

Estimation des quantités de matière organique exogène nécessaires pour restaurer et entretenir les sols limoneux français à un niveau organique donné

M. Le Villio⁽¹⁾, D. Arrouays⁽²⁾, W. Deslais⁽²⁾, J. Daroussin⁽³⁾, Y. Le Bissonnais⁽³⁾ et D. Clergeot⁽¹⁾

(1) CReeD, Zone Portuaire de Limay, 291 Avenue Dreyfous Ducas, 78520 Limay

(2) Unité Infosol, INRA Orléans, 45160 Ardon

(3) Unité de Science du Sol, INRA Orléans, 45160 Ardon

RÉSUMÉ

Les phénomènes de dégradation physique des sols que sont la battance et l'érosion diffuse se multiplient en France. Pour les sols de texture limoneuse, la diminution du taux de matière organique à des teneurs inférieures à 2 ou 3 %, souvent observée dans les sols cultivés au cours des dernières décennies est un des paramètres déterminants de cette dégradation.

Face à ce constat, nous avons cherché à chiffrer les quantités de matière organique exogène qu'il serait nécessaire d'apporter pour relever, à un niveau donné, les taux de matière organique des sols sensibles aux phénomènes de battance et d'érosion.

Nous avons réalisé cette estimation pour différents seuils de teneurs en carbone compris entre 1 et 1,5 % et comparé localement, les quantités calculées aux quantités de matière organique exogène disponibles. Parmi celles-ci, les fumiers et les composts d'origine urbaine représentent les sources les plus importantes.

Les premiers résultats font apparaître des déficits de l'offre locale en matière organique exogène, notamment en Picardie, Aquitaine, Ile-de-France, Nord-Pas-De-Calais et Midi-Pyrénées.

Les tests réalisés montrent par ailleurs que les prédictions sont très sensibles, d'une part aux seuils visés et d'autre part à la calibration du modèle (valeurs des coefficients de minéralisation K2).

Mots clés

Sol, matière organique, amendements organiques, érosion, modélisation, cartographie, France

SUMMARY

ESTIMATING THE AMOUNTS OF EXOGENOUS ORGANIC MATTER NEEDED TO RESTORE AND MAINTAIN FRENCH LOAMY SOILS TO A GIVEN ORGANIC LEVEL

Soil physical degradation by crusting and erosion is an increasing problem in France. For loamy soils, a decrease of soil organic matter

contents under a threshold value of about 2-3 % is one of the main controlling factors of this degradation. Thus, we tried to assess which amounts of exogenous organic matter would be necessary to restore and maintain the organic matter contents of loamy soils under significant erosion risk. These estimates were made for threshold values ranging from 1 to 1.5 % of organic carbon, then compared to locally available amounts of farm manure. Amongst the different exogenous organic amendments, manures and composts are the largest available sources. Results show local lacks of organic amendments in some french regions. The sensitivity analysis shows that the reliability of predictions is highly dependant both from the target threshold value and the calibration of model parameters (mineralisation coefficients).

Key-words

Soil, organic matter, organic amendments, erosion, modelling, mapping, France.

RESUMEN**ESTIMACIÓN DE LA CANTIDAD DE MATERIA ORGÁNICA EXÓGENA NECESARIA PARA CONSERVAR Y MANTENER LOS SUELOS LIMOSOS FRANCESES A UN DETERMINADO NIVEL ORGÁNICO**

Los fenómenos de degradación física del suelo, el encostramiento y la erosión difusa, tienen cada vez más relevancia en Francia. Para los suelos de textura limosa, una disminución del contenido de materia orgánica con valores inferiores a 2 o 3 %, frecuentemente observada en las últimas décadas, es uno de los parámetros determinantes de esta degradación física del suelo.

Frente a esta constatación, se quiso cifrar la cantidad de materia orgánica de origen exógeno que sería necesaria aportar para elevar, a un nivel determinado, los contenidos en materia orgánica de los suelos sensibles a los fenómenos de encostramiento y erosión.

Esta estimación se llevó a cabo para distintos contenidos de carbono comprendidos entre 1 y 1,5 % y se comparó con las cantidades disponibles en materia orgánica exógena. Entre ellos, el estiércol y el compost de origen urbano representan las fuentes principales.

Los primeros resultados muestran un déficit en la oferta local en materia orgánica exógena, particularmente en Picardía, Aquitania, Ile-de-France, Nord-Pas-De-Calais y Midi-Pyrénées.

Los ensayos realizados indican que los resultados son muy sensibles, por un lado a los distintos niveles de carbono estudiados y por otro a la calibración del modelo (valores de los coeficientes de mineralización K₂)

Palabras claves

Suelo, materia orgánica, abonos orgánicos, erosión, modelización, cartografía, Francia.

Cinq mille huit cent douze dossiers de demande de reconnaissance de l'état de "catastrophe naturelle" correspondant à des coulées de boues ont été déposés entre 1985 et 1995, ce qui représente, en considérant la totalité des surfaces concernées, une moyenne de plus d'un événement de ce type pour 100 km² en 10 ans (IFEN, 1999). Ces coulées de boues sont la conséquence directe de l'érosion sur les sols en pente lorsque la pente est supérieure à 5 %, (Robert, 1996) mais également des phénomènes de dégradation physique des sols que sont la battance et l'érosion diffuse. On estime actuellement à plus de 5 millions d'hectares les surfaces soumises à l'érosion en France et ces phénomènes se multiplient, particulièrement dans le Nord-Pas-de-Calais, la Picardie et la Seine maritime (Robert, 1996; Le Bissonais *et al.*, 1998).

La battance et l'érosion diffuse ont pour origine un sol à structure instable sur lequel une forte pluie (plus de 30 ou 40 mm/heure, Robert, 1996) provoque l'éclatement des agrégats du sol. Les particules ainsi détachées des agrégats viennent colmater les interstices de la structure et forment une croûte superficielle, dite de battance. L'eau ne pouvant plus s'infiltrer ruisselle sur cette croûte. Le ruissellement provoque une érosion diffuse qui peut se transformer en érosion localisée selon des chemins privilégiés: lignes de plus grande pente, raies de labour, de semis ou de passage de roues des matériels agricoles, et entraîner la formation de rigoles et de ravines.

Les principales caractéristiques des sols qui influencent la stabilité structurale sont:

- d'une part, la texture du sol (une texture limoneuse présente des risques d'érosion diffuse si elle contient moins de 15 % d'argile, Robert, 1996) et
- d'autre part, la diminution du taux de matière organique à des teneurs inférieures à 2 ou 3 % (Le Bissonais et Arrouays, 1997) qui provoque une diminution de la stabilité des agrégats à l'eau.

Pour les sols de grandes cultures des régions tempérées d'Europe de l'ouest, la matière organique est un des paramètres déterminants de la stabilité structurale (Le Bissonais et Le Souder, 1995).

Or, plusieurs études locales font état d'une baisse des taux de matières organiques dans les sols cultivés au cours des dernières décennies, associée à l'augmentation des phénomènes de dégradation. Balesdent (1996) a recensé plusieurs études dans lesquelles cette baisse a été constatée lors d'une mise en culture mais aussi parfois lorsque l'usage des sols n'a pas changé: mise en monoculture de maïs des forêts-landes de pins maritimes dénommées touyas (baisse de plus de 50 % des réserves organiques en 35 ans) (Arrouays *et al.*, 1994), baisse de la teneur moyenne de 4 % à 2 % de matière organique au sein d'une exploitation céréalière de la Beauce entre 1971 et 1987 (Fardeau *et al.*, 1988).

Cette baisse des teneurs en matière organique est essentiel-

lement due à l'intensification et aux pratiques culturales qui y sont associées et notamment à l'augmentation de la profondeur des labours qui dilue la matière organique avec l'horizon sous-jacent. Mais les principales évolutions des stocks organiques au niveau national sont surtout liées aux changements d'usage des sols (Balesdent et Arrouays, 1999) et notamment à la spécialisation de l'agriculture avec: la suppression des élevages et donc des épandages de fumier, la suppression des rotations fourragères, le développement de cultures faiblement restitutrices d'humus comme la betterave ou la pomme de terre ou le remplacement de la prairie par la culture.

Deux grands types de solutions peuvent être proposés pour lutter contre ces phénomènes:

- réduire les pertes de matière organique par minéralisation et provoquer une augmentation relative de concentration en surface en réduisant la fréquence et la profondeur de travail du sol (travail superficiel, non labour, semis direct, "conservation tillage", Kern et Johnson, 1993) et,
- augmenter les apports en gérant au mieux les rotations et les résidus de récolte et/ou en recourant à des apports exogènes de matière organique susceptibles d'augmenter les teneurs en matière organique des sols et d'agir sur la stabilité structurale (fumier, composts d'origine urbaine, amendements organiques du commerce).

On distingue en effet plusieurs types de matières organiques qui ont des effets différents sur la structure du sol:

- les matières organiques labiles qui ont un effet intense mais fugace (quelques semaines pour un engrais vert, quelques mois pour une paille, Guéris, 1982),
- les matières organiques stabilisées qui ont un effet à long terme,
- les matières organiques très stables qui sont relativement peu actives.

Ainsi, les composés préhumiques transitoires, formés au cours des premiers stades d'évolution de la matière organique, ont un effet très fort sur la stabilité structurale (Guéris, 1982). L'apport de ce type de matière organique facilement dégradable stimule l'activité microbiologique. Les sécrétions de ces microorganismes diminuent la mouillabilité des parois des pores du sol et en augmentent ainsi la résistance à la désagrégation par l'eau.

