sont sûrement la source majeure de matières organiques des sols. Dans les cultures de maïs, pourtant réputées avoir une production souterraine faible, l'apport aux matières organiques du sol par les racines est supérieur à l'apport par les tiges et les feuilles, alors que les biomasses respectives sont dans un rapport de moins de 1 à 2 (Balesdent et Balabane, 1996). Le bilan est expliqué par la rhizodéposition continue de carbone pendant la croissance de la plante, par une teneur en lignine relativement élevée et en azote faible dans les racines par rapport aux feuilles et tiges, enfin par l'injection directe des matières organiques dans la matrice minérale du sol, qui peut les protéger de la biodégradation.

Modélisation

Cet ensemble de connaissances sur la dynamique du carbone est naturellement synthétisé par la modélisation. La modélisation de la dynamique des matières organiques a été récemment discutée par Mary et Guérif (1994). Les principaux modèles de la communauté internationale ont récemment été com-

Figure 5 - Architecture générale des modèles actuels de simulation mathématique de la dynamique du carbone des sols.
 Figure 5 - General architecture of current compartmental soil organic carbon models.



parés entre eux par Powlson et al. (1996). En France, le modèle de Hénin et Dupuis, tel qu'il est décrit par Rémy et Marin-Lafèche (1976) est classiquement utilisé en agriculture pour le bilan du carbone des sols (Boiffin et al., 1986). Ce modèle à un compartiment relie les vitesses de destruction des matières organiques au type de sol et les quantités de matières organiques formées au type de culture et de conduite. Le modèle bénéficie de nombreuses références, et le traçage naturel par le carbone 13 l'a validé globalement dans le cas des monocultures de maïs. La plupart des modèles plus récents (Powlson et al. 1996) ont une architecture du type de celle décrite figure 5. L'exemple typique, et le plus ancien de

cette génération, est le modèle de Jenkinson (Jenkinson et al., 1992), développé à Rothamsted en Grande-Bretagne. Les matières organiques y sont réparties en plusieurs compartiments suivant chacun une décomposition du premier ordre. Les vitesses de décomposition y sont fonction de la température, de l'humidité du sol, éventuellement du mode d'usage (travail du sol). Les apports au sol sont répartis entre les compartiments en fonction de la nature chimique de la végétation ou des amendements. Ensuite, les produits décomposés sont répartis en CO_2 , en produits microbiens et en composés lents (humiques ou protégés). Ce partage est déterminé principalement par la texture du sol. La production de carbone par les

racines doit être estimée. Les équations différentielles sont linéaires (les flux sont proportionnels aux quantités) et le modèle est en conséquence le même à toute échelle, sauf si le modèle prévoit une limitation de la biodégradation par l'azote disponible.

Ces modèles sont devenus des outils incontournables de l'analyse des évolutions quantitatives des matières organiques. Concernant leur utilisation pour la prévision en agriculture, le grand nombre de paramètres est un obstacle à leur application. Il sera nécessaire avant de généraliser leur emploi, d'en recaler des paramètres sur les données françaises et le modèle de Hénin et Dupuis. De façon générale, l'utilisation de plusieurs compartiments plutôt qu'un seul, a une conséquence principale pour la prévision. A partir de l'ajustement aux observations sur une durée donnée, l'extrapolation au delà de cette durée par un tel modèle prévoit des états moins éloignés de l'état initial que ne le prévoit le modèle à un compartiment. De plus, la sous-estimation de la contribution des racines (dites restitutions obligatoires) aux matières organiques a pu conduire à une surestimation de la possibilité d'intervenir sur les autres restitutions. Autrement dit, il apparaît, au vu des données récentes, plus difficile de faire varier les réserves organiques à long terme, à la hausse comme à la baisse, en jouant sur les seuls apports organiques, que ne le prévoit le modèle de Hénin et Dupuis.

La nature des matières organiques

A la question « la matière organique du sol, qu'est-ce que c'est ? », il était souvent répondu « on ne sait pas ». Actuellement, la connaissance de la nature chimique des matières organiques a considérablement progressé, en particulier grâce à deux techniques de caractérisation. La résonance magnétique nucléaire (RMN) du carbone 13 renseigne sur l'environnement des atomes de carbone et permet la spéciation en grands groupes fonctionnels : carbone aliphatique (chaînes hydrocarbonées), aromatique, groupements carboxyliques, cétones et alcools, carbone glucidique etc. La méthode a d'ailleurs réévalué la proportion de carbone aliphatique des sols. La pyrolyse et l'analyse couplée des pyrôlysats en spectrométrie de masse (Pyrolyse-Masse) permet, elle, d'identifier des tronçons de molécules et souvent d'en déterminer l'origine biologique. Ces méthodes peuvent de plus être appliquées aux solides, alors que la plupart des méthodes antérieures de caractérisation n'étaient applicables qu'aux parties extractibles.

La microscopie électronique vient compléter l'étude de la dynamique du carbone. Associée aux fractionnements physiques et aux traçages, elle permet de lever en partie l'ignorance cachée autrefois sous le vocable « complexe argilo-humique ». Les associations organo-minérales doivent maintenant être plus perçues comme des microagrégats organiques entourés d'argiles ou des amas organiques insérés entre les particules argileuses que comme des couches

adsorbées sur les surfaces (Feller et al., 1991 ; Chenu, 1996). Il semble aussi que, dans la plupart des milieux, l'humification en phase solide, au sein de débris végétaux et microbiens, prime sur l'insolubilisation de précurseurs solubles.

Nature chimique et dynamique sont peu liées

La nature chimique des matières organiques du sol, bien qu'extrêmement complexe - le nombre de composés rencontrés est quasiment infini - apparaît assez peu sensible au type de gestion du sol. Elle est par exemple très proche dans des systèmes aussi contrastés concernant le statut organique que des prairies et des jachères de longue durée (Capriel et al. 1992). Seules les proportions de quelques molécules du vivant comme les celluloses et les glucides apparaissent varier significativement. Concernant les matières organiques à évolution lente (la majorité dans le sol), la dynamique semble peu corrélée à la nature chimique des composés. Nous avons nous-même comparé la dynamique de différents extraits chimiques, au moyen du traçage isotopique par le carbone 13. Les acides fulviques, acides humiques, humines, les composés hydrolysables et non hydrolysables ont quasiment le même âge dans le sol (Balesdent, 1996). Les composantes les plus labiles et les plus récalcitrantes à la biodégradation se trouvent distribuées dans toutes les fractions. En conséquence, des schémas reliant de façon dynamique ces fractions entre elles, comme par exemple la transformation des acides fulviques en acides humiques, se trouvent invalidés par ces études. Ce faisceau de résultats montre que la variété de nature chimique des matières organiques semble être moins à l'origine de la variété des durées de vie du carbone que la variété des localisations des matières organiques dans les sols et de leur association avec les autres constituants du sol, c'est à dire à la protection physique des matières organiques (Oades, 1995).

La protection physique des matières organiques et l'effet du travail du sol

La protection physique des matières organiques peut être définie comme le ralentissement de la biodégradation des matières organiques par les phases minérales présentes. Les mécanismes supposés sont multiples : adsorption des substrats décomposables sur les surfaces des argiles, des hydroxydes ou d'autres matières organiques, adsorption et inactivation des exo-enzymes sur les surfaces, colonisation bactérienne et migration des enzymes stériquement impossible, conséquences de l'adhésion sur la croissance microbienne, diffusion de l'oxygène et des nutriments ralentie, protection stérique des microorganismes vis-à-vis de leurs prédateurs (protozoaires), etc. Le phénomène a été observé depuis longtemps *in vitro*, en particulier par des méthodes comparant la minéralisation des matières organiques avec et sans dispersion préalable du sol, mais son approche et la

mesure de son expression in situ sont encore attendues (Oades, 1995). Il apparaît que les sites où des quantités importantes de matières organiques pourraient être protégées sont des microagrégats de taille comprise entre 2 et 200 μm (Golchin et al., 1994).