Mais ces substances sont rapidement dégradables (Soltner, 2000) et leur effet est de courte durée: pour un engrais vert: l'effet est maximum 15 jours après son enfouissement et disparaît en 2 mois (Guéris, 1982).

Les matières organiques stabilisées à décomposition lente ont, elles, un effet à long terme en favorisant les phénomènes d'agrégation et de cimentation des particules du squelette (Guéris et Boiffin, 1993).

Guéris (1982) a synthétisé ces durées d'effet sur la stabilité structurale des sols pour différents résidus organiques.

L'objectif de cette étude est de chiffrer les quantités de matière

organique exogène stabilisée qu'il serait nécessaire d'apporter pour relever, à un niveau donné, les taux de matière organique des sols sensibles aux phénomènes de battance et d'érosion.

Nous ne retenons ici comme source exogène de matière organique que les amendements stabilisés, car eux seuls permettent de relever de façon pérenne les taux de matière organique des sols. Les autres sources de matières organiques telles que les lisiers, fientes, boues... sont des matières labiles qui n'ont qu'un effet fugace. Ainsi, aux doses préconisées, les boues n'ont qu'un effet très faible sur les stocks organiques des sols (Chaussod, 1996).

Nous avons réalisé cette estimation pour différents seuils de teneurs en carbone compris entre 1 et 1,5 %. A partir de ces calculs, nous avons comparé, localement, les quantités définies aux quantités de matière organique exogène disponibles susceptibles d'agir à long terme sur la stabilité structurale, afin de déterminer si une telle stratégie de relèvement des taux faisait apparaître un manque de matière organique en France ou s'il suffisait d'épandre au plus juste les différentes sources d'amendement disponibles.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Seuil de teneur en carbone

En présence d'une texture limoneuse, le seuil de carbone en dessous duquel les risques d'instabilité structurale apparaissent est sujet à discussion, mais il est généralement admis comme étant compris entre 1 et 1,5 % de carbone (Greenland *et al.*, 1975; Grieve, 1980; Newbould, 1980; De Ploey et Poesen, 1985; Albrecht *et al.*, 1992; Le Bissonnais et Arrouays, 1997). Compte tenu de cette incertitude sur le seuil à retenir, nous avons réalisé cette estimation pour différents seuils de teneur en carbone compris entre 1 et 1,5 %.

Zone d'étude et estimation des surfaces concernées

Nous avons concentré notre étude sur les zones de grandes cultures à texture limoneuse et faible teneur en matière organique qui présentent un risque d'érosion important. Pour réaliser une estimation et une cartographie de ces surfaces nous avons réalisé un croisement géographique des bases de données géographiques suivantes :

- La carte de l'intensité de l'aléa d'érosion des sols de France (Le Bissonnais *et al.*, 1998) : ALEA D'ÉROSION,
- La base de données CORINE Land Cover (Collectif, 1993),
- La base de données des teneurs en carbone organique des sols de France (Arrouays *et al.*, 1999) : CARBONE,
- La base géographique des sols de France au 1 : 1 000 000 (Jamagne *et al.*, 1995, King *et al.*, 1999) : SOL.

Le modèle aléa érosif des sols en France (IFEN 1999, Le

Bissonnais *et al.*, 2000) permet une cartographie exhaustive de l'aléa érosif à l'échelle de la France. L'aléa érosif est défini comme la probabilité d'occurrence du phénomène d'érosion, il se distingue du risque d'érosion qui implique, lui, des conséquences pour l'environnement. Le modèle prend en compte différents types de processus érosifs régionaux :

- érosion automnale et hivernale en région de grandes cultures sur des terrains nus ou peu couverts,
- érosion lors des orages de printemps et d'été sur des régions de cultures intensives,
- érosion de vignoble et de verger,
- érosion de montagne, liée à l'instabilité des matériaux parentaux,
- érosion méditerranéenne, dont la spécificité provient d'un climat contrasté.

L'érosion est envisagée uniquement au niveau des surfaces émettrices de particules solides, et non de leur transport ou de leur dépôt. Il s'agit d'un modèle de type "système expert" fondé sur la combinaison de quatre facteurs : le sol, la topographie, l'occupation du sol et le climat. Les paramètres utilisés pour représenter au mieux ces différents facteurs sont la battance, l'érodibilité, l'occupation du sol, la pente, les hauteurs de précipitations ainsi que leur intensité. Afin d'évaluer le risque d'érosion, ces paramètres ont été hiérarchisés et pondérés à partir des connaissances actuelles d'experts sur les différents types de phénomènes érosifs. Ce modèle est qualitatif et non déterministe, car il n'est pas possible de modéliser tous les mécanismes de l'érosion diffuse et linéaire à une échelle supérieure au bassin versant. La méthode de combinaison qui a été choisie permet d'identifier toutes les situations agro-pédo-climato-géomorphologiques possibles. En fonction des observations de terrain et des connaissances actuelles sur les différents types d'érosion, les auteurs ont estimé un risque d'érosion relatif pour chacune de ces situations.

L'objectif est ici, d'identifier, pour une occupation déterminée (terres arables), les combinaisons SOL x TEXTURE x ALEA D'ÉROSION existant sur le territoire, d'en quantifier les surfaces et de les renseigner quant à leur teneur en carbone organique dans le sol.

Délimitation des sols limoneux

Nous avons défini les sols limoneux à partir des éléments de classification suivants :

- les postes de la légende FAO de la base géographique des sols de France et,
- les classes de textures (*tableau 1*).

Les postes de la légende FAO de la base géographique des sols de France ont été réunis en 17 groupes de sols (*tableau 2*).

Nous avons utilisé les classes de texture de surface suivantes :

Sur la base de ces classifications, nous avons considéré comme sols de texture limoneuse, les sols de texture moyenne et les Podzoluvisols et Luvisols de texture moyenne à fine.

Tableau 1 - Classes de textures de surface.**Table 1** - *Textur classes of surface layers.*

(2)	Texture grossière	argile < 18 % et sable > 65 %
(3)	Texture moyenne	18 % < argile < 35 % et sable > 15 %, ou argile < 18 % et 15 % < sable < 65 %
(4)	Texture moyenne à fine	argile < 35 % et sable < 15 %
(5)	Texture fine	35 % < argile < 60 %
(6)	Texture très fine	argile > 60 %

Croisement SOL x ALEA D'EROSION

Nous avons croisé l'information géographique des aléas d'érosion avec la couverture des types d'occupation du sol correspondant au poste "terres arables" (210) de la classification Corine Land Cover, ainsi qu'avec la couverture des types de sol dominants au 1 : 1 000 000, extraite de la base de données géographiques des sols de France.

Croisement SOL x ALEA D'EROSION x "limons"

Nous avons ensuite créé une couverture des zones de terres arables, de texture limoneuse et sous un aléa d'érosion moyen, fort et très fort. Ce croisement a ainsi permis de délimiter et de quantifier les surfaces correspondant aux terres arables de texture limoneuse présentant un aléa d'érosion important.

Croisement SOL x ALEA D'EROSION x "limons" x CARBONE

La couverture obtenue précédemment a été croisée géographiquement avec la couverture des points de mesure de carbone.

Au sein de ces surfaces, et à partir de la base de données ponctuelles de teneurs en carbone organique des sols (environ 17 000 points de mesures sur la France, Arrouays *et al.*, 1999) nous avons calculé la moyenne des teneurs en carbone pour chacune des combinaisons SOL X ALEA D'EROSION. Nous avons également calculé, pour chaque combinaison, le pourcentage de points de mesure inférieurs à un seuil variable de teneur en carbone (de 1 à 1,5 % de carbone). En première approximation, nous avons utilisé ce pourcentage de nombre de points de mesures comme un estimateur du pourcentage de surface dont les teneurs sont inférieures à ce seuil.

Nous avons dû procéder à des regroupements de combinaisons dans certains cas où le nombre de valeurs mesurées était trop faible pour obtenir une statistique fiable. Ces zones de faible surface ont dû être rattachées à des zones plus importantes pour permettre un calcul. La logique de ces rattachements s'est effectuée selon des critères hiérarchisés :

- OCCUPATION DU SOL (tous les regroupements correspondent à une seule occupation : les terres arables)

Tableau 2 - Réunion des postes de la légende FAO de la base géographique des sols de France en 17 groupes de sols.**Table 2** - *Grouping of the French soil geographic database FAO legend in 17 groups of soils.*

B: Cambisol	I: Lithosol	P: Podzol	U: Ranker
D: Podzoluvisol	J: Fluvisol	Q: Arenosol	V: Vertisol
E: Renzina	L: Luvisol	R: Regosol	W: Planosol
G: Gleysol	O: Histosol	T: Andosol	Z: Solonchak
H: Phaeozem			

- ALEA D'EROSION (tous les regroupements correspondent à un aléa donné)
- TEXTURE (tous les regroupements correspondent à une classe texturale donnée)
- TYPE DE SOL PARTICULIER (certains rattachements ont été réalisés sur des types de sol particuliers caractérisés par des teneurs spécifiques en carbone; par exemple l'analyse statistique a montré que les Luvisols et les Podzoluvisols avaient des teneurs en carbone plus basses que les autres sols de même texture).

Pour chaque seuil de carbone étudié, nous avons considéré les surfaces pour lesquelles les teneurs en carbone sont inférieures à ce seuil et calculé :

1. la teneur moyenne en carbone de ces surfaces
2. les quantités de matière organique exogène qu'il serait nécessaire d'apporter pour restaurer et entretenir ces seuils de carbone.

Quantités de matière organique disponible

Les deux principales sources de matière organique pour un sol cultivé sont :

- les restitutions des cultures, dont l'importance peut être plus ou moins grande, selon le type de culture mais également selon les pratiques culturales,
- les matières organiques exogènes, apportées en complément des restitutions des cultures sur les sols.