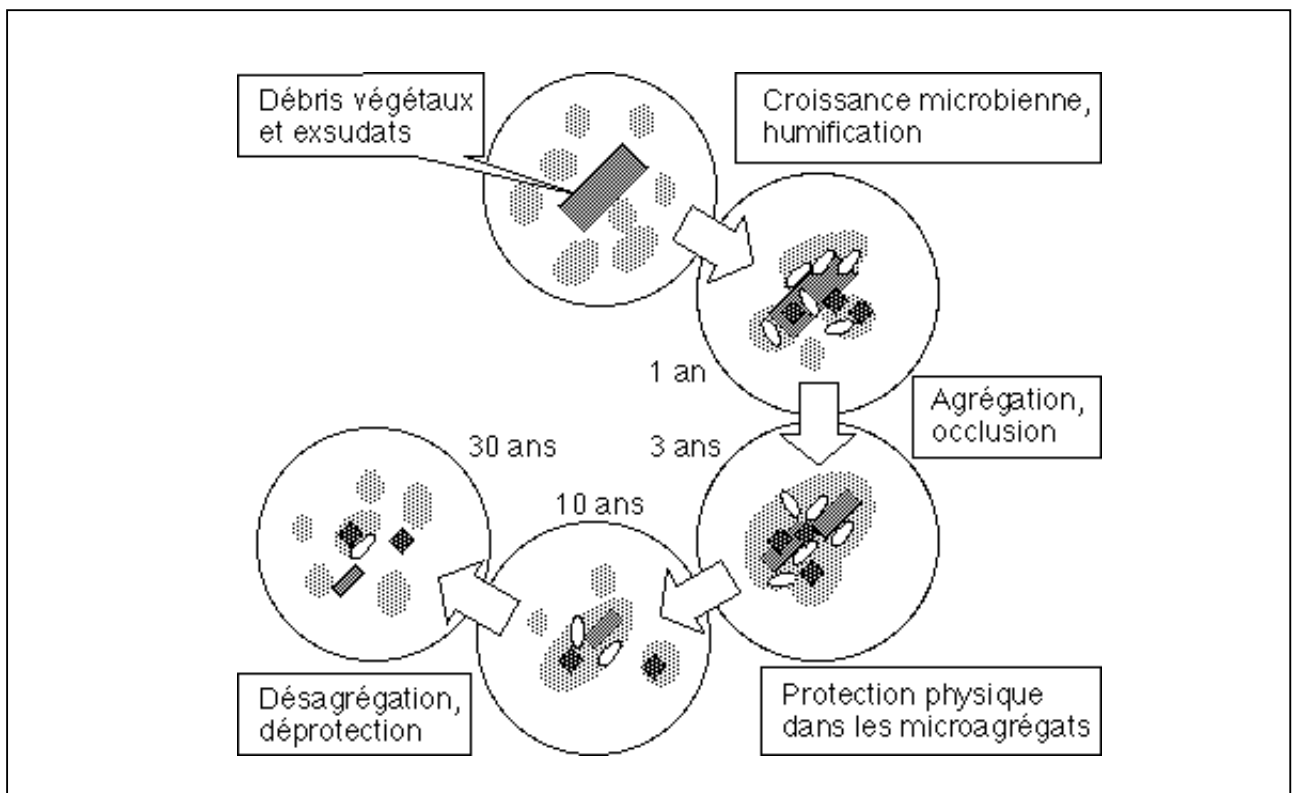
A partir des travaux de ces derniers auteurs et de ceux de Puget et al., (1995) notamment, on peut établir un schéma d'évolution concomitante du devenir des matières organiques et des unités structurales du sol (Figure 6). A leur arrivée dans le sol, les composés végétaux sont rapidement biodégradés. Les composés libérés et formés, en particulier par les microorganismes décomposeurs, agrègent très rapidement le sol autour des débris, qui deviennent inclus dans des agrégats stables. Les matières organiques sont relativement protégées de la biodégradation au sein de ces agrégats. Au fur et à mesure de la biodégradation et de la mortalité microbienne, ces agrégats

perdent leur stabilité et libèrent ensuite les composés organiques, principalement des composés évolués. La protection physique des matières organiques serait ainsi affectée par la stabilité de ces agrégats et par les pressions de destruction auxquelles ils sont sujets.

La protection physique est ainsi invoquée pour expliquer comment le travail du sol peut affecter le stockage des matières organiques. Les essais comparant travail conventionnel du sol (labour) et non travail ou travail minimum font état d'un stockage inférieur sous travail conventionnel (Kern et Johnson, 1993). La tendance apparaît cependant très dépendante de la durée de différenciation des traitements, ainsi que du précédent, selon qu'il était lui-même travaillé ou non. En France les essais de l'Institut Technique des Céréales et des Fourrages, font d'ailleurs état d'une différence de réserve organique faible entre travail et non travail, après 20 ans après

Figure 6 - Schéma établissant les relations réciproques entre la dynamique des matières organiques et leur localisation dans la structure des sols. Les apports végétaux sont rapidement colonisés par les microorganismes. Les produits microbiens et humiques formés agrègent les argiles, les matières organiques sont rapidement incluses dans des agrégats stables. Elles y sont relativement protégées de la biodégradation, d'autant plus que le sol est argileux. Les agrégats perdent ensuite leur stabilité, par la biodégradation elle-même, par l'action des pluies et du travail du sol, les matières organiques sont déprotégées.

Figure 6 - A schematic representation of the reciprocal relationships between organic matter dynamics and organic matter location in the soil structure. Vegetal material is rapidly colonized by microorganisms and included in microaggregates, wherein organic matter is protected. When aggregates loose their stability, due to biodegradation, rain and tillage, organic matter is deprotected.



différenciation et sur des précédents travaillés (Guérif, 1994). En revanche, Loiseau et al. (1995) observent un effet important du travail de sols prairiaux. Les outils de travail du sol, en particulier les herse rotatives, ont un effet direct de rupture des agrégats du sol. Mais c'est surtout le fait que le sol nu, en particulier le lit de semence, soit exposé aux pluies et aux réhumectations brutales, qui peut aboutir à une dispersion presque complète de la partie superficielle du sol, et à une destruction des microagrégats. En raison du retournement annuel de la terre par le labour, chaque année une nouvelle partie et, progressivement, toute la couche travaillée serait touchée. Si le sol n'est plus travaillé, les concentrations en matières organiques augmentent à la surface du sol, tendant à augmenter la résistance des microagrégats aux agents atmosphériques et la protection physique des matières organiques.

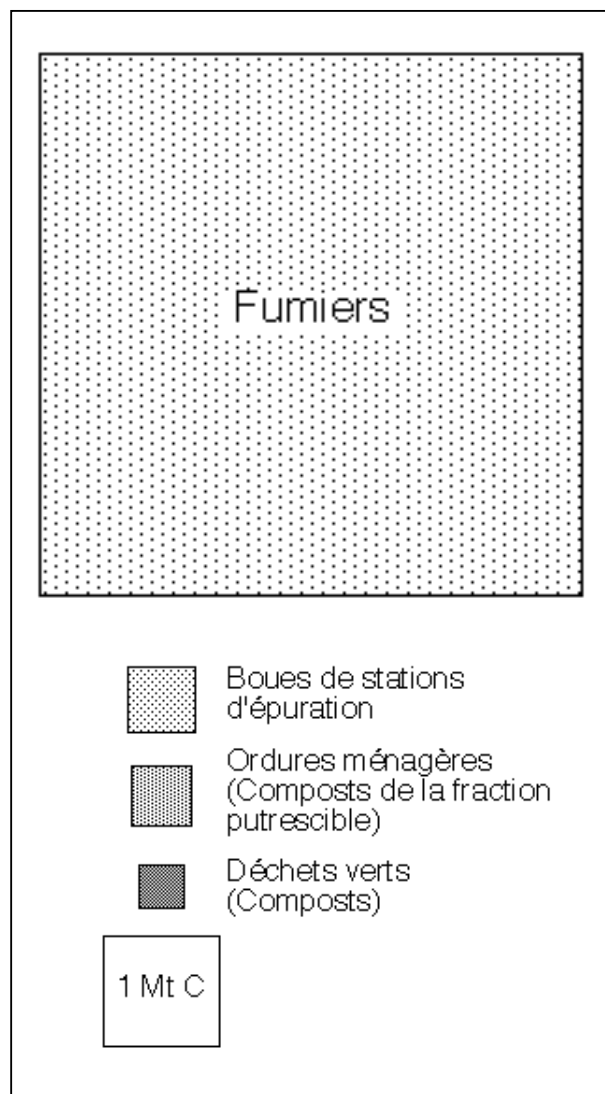
Ces relations réciproques entre dynamique des matières organiques et stabilité de l'agrégation ont des conséquences importantes. Les deux principales hypothèses de départ, à savoir que (i) les matières organiques augmentent la stabilité physique des agrégats où elles se trouvent (ii) les agrégats stables protègent les matières organiques qui y sont incluses, signifient que les matières organiques contribuent à leur auto-protection. Une première conséquence est que toute modification d'un facteur externe du milieu, qui tendrait à faire varier les réserves organiques (niveau des apports, climat, gestion), mettrait en jeu des processus en partie auto-entretenus. Le niveau d'équilibre vers lequel la réserve organique tend à s'établir, en particulier vers les niveaux élevés, serait moins bien déterminé qu'il ne l'est par les seuls facteurs externes, et aussi plus difficilement prévisible. Une autre conséquence de ces hypothèses est la relative asymétrie des évolutions organiques à la hausse et à la baisse (irréversibilité). En effet la déprotection des matières organiques peut provoquer une chute rapide du stock, mais la régénération du niveau de protection initial devra attendre la genèse des nouveaux composés humiques nécessaires à la stabilisation des microagrégats. Concernant l'effet du travail du sol, ceci pourrait expliquer que le labour de sols vierges fasse chuter rapidement les stocks organiques, mais que l'installation de techniques de travail minimum ne fasse remonter les niveaux que très lentement, comme c'est le cas dans les essais français (Guérif, 1994).

Autres causes d'évolution des réserves organiques

Les conséquences de la modification du pH du sol, par chaulage, sur la minéralisation du carbone sont parfois invoquées. Le pH en tant que tel n'affecte que peu l'activité moyenne de minéralisation, même si les populations microbiennes concernées varient. Par exemple, la vitesse de décomposition de feuilles d'épicéas n'est pas modifiée par un chaulage amenant le pH (KCl) du sol de 3,5 à 5,4 (Smolander

Figure 7 - Estimation du gisement de carbone que représentent en 1995 en France les principaux déchets carbonés susceptibles d'être apportés aux sols. Il s'agit du potentiel, si par exemple toutes les ordures ménagères étaient triées et compostées. Le volume des déchets urbains et des déchets verts est estimé sur la base du carbone après compostage, jugé comparable au carbone des fumiers pour le rendement en matières organiques du sol.