Les matières organiques exogènes

Les amendements organiques que nous avons considérés ont principalement deux origines: rurale pour le fumier et rurale et urbaine pour les différents composts. Les autres sources sont plus faibles. Il s'agit principalement des amendements du commerce dont la production totale s'élèverait à 350 000 tonnes par an (Carré, 1995).

La principale source de carbone organique exogène stabilisé est représentée par les fumiers dont la production s'élève, d'après nos calculs, à plus de 86 millions de tonnes de matière brute (Agreste, 1999).

Mais les fumiers ne peuvent avoir qu'une utilisation locale : ils sont en effet généralement utilisés au niveau même de l'exploitation.

Afin de pouvoir comparer le déficit en carbone aux quantités disponibles, il nous faut donc raisonner à l'échelle locale. Or les données les plus fines dont nous disposons pour calculer la production de fumier sont de niveau départemental (Agreste, 1999). Nous avons donc calculé la production de fumier par département à partir :

- des effectifs des animaux en fin d'année (d'après Agreste, 1999),
- du pourcentage de production de fumier et de lisier par espèce (Pflimlin, 1999),
- des chiffres de production de déjections indiqués par le CORPEN (1988) (tableau 3).

Les chiffres de production de déjections sont donnés par UGB (Unité Gros Bétail) pour les bovins et par équivalent BRE (brebis) pour les ovins. Les correspondances par type d'animaux sont données dans le tableau 4 (CORPEN, 1988).

L'intégralité des déjections des ovins, caprins et équins est gérée sous forme de fumier, contre 75 % pour les bovins (Pflimlin, 1999). En première approximation, le facteur 0,5 a en plus été appliqué au fumier de bovins pour tenir compte du temps passé au pâturage (fumiers non disponibles pour les épandages), qui n'est pas intégré dans l'expression des valeurs en UGB. Nous n'avons pas considéré le fumier des volailles de chair et des canards qui représente moins de 1 % en poids de la production nationale totale de fumier (Leroy, 1994).

Les composts d'origine urbaine représentent une quantité beaucoup plus faible de matière organique : environ 1 million de tonnes réparties de la façon suivante :

- compost de déchets verts (DV) : 240 000 tonnes (Ademe, 1999),
- compost de la fraction fermentescible des ordures ménagères (FFOM) collectées séparativement (résidus de repas, papiers, cartons, déchets de jardins...) : 33 000 tonnes, (d'après Ademe, 2000-2),
- compost de boues : plus de 110 000 tonnes (Carré, 1995),
- compost d'ordures ménagères dont la fraction organique est extraite mécaniquement sur le site de compostage : 630 000 tonnes (Ademe, 2000 -1).

Restitutions des cultures

Les restitutions des cultures sont de 2 types :

- les restitutions obligatoires que sont les racines,
- les restitutions facultatives qui correspondent aux parties aériennes qui peuvent être laissées sur place, enfouies ou exportées (paille de céréales).

De même que pour le fumier, nous avons calculé, à l'échelle départementale, les quantités de matière organique stable que

Tableau 3 - Production de déjections animales (CORPEN, 1988).

Table 3 - Production of animal manure (CORPEN, 1988).

Espèces	Production de fumier	Unité
Bovins	15,00	t/an/UGB
Ovins	1,00	t/an/BRE
Équins	13,00	t/an/animal
Caprins	1,30	t/an/animal

Tableau 4 - Equivalences en UGB (Unité Gros Bétail) et BRE (brebis) (CORPEN, 1988).

Table 4 - Equivalences in UGB (Unité Gros Bétail) and BRE (sheep) (CORPEN, 1988).

Equivalent UGB ou BRE		
Bovins	Vache laitière	1
	Vache nourrice	0,7
	Taureau et jeune mâle	0,7
	Génisses	0,7
Ovins	Veaux	0,3
	Brebis mère	1
	Bélier	1
	Agneau	0,3
	Agnelle	0,5

représentent les restitutions des cultures. Pour ce calcul nous disposons des données suivantes :

- La superficie des différentes cultures à l'échelle départementale (Agreste, 1999),
- Les données de rendement en matière organique stable (tableau 5, Station Agronomique de l'Aisne, logiciel CERES, Jones et Kiniry, 1986).

Afin de ne pas comptabiliser deux fois certaines pailles de céréales, nous avons tenu compte des pailles exportées. Par département, nous avons calculé les quantités de pailles laissées au champ à partir des données départementales des quantités de pailles récoltées (source SCEES / BCPF), de la superficie cultivée en céréales (Agreste, 1999), et d'un rendement en pailles de 70 quintaux / hectare. Ce rendement en pailles a été calculé à partir des rendements moyens du blé, du maïs et de l'orge qui représentent 90 % de la surface cultivée en céréales (Agreste, 1999) et sur la base d'un rendement en pailles équivalent au rendement en grain (Messmer, 1996).

Pour les autres cultures, afin de minimiser le calcul de déficit organique, nous avons considéré que l'ensemble de la production végétale non récoltée était restitué au sol.

Tableau 5 - Rendements en matière organique stable des différentes cultures (Station Agronomique de l'Aisne, logiciel CERES, Jones et Kiniry, 1986).**Table 5** - Stable organic matter produce of several cultures (Station Agronomique de l'Aisne, CERES software, Jones et Kiniry, 1986).

Cultures	Culture de référence	Productionde matière organique stable : restitutions obligatoires (en kg/ha)	Productionde matière organique stable : restitutions facultatives (en kg/ha)	Total en t/ha
Céréales	blé tendre	550	500	*
Oléagineux	colza d'hiver	150	700	0,85
Betteraves industrielles	betteraves sucrières	0	600	0,6
Pomme de terre et légumes frais		150	0	0,15
Légumes secs et protéagineux	pois	300	300	0,6
Fourrages annuels	maïs fourrage	400	0	0,4
Prairies artificielles temporaires	association ray grass italien/trèfle	850	300	1,15
Jachères	association ray grass italien/trèfle	850	300	1,15

*: variable selon les départements, en fonction de la quantité de pailles récoltées

Pour chaque classe des terres arables de la statistique agricole (Agreste, 1999), c'est-à-dire, céréales, oléagineux, etc... nous avons choisi la plante la plus représentative de la classe (Agreste, 1999) et nous avons utilisé les chiffres de rendement en matière organique stable de niveau 2 de la station agronomique de l'Aisne (logiciel CERES, Jones et Kiniry, 1986).

D'après ce calcul, les restitutions des cultures représentent près de 16 millions (15,8) de tonnes de matière organique stable par an à l'échelle nationale, avec des variations importantes entre départements.

Calcul du déficit en matière organique

Formule de Hénin Dupuis

Pour cette première estimation, nous avons utilisé le modèle de Hénin-Dupuis (Hénin et Dupuis, 1945), exprimé sous sa forme exponentielle (Van Dijk, 1980).

Hénin et Dupuis ont été les premiers à proposer un modèle de prévision du bilan organique du sol. Ce modèle permet de calculer la concentration en matière organique vers laquelle tend un sol à l'équilibre, lorsqu'il est soumis pendant une durée infinie à un régime de restitution organique et à des itinéraires techniques constants (figure 1).

Le coefficient isohumique K1

Le coefficient isohumique K1 caractérise le rendement en

Figure 1 - Formule de Hénin Dupuis (Van Dijk, 1980).**Figure 1** - Hénin Dupuis formula (Van Dijk, 1980).

$$y_t = \frac{K_1 x}{K_2} (1 - e^{-K_2 t}) + y_0 e^{-K_2 t}$$

y_t = quantité d'humus au temps t ; y_0 à $t=0$
 x = apport annuel de matière organique
 $(y, y_0$ et x sont exprimés dans la même unité)
 K_1 = coefficient isohumique
 K_2 = coefficient de minéralisation

matière organique du sol d'une matière organique. Il est défini par Hénin et Dupuis comme "le rapport de l'accroissement du pourcentage de matière organique contenue dans le sol à la quantité de matière organique sèche apportée, exprimée en p. cent de terre sèche" (Hénin et Dupuis, 1945). Le pourcentage de matière organique contenu dans le sol est exprimé en pourcentage de terre sèche. Pour exprimer le K1 en quantité de matière organique apportée, il faut multiplier les deux termes du rapport par la quantité de terre contenue dans un hectare. Le K1 correspond ainsi au rapport entre la quantité de matière organique apportée

qui contribue à l'augmentation du taux de matière organique du sol (équivalent à la quantité de matière organique stable) et la quantité de matière organique totale apportée.

Ce coefficient est caractéristique de la composition des résidus organiques (Mary et Guérif, 1994). Un produit très fermentescible se minéralise rapidement et laisse peu de carbone pour les sols: son coefficient isohumique est faible. Un produit lignifié ou ayant déjà subi un processus de transformation fournit beaucoup plus de matière organique stabilisée au sol: son coefficient isohumique est élevé. Il varie de 15 % pour de la paille à 70 % pour certains composts ou de la tourbe brune (Soltner, 2000 et Ademe, 1998).

Nous exprimerons dans la suite de notre propos les apports de MO en "MO stable" représentant le produit "K1 X" de la formule de Hénin-Dupuis présentée ci-dessus, avec X, apport annuel de matière organique en t/ha de matière organique sèche. Ceci nous permettra de nous affranchir du type de matière organique exogène.