Figure 7 - Comparison of the available carbon sources for soil organic carbon management. Potential (not actual) amount for the year 1995 in France



et al, 1996). En revanche, le chaulage de sols acides et alumineux ($\text{pH} < 4$) peut, en augmentant la cristallinité des formes de l'aluminium, libérer les matières organiques copécipitées avec l'aluminium libre. Mais, inversement, le remplacement de H^+ par Ca^{2+} sur la capacité d'échange peut favoriser l'insolubilisation des composés organiques et leur préservation dans le sol. L'effet du pH n'est sûrement pas univoque et reste probablement faible dans les sols non alumineux et dans le domaine 5-8. A Versailles, des parcelles d'essai ont été maintenues sans culture et soumises à des apports massifs de CaO , CaCO_3 , ou à aucun apport, depuis 1928. La teneur initiale en carbone était de 16 mg g^{-1} , elle prenait en 1991 des valeurs peu différentes : 6.6, 7.4 et 6.2 mg g^{-1} , pour des pH de 8.6, 8.3 et 5.5, dans ces trois traitements respectivement (G. Veneau, communication personnelle).

La fertilisation azotée peut augmenter la vitesse de biodégradation du carbone du sol quand l'élément azote est limitant pour les microorganismes et quand les débris végétaux à C/N élevé représentent une part importante de ce carbone (Loiseau et al., 1995). Cet effet de la fertilisation azotée ne semble pas concerner les systèmes non carencés. Sur des sols dont le C/N est de 9 à 10, maintenus avec ou sans apport organique pendant 15 ans, Morel (1984) n'observe aucun effet de l'apport d'azote sur l'évolution du carbone organique. En systèmes prairiaux, la fertilisation augmente généralement la production prairiale et le stockage de carbone (Loiseau et al., 1995).

L'irrigation, augmentant l'humidité estivale du sol, augmente l'activité des organismes et les vitesses de minéralisation du carbone mais la balance avec l'augmentation concomitante de la production carbonée reste à établir (Delphin et Conésá, 1979).

L'activité des vers de terre a été décrite récemment comme diminuant la vitesse de minéralisation du carbone du sol. Si les vers consomment une petite partie, facilement biodégradable, du carbone ingéré, le reste apparaît protégé de la biodégradation, par association avec les particules minérales et protection physique au sein des déjections (Martin, 1991). La culture intensive réduisant les populations de vers, il y a là un autre élément pouvant expliquer la baisse des réserves organiques associée à la mise en culture.

IMPLICATIONS POUR LA GESTION DES MATIÈRES ORGANIQUES

Si le rôle des matières organiques est crucial et facilement chiffrable en termes économiques dans l'agriculture tropicale et les agricultures à faibles intrants, il n'en est pas toujours de même dans l'agriculture moderne en France et en Europe de l'Ouest. Le gain potentiel d'une gestion organique est difficile à évaluer. Ainsi, au sein de certains systèmes de production comme les systèmes céréaliers intensifs, le gain ou la baisse

de charges qu'apporteraient les matières organiques apparaît souvent ne pas dépasser le coût de leur achat ou de leur conservation. L'agriculture s'est ainsi largement affranchie du besoin en matières organiques à partir des années 70. Le cadre économique semble cependant changer : des données nouvelles comme la prise en compte du coût des externalités environnementales, une évolution de la demande des consommateurs, le souci de maintenir l'aptitude des sols à des changements de systèmes de production, la prise en compte de scénarios à plus long terme, etc., peuvent prendre de plus en plus d'importance et faire réévaluer le bénéfice des matières organiques.

Les « nouveaux » déchets carbonés

Les déchets carbonés urbains, principalement les boues de station d'épuration, les composts ménagers et les composts de déchets d'espaces verts, apparaissent comme une source croissante de carbone disponible pour l'agriculture, du fait de l'interdiction de leur mise en décharge. L'intérêt agronomique de ces déchets est certain, qu'il s'agisse de sources d'éléments nutritifs ou d'amendements organiques proprement dits, mais l'évaluation des risques de pollutions associés à leur utilisation et le calcul économique sont encore à faire. Cependant, le potentiel de ces déchets pour gérer la réserve organique des sols à grande échelle reste faible. Nous avons fait nous-même une estimation rapide de ce gisement de carbone, d'après des données ADEME. L'ensemble de ces déchets représente en tout moins de 10 % de la masse de carbone des fumiers produits dans les bâtiments d'élevage (Figure 7), qui représentent eux-mêmes moins de 20 % du carbone des restitutions des cultures. Il est possible que les déchets agro-industriels offrent un potentiel quantitativement plus important que les déchets urbains, mais leur nature est très diverse, leur valeur agronomique et les risques restent à établir.

Gérer les matières organiques

Les moyens dont dispose l'agriculture pour contrôler les réserves organiques sont limitées. Il peut s'agir soit d'augmenter les apports de carbone soit d'en limiter les sorties. Concernant le contrôle des apports, les choix possibles sont ceux de l'exportation ou de l'importation de paille, le choix de la répartition spatiale des fumiers sur les différentes parcelles pour les exploitations en disposant, et concernant les exploitations sans élevage, l'accueil ou l'achat de fumiers, de déchets carbonés d'origine urbaine ou d'amendements carbonés dérivés de ceux-ci. Le principal coût dans l'importation de carbone étant le transport, l'utilisation des déchets ne peut être que locale. Augmenter les intrants carbonés peut aussi passer par les pratiques qui augmentent la production primaire restituée au sol, telles que les pratiques de cultures dérobées ou, plus encore, de cultures non récoltées (engrais vert, diverses jachères cultivées). Le poids de la gestion organique dans la

prise de décision des pratiques reste souvent faible. Concernant la rentabilité économique de cette gestion, il n'y a pas de réponse unique. Devant la diversité des sols, de la sensibilité de leurs propriétés aux réserves organiques, devant la diversité des systèmes de production et des coûts du carbone disponible, les réponses ne peuvent être que régionales.

Devant les possibilités limitées d'augmenter les masses de carbone organique disponible, l'agriculture peut jouer sur les vitesses de destruction des matières organiques. Dans l'état actuel des connaissances, la réduction du travail du sol apparaît comme le principal candidat pour limiter la minéralisation, et bien sûr augmenter la stabilité des couches de surface. Elle est largement pratiquée aux Etats-Unis (27 %) dans une politique de conservation des sols, mais encore très peu en France. Les expérimentations françaises de conversion de travail conventionnel en travail réduit suggèrent des effets sur la réserve organique à très long terme seulement (plus de 20 ans) mais montrent un effet rapide sur la teneur en carbone des couches de surface (Guérif, 1994). En systèmes fourragers, la continuité des prairies et la limitation du travail du sol permettent aussi de conserver les réserves organiques (Loiseau et al., 1995). C'est d'ailleurs sûrement au moment de la mise en culture de sols vierges, ou au moment des retournements de prairies que l'on peut le mieux préserver le capital matières organiques.

CONCLUSION

Le capital matières organiques des sols est-il menacé ? Les réserves organiques des sols sont peut-être plus élevées actuellement qu'elles ne l'étaient au début du siècle, en raison de l'augmentation de la productivité agricole. Cependant de nombreux indicateurs font suspecter des teneurs à la baisse depuis les deux dernières décennies. On sait d'une part que l'intensification du travail du sol tend à augmenter les vitesses de destruction des matières organiques et d'autre part que l'agriculture optimise la part de la production primaire carbonée destinée à l'exportation de l'agrosystème par rapport à la part qui arrive au sol. Cette dernière tendance ira sûrement en augmentant et il est probable qu'une politique de gestion des matières organiques apparaisse de plus en plus utile. Comme les autres mesures d'accompagnement agro-environnementales, celle-ci devrait être raisonnée à l'échelle du paysage. Les durées et la faible réversibilité d'évolution des processus (il faut peut-être 100 ans pour qu'un sol gagne la quantité de carbone qu'il perd en 30 ans de mise en culture) doivent faire envisager les matières organiques du sol, non pas seulement comme un capital, mais aussi comme un patrimoine.