Le coefficient de minéralisation K2

Le coefficient de minéralisation K2 représente le taux de destruction annuel du stock organique du sol, il dépend essentiellement des conditions pédoclimatiques mais également du niveau des restitutions organiques: il augmente si elles sont fortes (Mary et Guérif, 1994). Dans une première estimation, nous n'avons tenu compte que du type de sol (teneur en argile, teneur en calcaire et pH). Les valeurs de coefficient de minéralisation K2 (comprises entre 0,01 et 0,02) ont été affectées à partir d'une grille d'estimation (Rémy et Marin-Lafèche, 1976) (tableau 6).

Toutefois, la typologie de sol de cette grille ne correspond pas à la classification de la base de données géographiques des sols de France. Aussi avons-nous établi une correspondance en fonction de la texture et du type de sol.

Compte tenu de l'incertitude sur ces valeurs, nous avons réalisé une étude de sensibilité en faisant varier les valeurs de K2.

Calcul du déficit en matière organique stable

Les taux de carbone ont été ramenés en t/ha de matière organique en utilisant un coefficient de 1,724 entre le taux de C et le taux de matière organique, une densité moyenne de 1,4 et une épaisseur de sol de 30 cm. Selon ce mode de calcul, un taux de carbone de 1,5 % correspond donc à 110 t/ha de matière organique sèche.

A partir de la formule Hénin et Dupuis, nous avons calculé le déficit en matière organique des surfaces précédemment définies. Pour chaque zone nous avons calculé le nombre d'années nécessaires pour restaurer le seuil de carbone, en tenant compte d'un apport annuel de matière organique constitué :

1. des restitutions de cultures, calculées à partir des restitutions des cultures du département au prorata de la superficie de terres arables concernée et,
2. d'un apport de matière organique exogène constant (cf. détail ci-dessous).

Le calcul prend en compte les pratiques agricoles les plus répandues. Les fumiers sont généralement épandus tous les 2 ou 3 ans à des doses d'environ 40-50 t/ha. Les composts sont généralement épandus tous les 2-3 ans à 20-30 t/ha.

Nous avons estimé les quantités de matière organique stable apportées par ces deux types d'amendements. Nous avons effectué ces calculs en utilisant pour les différents coefficients les valeurs maximales généralement citées dans la littérature afin de minimiser le déficit en matière organique des sols.

■ Fumier de ferme

- coefficient isohumique K1 = 0,34 d'après Boiffin *et al.* (1986), valeur proche de celle déterminée par Delas et Molot (1983) de 0,32,
- matière organique sur brut = 18 %, valeur maximale donnée par Leclerc (1995) pour le fumier de bovin, fumier qui représente plus de 80 % des fumiers (Leclerc, 1995).

Un épandage de 40 t/ha de fumier tous les 2 ans correspond

Tableau 6 - Coefficient annuel de destruction de la matière organique (Remy et Marin-Lafèche, 1976).

Table 6 - Organic matter mineralisation coefficients (Remy et Marin-Lafèche, 1976).

Types de sol	Argile %	Calcaire ‰	pH	Coefficient K ₂
Sableux neutre	50	2	7,0	0,020
Sableux acide	50	0	5,0	0,010
Sableux calcaire	50	100	8,0	0,017
Limon moyen	150	2	7,5	0,016
Limon argileux	220	2	7,5	0,013
Limon calcaire	100	300	8,1	0,009
Argile	380	2	7,5	0,010
Argilo-calcaire	300	150	8,0	0,007

donc à un apport de 1,22 t/ha/an de matière organique stable.

■ Composts

Les coefficients isohumiques des composts urbains cités dans la littérature sont généralement proche de 0,25 (Remy et Marin-Lafèche, 1976). Dans le cadre de notre étude, nous avons utilisé un coefficient isohumique supérieur, proche des valeurs des coefficients des composts de déchets verts ou des composts de la fraction fermentescible des ordures ménagères, qui représenteront à l'avenir la majorité des composts d'origine urbaine.

La mesure du coefficient isohumique est une mesure au champ longue à réaliser, mais il peut être approché par la mesure de l'Indice de Stabilité Biologique (ISB, Linères et Djakovitch, 1993). Il représente la proportion de matière organique peu dégradable apportée par le produit, calculée à partir du fractionnement de la matière organique en différentes fractions biochimiques : matière organique soluble, hémicellulose, cellulose brute et lignine plus cutines.

Les valeurs d'ISB se situent entre 0,6 pour les composts de la fraction fermentescible des ordures ménagères (Houot *et al.*, 2000) et 0,7 pour les composts de déchets verts (Le Bohec *et al.*, 1999), en ramenant les valeurs d'ISB en pourcentage de la matière organique sèche, sur la base de 50 % de matière organique sur sec.

Afin de ne pas surestimer la potentialité en matière organique stable des composts d'origine urbaine, nous avons choisi d'utiliser les valeurs suivantes :

- coefficient isohumique $K1 = 0,5$,
- matière organique sur brut = 25 % (Ademe, 1998).

Un épandage de 30 t/ha de compost tous les 3 ans correspond donc à un apport de 1,25 t/ha/an de matière organique stable.

Sur la base de ces valeurs, nous avons considéré un apport de matière organique exogène de 1,25 t/ha/an de matière organique stable.

Tant que le taux de carbone fixé n'est pas atteint, la quantité

nécessaire est considérée comme égale à l'apport constant défini ci-dessus et lorsque le taux est atteint, l'apport annuel correspond à l'apport nécessaire à l'entretien du taux de carbone. Dans ce cas, les quantités épandues à chaque épandage sont inchangées, mais les épandages pourront être plus espacés.

La somme des résultats sur l'ensemble des surfaces concernées nous donne l'estimation de la quantité de matière organique stable nécessaire à la restauration et à l'entretien des sols limoneux présentant un risque d'érosion important.

Comparaison avec la quantité de matière organique exogène disponible

Nous avons sommé par département les résultats de déficit en matière organique précédemment obtenus afin de les comparer à la quantité de fumier disponible localement. Au vu des données dont nous disposons (production de fumiers par département), nous avons pris la limite du département comme limite de transport pour les fumiers et uniquement considéré les départements pour lesquels la production de fumier est inférieure au déficit calculé. Ce calcul permet ainsi une estimation de la quantité de matière organique exogène supplémentaire (hors fumier) nécessaire pour restaurer et entretenir les surfaces étudiées à un niveau organique donné.

RÉSULTATS

Surfaces

La superficie globale concernée par l'étude couvre environ 3400000 hectares, ce qui représente un peu plus de 6 % du territoire français (tableau 7) et 17 % des terres arables. Lorsque l'on fait varier le seuil de teneur en carbone, on constate que l'estimation des surfaces ne suit pas une relation linéaire. Ceci est lié à la distribution généralement dissymétrique des teneurs en carbone, plus étirée vers les valeurs fortes. Ainsi, lorsque l'on part de fortes

Tableau 7 - Variation de la superficie concernée par le calcul pour différentes valeurs du seuil de carbone.

Table 7 - Variation of the area concerned by the calculation for different carbon values.

Conditions	Superficie en ha	Écart/superficie de base	Écart/surface C < 1,5 %
Sols limoneux aléa d'érosion 3-4-5	3 430 000		
et C < 1	1 280 000	63 %	52 %
et C < 1,1	1 720 000	50 %	35 %
et C < 1,2	2 050 000	40 %	23 %
et C < 1,3	2 280 000	34 %	14 %
et C < 1,4	2 460 000	28 %	8 %
et C < 1,5	2 660 000	22 %	0 %

teneurs, une diminution du seuil n'entraîne que de faibles variations relatives des surfaces estimées, alors qu'aux faibles teneurs, une faible variation du seuil peut engendrer de fortes différences.

Si l'on ne cartographie que les zones où l'aléa d'érosion est important et le pourcentage de surface ayant des teneurs inférieures à 1,5 % (carte 1), on met en évidence la spécificité des régions de grande culture du nord du bassin parisien et de la haute Normandie, ainsi que celle des régions du Toulousain et des coteaux du piémont pyrénéen. Quelques zones plus localisées à fort risque et faibles teneurs en C sont également observées. L'aspect très "disséqué" de cette carte plaide fortement pour la nécessité d'études plus détaillées.

Déficit en MO

La figure 2 présente l'évolution des quantités de matière organique exogène qu'il serait nécessaire d'apporter pour relever et maintenir les taux de carbone de ces sols à un seuil déterminé.

Les différentes courbes ont une allure similaire, mais avec des paliers différents et des dynamiques différentes. Pour chaque courbe, on observe un premier palier qui correspond à la durée minimale de restauration des sols à une teneur en carbone donnée. Ce palier est suivi d'une chute qui correspond principalement à la restauration progressive des surfaces qui présentent les teneurs les plus fortes jusqu'à celles qui présentent les teneurs les plus faibles. Le palier terminal correspond au régime d'entretien nécessaire pour maintenir les sols restaurés au niveau fixé. Entre les deux paliers, la chute des

Carte 1 - Sols limoneux cultivés présentant un risque d'érosion significatif. Le pourcentage indique la proportion de sols dont les teneurs en carbone organique sont inférieures au seuil de 1,5 %.

Map 1 - location of loamy soils under arable lands and exhibiting a significant erosion risk. Percentages in legend indicate the proportion of surface of soils having an organic carbon content value under the threshold of 1.5 %.