BIBLIOGRAPHIE

- Arrouays D., Kicin J.-L., Péliissier P. et Vion I., 1994 - Evolution des stocks de carbone des sols après déforestation : Analyse spatio-temporelle à l'échelle d'un paysage pédologique. *Etude et Gestion des Sols*, 1 (2) : 7-15.
- Balesdent J., 1991 - Estimation du renouvellement du carbone des sols par mesure isotopique ^{13}C . Précision, risque de biais. *Cahiers ORSTOM série Pédologie*, 26 (4) : 315-326.
- Balesdent J., 1995 - Stockage de carbone dans les sols en fonction de leur utilisation. pp 37-45 in : « Agriculture et gaz à effet de serre » (Perrier, A. coord.). *Dossiers de l'Environnement de l'INRA n°10*, INRA, Paris.
- Balesdent J., 1996 - The significance of organic separates to carbon dynamics and its modelling in some cultivated soils. *European Journal of Soil Science*, 47 : 485-493.
- Balesdent J. et Balabane M., 1996 - Major contribution of roots to soil carbon storage inferred from maize cultivated soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 28 : 1261-1263.
- Balesdent J., Pétraud J.-P. et Feller C., 1991 - Effets des ultrasons sur la distribution granulométrique des matières organiques des sols. *Science du sol.*, 29, 95-106.
- Boiffin J. et Fleury A., 1974. Quelques conséquences agronomiques du retournement des prairies permanentes. *Annales Agronomiques* 25 (4) : 555-573.
- Boiffin J., Kéli-Zagbahi J. et Sébillotte M., 1986 - Systèmes de culture et statut organique des sols dans le Noyonnais : applications du modèle de Hénin et Dupuis. *Agronomie*, 6 : 437-446.
- Burke I.C., Yonker C.M., Parton W.J., Cole C.V., Flach K. et Schimel D.S., 1989 - Texture, climate and cultivation effects on soil organic matter content in U.S. Grassland soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53 : 800-805.
- Capriel P., Härter P. et Stephenson D., 1992 - Influence of management on organic matter in a mineral soil. *Soil Science*, 153 : 122-128.
- Cerri C., Feller C., Balesdent J., Victoria R. et Plenecassagne A., 1985 - Application du traçage isotopique naturel en ^{13}C à l'étude de la dynamique de la matière organique dans les sols. *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences*, Paris, 300 : 423-428.
- Chenu, C. - Organo-mineral associations in clay fractions of soils : an analytical transmission electron microscopy approach. *Second Internat. Symposium ISMOM : Incidence des interactions minéraux-composés organiques-microorganismes sur la qualité des sols et des eaux*. Nancy, France. 3-6 sept 1996.
- Colomb B., Picard D. et Tomassone R., 1989 - Les banques de données et leur utilisation, pp 185-206 in : « Fertilité et systèmes de production » (M. Sébillotte ed.). INRA Editions, Paris.
- Delphin J.E. et Conésa A., 1979 - Evolution de la matière organique du sol d'un essai rotations, irrigation, restitution de pailles dans la plaine de la Hardt. I. Etat des réserves organiques *Annales Agronomiques* 30 (2) : 167-178.
- Demonet M. 1987 - Tableau de l'agriculture française au milieu de 19è siècle. Editions de l'Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales. Paris. 305 p.
- Doran J.W., Sarrantino M. et Liebig M.A., 1996 - Soil health and sustainability. *Advances in Agronomy* 56 : 1-54.
- Fardeau J.-C., Guiraud G., Thiery J., Morel C. et Boucher B., 1988 - Taux net de minéralisation de la matière organique des sols de grande culture de Beauce. Conséquences pour l'Azote C.R. Acad. Agric. Fr., 74 (8) : 61-70.
- Feller C., 1979 - Une méthode de fractionnement granulométrique de la matière organique des sols : application aux sols tropicaux à texture grossière, très pauvres en humus. *Cahiers ORSTOM, série Pédologie*, 17 : 339-346.