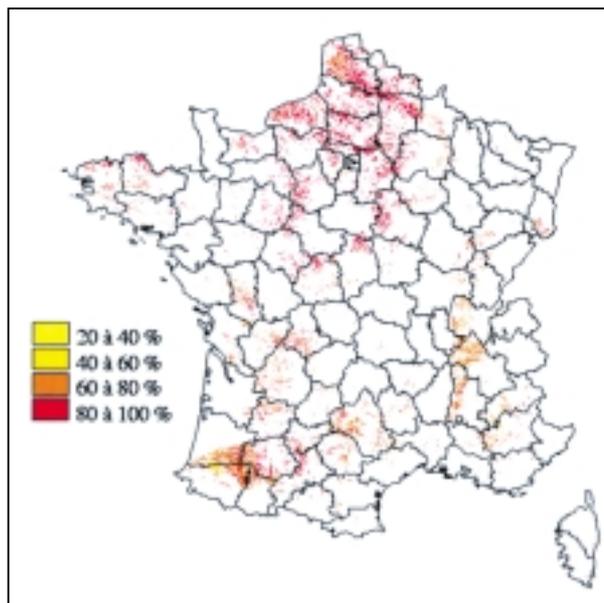
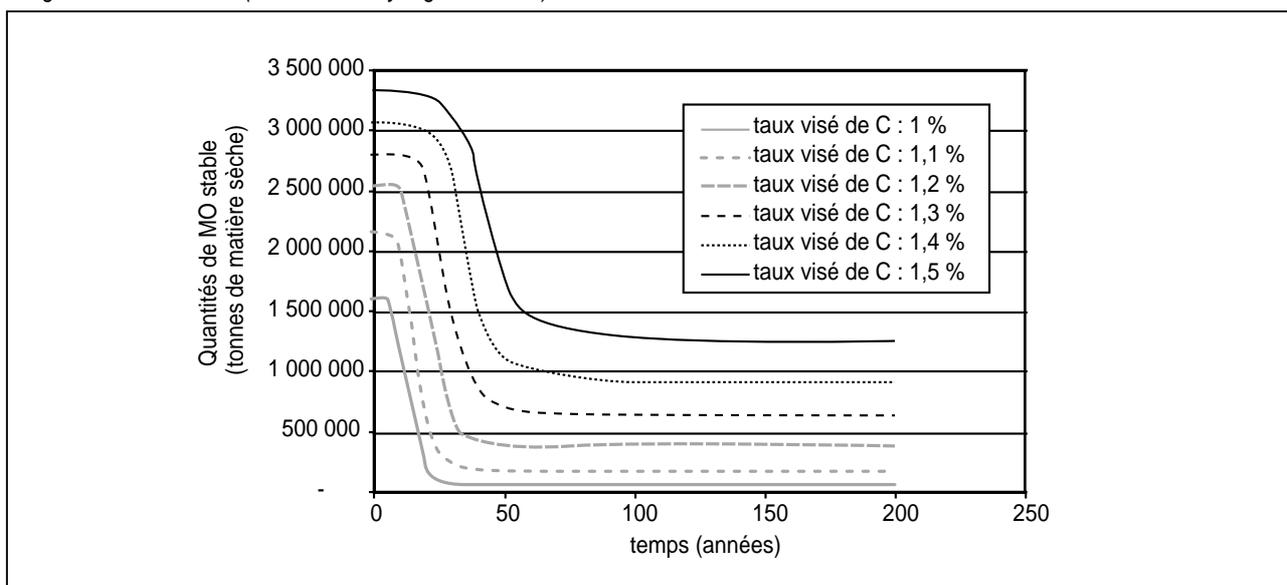


Figure 2 - Estimation des quantités de matière organique exogène stable nécessaires pour restaurer et entretenir les taux de matière organique des sols limoneux français sous aléa d'érosion important (en tonnes de matière organique sèche).

Figure 2 - Estimates of stable exogenous organic matter amounts necessary to restore and maintain the loamy French soils exhibiting a significant erosion risk (in tonnes of dry organic matter).



valeurs est variable selon les courbes : elle est de 95 % pour 1 % de C et de plus de 60 % pour 1,5 % de C. Pour les premiers paliers, la différence entre les courbes correspond principalement à la différence de superficie entre les différents seuils de carbone. Par la suite, les écarts se creusent pour atteindre 95 % de différence entre la courbe à 1 % de carbone et celle à 1,5 %. Ils correspondent à la restauration plus rapide des teneurs pour les plus faibles valeurs seuils de carbone.

Estimation des quantités d'apports exogènes

La *figure 3* présente l'évolution des quantités de matière organique exogène supplémentaires qu'il serait nécessaire d'apporter pour restaurer et maintenir les taux de carbone des sols français à un niveau déterminé, après épandage de tous les fumiers disponibles dans le département.

Nous avons volontairement gardé pour ce graphique la même échelle que précédemment pour visualiser l'écart représenté par les fumiers.

Les courbes gardent la même allure que dans le graphique précédent, mais avec des chutes de valeurs beaucoup plus importantes : 86 % pour 1,5 % de carbone et 100 % pour 1 % de carbone.

Ces résultats suggèrent que l'utilisation locale des fumiers ne permet pas la restauration des taux de carbone de tous les sols étudiés. Les quantités de matière organique stable supplémentaire nécessaires sont d'un peu moins de 300 000 tonnes pendant 5 ans pour un seuil de 1 % de carbone et de 1 200 000 tonnes pendant 30 ans pour un seuil de 1,5 % de carbone.

Par contre, épandus sur les sols les moins organiques, les fumiers actuellement disponibles permettraient l'entretien des sols à 1 % de C. «L'entretien à des niveaux supérieurs de carbone (1,1, 1,2, 1,3, 1,4, et 1,5 %) nécessiterait des matières organiques stables supplémentaires : 150 000 tonnes pour un seuil de 1,5 % de carbone.

Représentation géographique des résultats

Les *cartes 2, 3, 4, 5 et 6*, présentent l'expression de ces résultats par département, pour un seuil de carbone de 1,5 %, seuil mis en évidence pour les sols limoneux du Sud Ouest de la France (Le Bissonnais et Arrouays, 1997).

Nous avons considéré pour cela deux points des courbes des *figures 2 et 3*, représentant les deux paliers précédemment décrits : 5 ans et 100 ans. Les quantités nécessaires après 5 ans d'apports sont assimilées aux quantités nécessaires en restauration et les quantités nécessaires après 100 ans d'apports, aux quantités nécessaires en entretien.

La *carte 4* représente l'estimation départementale de la quantité de fumier disponible (en tonnes de matière organique stable). Les *cartes 2 et 3* représentent les estimations départementales des quantités annuelles de matière organique stable exogène nécessaires après respectivement 5 et 100 ans. Les

cartes 5 et 6 représentent la différence entre les *cartes 2 et 3* et la *carte 4*, c'est-à-dire les estimations départementales des quantités annuelles de matière organique stable exogène supplémentaires (après épandage de tous les fumiers du département) nécessaires après respectivement 5 et 100 ans. Compte tenu des quantités de fumier disponibles, les régions pour lesquelles les quantités de matière organique nécessaires sont les plus élevées sont :

- pour la restauration des taux de matière organique des sols : la Picardie, l'Aquitaine, l'Île-de-France, le Nord-Pas-De-Calais, le Midi-Pyrénées et la région Rhône-Alpes,
- pour l'entretien de ces taux de matière organique des sols : l'Aquitaine, l'Île-de-France, le Midi-Pyrénées et la région Rhône-Alpes.

DISCUSSION

Quantité de matière organique exogène supplémentaire

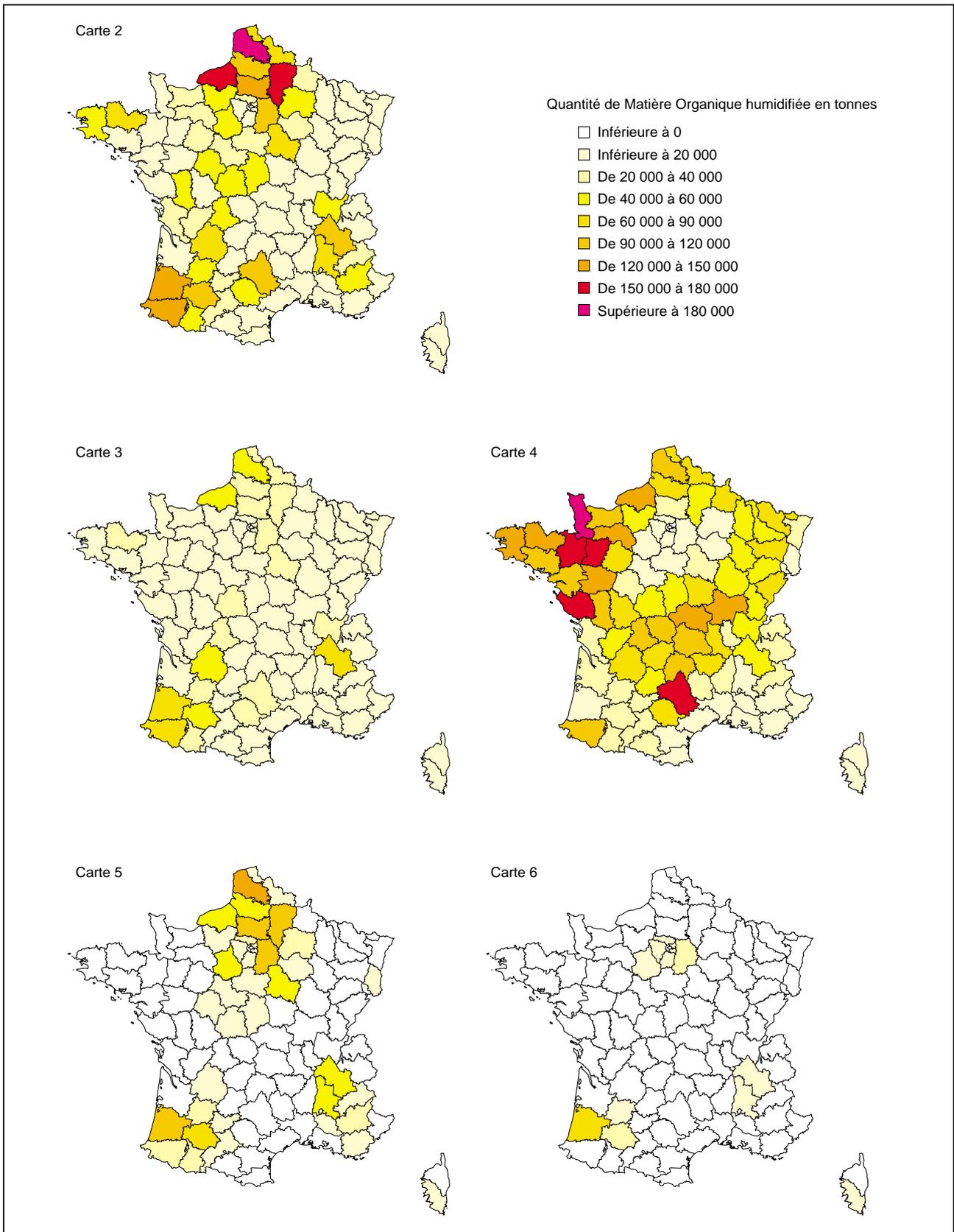
Les amendements organiques supplémentaires peuvent être de différents types. Parmi ceux-ci les composts d'origine urbaine représentent aujourd'hui la source la plus importante (environ 1 million de tonnes), mais les composts actuellement produits sont de qualité variable. En particulier, la plupart des composts d'ordures ménagères sont contaminés en éléments indésirables et leur épandage entraîne une pollution, notamment visuelle, des champs. Cependant, la politique actuelle incitative de tri et de collecte est à l'origine du développement de la production d'un compost de qualité de type DV ou FFOM.

Nous avons extrapolé les résultats de quantités de matière organique stable à des quantités de composts (*figure 4*).

Sur la base d'une production annuelle de composts d'origine urbaine de 1 million de tonnes, et en supposant que l'ensemble de cette production évoluera vers un compost de qualité, nous avons comparé le déficit mis en évidence et la production de composts. La comparaison de ces courbes avec les quantités de composts actuellement disponibles indique que dans aucun cas, la production actuelle ne suffirait à restaurer les taux de matière organique des sols limoneux qui présentent un risque d'érosion.

Les quantités nécessaires en début de restauration sont supérieures à 2 millions de tonnes de composts (MB) pour un seuil de 1 % de carbone pendant 5 ans et s'élèvent à près de 10 millions de tonnes (9,5 millions de tonnes) pendant 30 ans pour un seuil de 1,5 % de carbone.

Par contre, une fois la restauration effectuée, la production actuelle globale suffirait à entretenir les taux de matière organique de ces sols à un taux de 1, 1,1, 1,2, 1,3 ou 1,4 % de carbone, mais pas à un taux de 1,5 % de carbone. Dans ce cas, les quantités nécessaires seraient de 1 300 000 t/an après 200 ans.



Carte 2 - Estimation départementale des quantités annuelles de matière organique stable exogène nécessaires après 5 ans pour restaurer et entretenir les sols limoneux cultivés sensibles à l'érosion pour un seuil visé de carbone de 1,5 % (en tonnes de matière sèche); ces quantités nécessaires après 5 ans d'apports peuvent être assimilées aux besoins en restauration.

Map 2 - *Estimates of the yearly amounts of exogenous stable organic matter required within 5 years for restoring and maintaining cropped loamy soils suffering from erosion risks (target threshold value: 1.5 % C); considered equivalent to the amounts required for restoring.*

Carte 3 - Estimation départementale des quantités annuelles de matière organique stable exogène nécessaires après 100 ans pour restaurer et entretenir les sols limoneux cultivés sensibles à l'érosion pour un seuil visé de carbone de 1,5 % (en tonnes de matière sèche); ces quantités nécessaires après 100 ans d'apports peuvent être assimilées aux besoins en entretien.

Map 3 - *Estimates of the yearly amounts of exogenous stable organic matter required within 100 years for restoring and maintaining cropped loamy soils suffering from erosion risks (target threshold value: 1.5 % C); considered equivalent to the amounts required for maintaining.*

Carte 4 - Estimation départementale de la quantité fumier disponible (en tonnes de matière organique stable).

Map 4 - *Estimates of available amounts of manure (expressed in tonnes of stable organic matter).*

Carte 5 - Estimation départementale des quantités annuelles de matière organique stable exogène supplémentaire (après épandage de tous les fumiers disponibles du département) nécessaires après 5 ans pour restaurer et entretenir les sols limoneux cultivés sensibles à l'érosion pour un seuil visé de carbone de 1,5 % (en tonnes de matière sèche) (différence entre la carte 2 et la carte 4); ces quantités nécessaires après 5 ans d'apports peuvent être assimilées aux besoins en restauration.

Map 5 - *Estimates of the yearly amounts of exogenous stable organic matter required within 5 years for restoring and maintaining cropped loamy soils suffering from erosion risks (target threshold value: 1.5 % C) (in addition of manure): difference between map 2 and 4; considered equivalent to the amounts required for restoring.*

Carte 6 - Estimation départementale des quantités annuelles de matière organique stable exogène supplémentaire (après épandage de tous les fumiers disponibles du département) nécessaires après 100 ans pour restaurer et entretenir les sols limoneux cultivés sensibles à l'érosion pour un seuil visé de carbone de 1,5 % (en tonnes de matière sèche) (différence entre la carte 3 et la carte 4); ces quantités nécessaires après 100 ans d'apports peuvent être assimilées aux besoins en entretien.

Map 6 - *Estimates of the yearly amounts of exogenous stable organic matter required within 100 years for restoring and maintaining cropped loamy soils suffering from erosion risks (target threshold value: 1.5 % C) (in addition of manure): difference between map 3 and 4; considered equivalent to the amounts required for maintaining.*

Imperfections liées à la base de données

Il convient de relativiser les résultats précédents en fonction des précisions géographique et sémantique des données de base ayant servi à élaborer les calculs. En ce qui concerne les terres arables, le nombre de données en carbone est relativement important, ce qui donne une certaine garantie à nos estimations de valeurs de carbone. Par contre, les surfaces en jeu ont pu être légèrement sous-estimées compte tenu de la précision de la classification Corine Land Cover, qui ne permet pas d'identifier des surfaces de faible superficie. De plus, les données de Corine Land Cover ne sont pas très récentes. De même, l'utilisation de la base de données géographiques des sols de France au 1 : 1 000 000 génère une imprécision complémentaire: les limites à cette échelle sont imprécises, mais surtout, les unités délimitées

sont des associations complexes; travailler sur les sous-entités dominantes (en terme de type de sol et en terme de texture de surface) peut revenir à négliger certaines situations locales extrêmes. Enfin, l'aléa moyen annuel d'érosion résulte lui-même d'une combinaison de caractères et de règles entachés d'imprécision.

Validité du seuil de teneur en carbone du sol

Ce seuil de 1,5 % de carbone a été mis en évidence pour des situations limoneuses du Sud-Ouest de la France (Le Bissonnais et Arrouays 1997). Son caractère généralisable à tous les sols n'est pas démontré, même si la majorité des sols de France présentant des risques d'érosion sont limoneux. Il est couramment admis que les relations entre les teneurs en carbone et la stabilité

Figure 3 - Estimation des quantités de matière organique exogène stable supplémentaire (hors fumiers) nécessaires pour restaurer et entretenir les taux de matière organique des sols limoneux français sous aléa d'érosion important (en tonnes de matière organique sèche).

Figure 3 - Estimates of supplementary (in addition of manure) stable exogenous organic matter amounts necessary to restore and maintain the loamy French soils exhibiting a significant erosion risk (in tonnes of dry organic matter).