- Feller C., François C., Villemin G., Portal J.-M., Toutain F. et Morel J.-L., 1991 - Nature des matières organiques associées aux fractions argileuses d'un sol ferrallitique. *C. R. Acad. Sci. Paris série II*, 312 : 1491-1497.
- Golchin A., Oades J.M., Skjemstad J.O. et Clarke P., 1994 - Soil structure and carbon cycling. *Australian Journal of Soil Research*, 32 : 1043-1068.
- Guérif J., 1994. Influence de la simplification du travail du sol sur l'état structural des horizons de surface : conséquences sur leurs propriétés physiques et leurs comportement mécanique. pp 13-33 in « Simplification du travail du sol » (Monnier et al., Eds) Les colloques de l'INRA n°65. INRA Editions, Paris.
- Harter R.D. et Naidu R., 1995 - Role of metal-organic complexation in metal sorption in soils. *Advances in Agronomy*, 55 : 219-263.
- Hénin S., Monnier G. et Turc L., 1959 - Un aspect de la dynamique des matières organiques du sol. *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences*, Paris, 248 : 138-141.
- Houghton R.A., 1995 - Balancing the global carbon cycle with terrestrial ecosystems. In : « The role of non-living organic matter in the Earth's carbon cycle » (Zepp R. G. et Sonntag Ch., eds) pp.133-152. Dahlem Workshop reports, John Wiley and Sons, New York.
- Jenkinson D.S., Harkness D.D., Vance E.D., Adams D.E., and Harrison A. F., 1992 - Calculating net primary production and annual input of organic matter to soil from the amount and radiocarbon content of soil organic matter. *Soil Biol. Biochem.* 24 : 295-308.
- Jolivet C., Arrouays D., Andreux F. et Lévêque J., 1997 - Soil organic carbon dynamics in cleared temperate forest spodosols converted to maize cropping. *Plant and Soil* in press.
- Kern J.S. et Johnson M.G., 1993 - Conservation tillage on National soil and atmospheric carbon levels. *Soil Sci. Am. J.* 57 : 200-210.
- Loiseau P., Soussana J.-F., Casella E. et Chaussod R., 1995 - Evolution des stocks de matières organiques sous prairies. pp 57-77 in : « Agriculture et gaz à effet de serre » (Perrier, A. coord.). Dossiers de l'Environnement de l'INRA n°10, INRA, Paris.
- Maillard P. et Bonhomme R., 1995 - Utilisation des isotopes stables pour l'étude du fonctionnement des plantes. INRA Editions Paris. Les colloques n°70. 360 p.
- Martin A., 1991 - Short- and long-term effects of the endogenic earthworm *Millsonia anomala* (Omodeo) (Megascolecidae, Oligochaeta) of tropical savannas, on organic matter. *Biology and Fertility of Soils*, 11 : 234-238.
- Mary B. et Guérif J., 1994 - Intérêt et limites des modèles de prévision de l'évolution des matières organiques et de l'azote dans le sol. in. *Cahiers Agricultures*, 3 : 247-257.
- Ministère de l'Agriculture, de la Pêche et de l'Alimentation, 1996a - 25 ans de Statistique Agricole Annuelle Rétrospective 1970-1994. AGRESTE Données chiffrées n°79, Février 1996.
- Ministère de l'Agriculture, de la Pêche et de l'Alimentation, 1996b - L'utilisation du territoire en 1995. AGRESTE Données chiffrées n°80, Mai 1996.
- Ministère de l'Agriculture et de la Forêt, 1991 - Un siècle et demie d'élevage en France AGRESTE Analyse et études n°8, Mai 1991.
- Morel R., 1984 - Les essais de fertilisation de longue durée de la station agronomique de Grignon. INRA-INAPG, Paris, 336 p.
- Nys C., Dupouey J. L. et Balesdent J., 1995 - Cycle du carbone dans l'écosystème forestier : impact du milieu et de la sylviculture sur les immobilisations et les flux. pp 49-55 in : « Agriculture et gaz à effet de serre » (Perrier, A. coord.). Dossiers de l'Environnement de l'INRA n°10, INRA, Paris.
- Oades J.M., 1995 - An overview of processes affecting the cycling of organic carbon in soils. pp 293-303 in : « The role of non-living organic matter in the Earth's carbon cycle » (R.G. Zepp et C. Sonntag eds). Dahlem Workshop reports, John Wiley and Sons, New York.
- Plénet D., Lubet E. et Juste C., 1993 - Evolution à long terme du statut carboné du sol en monoculture non irriguée de maïs (*Zea mays* L.). *Agronomie* 13 : 685-698.
- Powlson D.S., Smith P. et Smith J.W., 1996 - Evaluation of soil organic matter models. Springer Verlag, Berlin, 429 p.
- Puget, P., Chenu, C. and Balesdent, J., 1995 - Total and young organic carbon distributions in aggregates of silty cultivated soils. *Eur. J. Soil Sci.*, 46 : 449-459.
- Rémy J.C. et Marin-Lafèche A., 1976 - L'entretien organique des terres. *Coût d'une politique de l'humus. Entreprises À Agricoles nov 1976* : 63-67.
- Sébillotte M., 1989 - Fertilité et systèmes de production. INRA Editions, Paris, 370 p.
- Sébillotte M., Keli-Zagbahi, J. et Boiffin J., 1989 - L'agriculteur et l'entretien organique de ses parcelles, pp 344-359 in : « Fertilité et systèmes de production » (M. Sébillotte ed.). INRA Editions, Paris.
- Smolander A., Kitunen V., Paavolaainen L. et Mälkönen E., 1996 - Decomposition of Norway spruce and Scots pine needles : effect of liming. *Plant and Soil* 179 : 1-7.
- Thimonier A. et Dupouey J.-L., 1992 - Changes in the forest ground layer vegetation : an example of terrestrial eutrophication. pp 930-931 in : « Responses of forest ecosystems to environmental changes » (Teller, Mathy et Jeffers eds.). Elsevier, London.
- Tiessen H., Cuevas E. et Chacon P., 1994 - The role of soil organic matter in sustaining soil fertility. *Nature*, 371 : 783-785.
- Walter C., Bouedo T. et Arousseau P., 1995 - Cartographie comunale des teneurs en matière organique des sols bretons et analyse de leur évolution temporelle de 1980 à 1995. Rapport Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie, Rennes, 30 p.