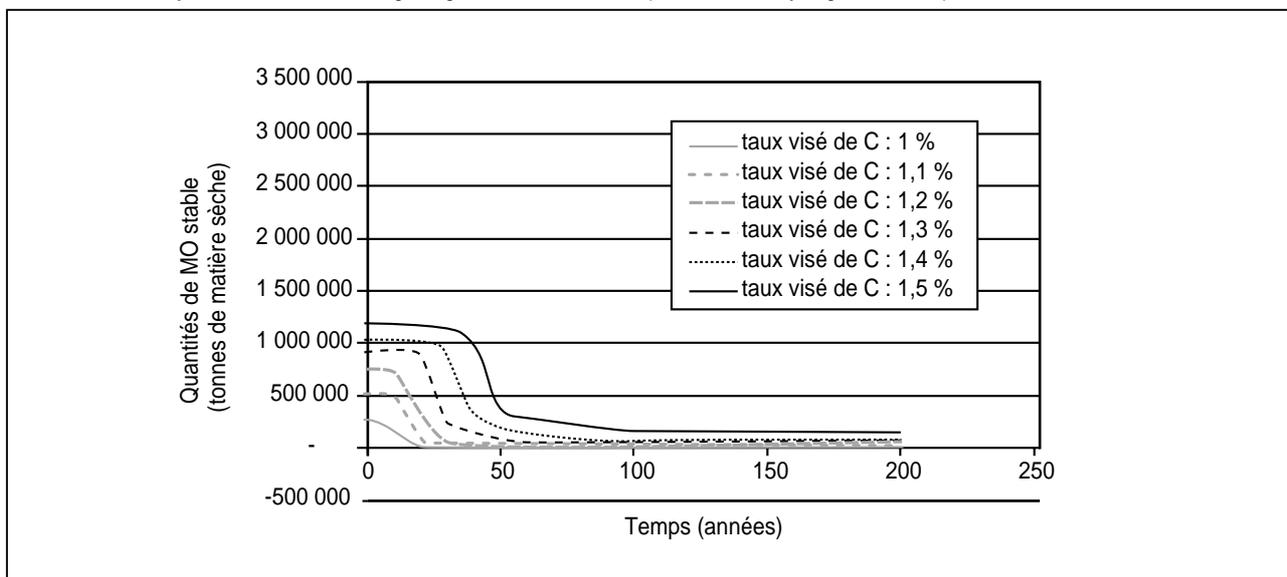
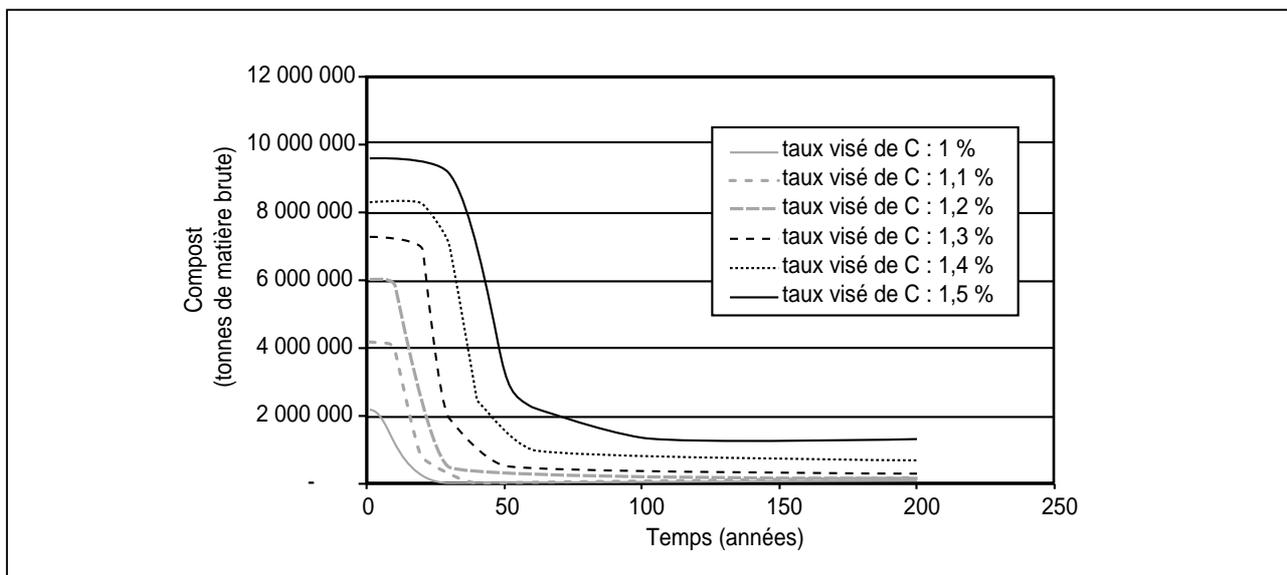


Figure 4 - Estimation des quantités de composts nécessaires pour restaurer et entretenir les taux de matière organique des sols limoneux français sous aléa d'érosion important (en tonnes de matière brute) après épandage de tous les fumiers disponibles.

Figure 4 - Estimates of compost quantities necessary to restore and maintain the cropped loamy French soils suffering from high erosion risk (in tonnes of fresh matter) (in addition of manure).



structurale ne sont pas linéaires et qu'il existe des effets de seuil. Cette variabilité est en partie due au fait qu'aux effets propres des composants organiques s'ajoutent ceux de leurs interactions avec d'autres composants (argiles, oxydes de fer et d'aluminium). En outre, le carbone organique total ne traduit ni la nature ni la diversité des composés organiques du sol, et l'on sait que ces composés peuvent avoir des effets différents sur l'agrégation et sa stabilité (Chenu, 1995). Quoi qu'il en soit, notre travail démontre clairement que les estimations des quantités de matières organiques sont extrêmement variables selon le seuil visé.

Imperfections liées au modèle et à ses paramètres

Le modèle de Hénin Dupuis comporte plusieurs défauts, dont les principaux sont de prendre en compte des coefficients fixes, indépendants d'autres facteurs comme le type de succession culturale et de ne considérer qu'un seul compartiment de carbone organique (Mary et Guérif, 1994). Mais il est classiquement utilisé en France en agriculture pour le bilan du carbone des sols (Balesdent, 1996). Le modèle bénéficie de nombreuses références et le traçage naturel par carbone¹³ l'a validé globalement dans le cas des monocultures de maïs (Balesdent, 1996).

Cependant, dans un second temps, il serait intéressant de reproduire cette approche avec des modèles plus mécanistes de prévision d'évolution de la MO dans le sol, tels que les modèles bi-compartimentaux (Mary et Guérif, 1994) ou le modèle MORGANE actuellement en cours d'élaboration (Arrouays *et al.*, 1999).

Nous avons effectué une étude de sensibilité sur les valeurs de K2 en mettant tous les coefficients K2 à la valeur maximale de 0,02, puis à la valeur minimale de 0,01 pour tous les sols sauf les rendzines auxquelles on a affecté la valeur de 0,007.

La variation du coefficient de minéralisation au sein de cette fourchette peut entraîner des différences d'estimation très fortes. Pour les valeurs minimales de K2, les variations atteignent 70 % en entretien pour le seuil de 1,5 % de carbone et jusqu'à 100 % en entretien pour le seuil de 1 % de carbone (diminution des valeurs). Pour les valeurs maximales de K2, les quantités nécessaires en entretien sont multipliées par 10 pour le seuil de 1 % de carbone et par plus de 2,5 pour le seuil de 1,5 % de carbone. Cette étude de sensibilité souligne le poids des hypothèses de valeur des paramètres du modèle sur les résultats.

Les valeurs de K1, de taux de matière organique des amendements organiques et le ratio matière organique sur carbone organique peuvent également être sujets à discussion. Ils ont été fixés de façon à minimiser les quantités de matière organique nécessaires pour restaurer les seuils de carbone.

Le choix d'épandre la totalité des fumiers sur les surfaces étudiées est également une hypothèse très forte qui contribue à minimiser les quantités de matière organique nécessaires.

La constance des usages des sols (stabilité des surfaces cultivées...) et des pratiques agricoles (production et utilisation de fumiers, travail du sol...) est aussi une hypothèse très forte de notre travail. De même, les pratiques d'épandage que nous avons utilisées comme hypothèse de calcul correspondent généralement à des contraintes techniques et peuvent sans doute être améliorées dans le cadre d'une fertilisation raisonnée.

Notion de "déficit" en matière organique

Nous sommes partis de l'hypothèse que les zones à risque d'érosion important et à faible teneur en matière organique présenteraient potentiellement un "déficit" en matière organique. Ce "déficit" peut être satisfait de différentes façons : adaptation des systèmes de culture, modification des pratiques, apports externes. Nous manquons encore de références sur les effets potentiels de ces pratiques. Enfin, quand bien même ces effets seraient prouvés et quantifiés, le passage à une application sur le terrain resterait tributaire d'une garantie de la qualité et du coût des produits apportés et de la volonté des acteurs locaux.

D'autre part, nous n'avons traité dans cette étude que des effets des matières organiques stabilisées qui seules peuvent avoir une action à long terme sur la structure du sol. Mais il ne faut pas oublier les matières organiques plus labiles qui ont un effet fugace mais non négligeable sur la structure du sol (engrais verts, lisiers, fientes, boues...), notamment par leur influence sur l'activité microbienne.

Enfin, si l'objectif principal est de réduire le risque d'érosion, d'autres actions telles que le choix de l'assolement, l'aménagement de dispositifs anti-érosifs et les pratiques culturales sont également des facteurs primordiaux dont l'importance pourrait localement être supérieure aux caractéristiques intrinsèques des sols.

CONCLUSION / PERSPECTIVES

L'objectif de cette étude était de chiffrer les quantités de matière organique exogène qu'il serait nécessaire d'apporter pour relever puis entretenir, à un niveau donné, les taux de matière organique des sols sensibles aux phénomènes de battance et d'érosion.

Nos résultats suggèrent que la quantité de fumier actuellement disponible localement ne suffirait pas à restaurer et entretenir les sols étudiés. Pour cet objectif et pour un seuil de 1,5 % de carbone, l'utilisation de matière organique exogène s'avère nécessaire. Dans ce contexte, l'utilisation et la production de compost de qualité peut être une solution pour relever les taux de matière organique des sols étudiés.

Cependant, dans l'état actuel de nos connaissances, cette estimation a été réalisée grâce à des bases de données encore imprécises et en utilisant un modèle imparfait sous contrainte d'hypothèses très fortes. Nous avons pu ainsi démontrer la très

forte sensibilité du modèle à certains paramètres d'entrée, tels que le coefficient de minéralisation.

Ceci souligne la nécessité :

- d'élaborer des références précises pour la calibration des modèles d'évolution de la matière organique dans les sols français, notamment par le suivi d'essais au champs de longue durée (Houot *et al.*, 2000),
- d'améliorer la précision géographique et sémantique des bases de données, par le développement de bases de données plus détaillées telles que celles en cours de constitution dans le cadre du programme Inventaire, Gestion et Conservation des Sols (King *et al.*, 1999).
- de développer des modèles plus mécanistes de prédiction de l'évolution de différents compartiments fonctionnels de la matière organique dans les sols, tels que le modèle MORGA-NE actuellement en cours d'élaboration (Arrouays *et al.*, 1999).

BIBLIOGRAPHIE

- Ademe, 1998 - Valeur agronomique des composts, Documents de stage - Chapitre 5: raisonnement des apports organiques en cultures légumières, p 49.
- Ademe, 1999 - Enquête nationale sur la gestion des déchets verts : synthèse et fiches de 21 opérations - 254 p.
- Ademe, 2000 (1) - Valorisation des déchets organiques : objectifs qualité, Dossier n° 13 de la Lettre Ademe, Février 2000, 4 p.
- Ademe, 2000 (2) - La valorisation des Biodéchets Ménagers en France : 27 tours d'expériences - Recueil de fiches, 1^{ère} édition.
- Agreste, 1999 - Données chiffrées - Agriculture n°117 - Statistique agricole annuelle - Résultats 1998 - Ministère de l'agriculture et de la pêche - 172 p.
- Albrecht A., Rangoon L., et Barre P. 1992. Effets de la matière organique sur la stabilité structurale et la détachabilité d'un vertisol et d'un ferrisol (Martinique). Cahiers ORSTOM, Série Pédologie, 27, pp. 121-133.
- Arrouays D., Deslais W., Daroussin J., Balesdent J., Gaillard J., Dupouey J.L., Nys C., Bateau V., Belkacem S., 1999 - Stocks de carbone dans les sols de France : quelles estimations ? - Compte-Rendu Acad. Agric. Fr, 85, n°6. Séance du 19 mai 1999, pp. 278-292.
- Arrouays D., Kicin J.L., Pélissier Ph., 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 n° 2, pp. 29-38.
- Balesdent J. 1996 - Un point sur l'évolution des réserves organiques des sols en France. Etude et Gestion des Sols, 3, 4. Numéro spécial, pp. 245-260.
- Balesdent J. et Arrouays D. 1999 - Usage des terres et stockage de carbone dans les sols du territoire français. Une estimation des flux nets annuels pour la période 1900-1999. C. R. Acad. Agr. Fr. 85(6), pp. 265-277.
- Boiffin J., Kéli Zagbahi J., Sébillotte M., 1986 - Systèmes de culture et statut organique des sols dans le Noyonnais : application du modèle de Hélin-Dupuis. Agronomie, 6 (5), pp. 437-446.
- Carré C., 1995 - Le marché du compost. Utilisation en agriculture, TSM, Techniques Sciences et Méthodes, n°2, pp. 107-109.
- Chenu C., 1995 - Extracellular polysaccharides: An interface between microorganisms and soil constituents. In: Environmental Impact of Soil Component Interactions. Volume I. Natural and Anthropogenic Organics P. M. Huang, J. Berthelin, J. M. Bollag, W. B. McGill & A. L. Page (Eds.), pp.217-233. Lewis, Boca Raton.
- Chaussod R., Nouaim R., 1996 - La valeur organique des boues d'épuration. Caractéristiques et évolution dans le sol. Effet sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol. Ademe, Journées techniques des 4 et 5 décembre 1996. Valeur Fertilisante des boues d'épuration urbaines, pp. 23-30.
- Collectif, 1993 - CORINE, Land Cover. Guide technique, CCE Brussels, 144 p.
- Corpen, 1988 - Secrétariat d'état auprès du premier ministre chargé de l'environnement, Mission Eau Nitrate - Ministère de l'Agriculture et de la Forêt - Bilan de l'azote à l'exploitation, Novembre 1988, 35 p.
- De Ploey J., Poesen J., 1985 - Aggregate stability, runoff generation and interrill erosion. In: geomorphology and soils. Eds KS Richard, RR Arnet et S. Ellis. Allen and Unwin, Londres, pp. 99-120.
- Delas J., Molot C., 1983 - Effet de divers amendements organiques sur les rendements du maïs et de la pomme de terre cultivés en sol sableux. Agronomie 3 (1) pp. 19-26.
- Fardeau J.C., Guiraud G., Thiery J., Morel C., Boucher B., 1988 - Taux net annuel de minéralisation de la matière organique des sols de grande culture de Beauce. Conséquence pour l'azote. C.R Acad.Agr.Fr, 74, n°8, pp. 61-70.
- Greenland D.J., Rimmer D. et Payne D., 1975 - Determination of the structural stability class of English and Welsh soils, using a water coherence test. Journal of Soil Science, 25, pp. 294-303.
- Grieve I.C. 1980 - The magnitude and significance of soil structural stability declines under cereal cropping. Catena, 7, pp. 79-85.
- Guéris J., 1982 - La matière organique du sol et son évolution, B.T.I. 370/372, pp. 443-450.
- Guerif J. et Boiffin J., 1993 - GEMAS - 4èmes journée de l'analyse de terre, COMIFER 5èmes forum de la fertilisation raisonnée. Decroux J et Ignazi J.C Eds. 16-18 novembre 1993, pp. 159-168.
- Henin S. et Dupuis M., 1945 - Essais de bilan de la matière organique du sol. Annales Agronomique 15, pp. 17-29
- Houot S., Michelin J., Genermont S., Verge C., Francou C., Bourgeois S., Cria G., Ciesielski H. et Clergeot D., 2000 - Evaluation of soil, air and water impacts of urban compost use in agriculture, Ninth international workshop of the network "Recycling of Agricultural, Municipal and Industrial residues in Agriculture", Gargnano, Italy, 6-9 September 2000, sous presse.
- IFEN, 1999 - Chiffres-clés de l'environnement, 21 p.
- Jamagne M., Hardy M., King D. et Bornand M., 1995 - La base de données géographique des sols de France - Etude et Gestion des sols, 2, 3, pp. 153-172.
- Jones C.A. et Kinyri J.R., 1986 - CERES-Maize, simulation model of maize growth and development, Texas A&M University press college station, Tx USA.
- Kern J.S. et Johnson M.G., 1993 - Conservation tillage impacts on national soil and atmospheric carbon levels - Soil Sci. Soc. Am. J. 57, pp. 200-210
- King D., Jamagne M., Arrouays D., Bornand M., Favrot J.C., Hardy R., Le Bas C. et Stengel P., 1999 - Inventaire cartographique et surveillance des sols en France: Etat d'avancement et exemples d'utilisation - Etude et Gestion des sols, 6, 4, pp. 215-228
- Le Bissonnais. Y. et Le Souder C., 1995 - Mesurer la stabilité structurale des sols pour évaluer leur sensibilité à la battance et à l'érosion. Etude et Gestion des Sols, 2, 11, pp. 43-56.
- Le Bissonnais Y. et Arrouays D., 1997 - Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: II. Application to humic loamy soils with various organic carbon contents - European Journal of soil science, pp. 39-48.
- Le Bissonnais Y., Montier C., Jamagne M., Daroussin J. et King D., 1998 - Aspects cartographique de l'érosion des sols en France - Compte-Rendu Acad. Agr. Fr., 1998, 84, n°7, pp. 117-130
- Le Bissonnais Y., Montier C., Jamagne M., Daroussin J. et King D., 2000 - Mapping erosion risk for cultivated soil in France), Catena, sous presse.

- Le Bohec J., Berry D., Lineres M., Lemaire F., Fouyer L., Pain M. et Thicoipe J.P., 1999 - Amendements organiques : Pourrait-on les juger rapidement ? - Info CTIFL/Mai 1999, pp. 32-35.
- Leclerc B., 1995 - Guide des matières organiques : Fertilité des sols - Ressources - Gestion - Fiches techniques. Institut Technique de l'Agriculture Biologique (ITAB) - Paris - première édition, 245 p.
- Leroy M.G., 1994 - Analyse prospective du marché français des composts issus de déchets organiques. Institut Supérieur Agricole de Beauvais - Rapport de fin d'étude - 57 p + annexes.
- Linères M., 1993 - Pourquoi caractériser les amendements organiques ? PHM Revue horticole, n° 337, pp. 5-8.
- Linères M., Djakovitch J.L., 1993 - GEMAS - 4^{es} journée de l'analyse de terre, COMIFER - 5^{es} forum de la fertilisation raisonnée. Decroux J et Ignazi J.C Eds. 16-18 novembre 1993, pp. 159-168.
- Mary B. et Guérif J., 1994 - Intérêts et limites des modèles de prévision de l'évolution des matières organiques et de l'azote dans le sol. Cahiers Agricultures ; 3, pp. 247-57.
- Messmer Y., 1996 - Production de paille. Quelle est l'influence variétale ? Perspectives Agricoles, n°214. Juin 1996. Dossier. La paille : maîtriser la quantité. pp. 55-56.
- Newbould P., 1980 - Losses and accumulation of organic matter in soils in Land Use Seminar on Soil Degradation. Boel, D, Davies, DB et Johnston AE Eds. Wageningen, 13-15 octobre 1980, pp. 107-131.
- Pflimlin A., 1999 - Quels engrais de ferme pour demain ? - GEMAS, COMIFER 4^{es} rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse de terre, Thevenet G (COMIFER) et Joubert A (GEMAS) Eds. 30 novembre - 2 décembre 1999, pp. 241-244.
- Rémy J.C. et Marin-Lafèche A., I.N.R.A. Station agronomique de l'Aisne, 1976 - L'entretien organique des terres : coût d'une politique de l'humus - Entreprise agricole, novembre 1996, pp. 63-67.
- Robert M., 1996 - Le Sol : Interface dans l'environnement ressource pour le développement. Masson, Paris, 244 p.
- Soltner D., 2000 - Les bases de la production végétale - Tome I : le sol et son amélioration - 472 p.
- Van Dijk H., 1980 - Survey of Dutch soil organic matter research with regard to humification and degradation rates in arable land in Land Use Seminar on Soil Degradation. Boel, D, Davies, DB et Johnston AE Eds. Wageningen, 13-15 octobre 1980, pp. 13-15.

