

# Évaluation du déficit en matière organique des sols français et des besoins potentiels en amendements organiques

O. Roussel<sup>(1)</sup>, E. Bourmeau<sup>(1)</sup> et Ch. Walter<sup>(2)</sup>

(1) ORVAL, 169 avenue Georges Clémenceau, F- 92 735 Nanterre CEDEX

(2) UMR Sol, Agronomie, Spatialisation, ENSA-INRA, 65 rue de Saint-Brieuc, F-35 042 Rennes

## RÉSUMÉ

Le premier objectif de cette étude est de fournir un ordre de grandeur de l'étendue et de la localisation des surfaces que l'on peut juger déficitaires en matière organique.

L'état des lieux présenté ici est basé sur l'utilisation des données issues d'une synthèse nationale des analyses de terre (Schvartz *et al.*, 1997 ; Walter *et al.*, 1997).

Ce déficit est estimé en fonction de l'abaque de Rémy et Marin-Lafèche (1974) qui indique un taux en matière organique souhaitable en fonction de la texture du sol. Par cette méthode, nous estimons les surfaces déficitaires en matière organique comprises entre 6 à 7,7 millions d'hectares de terres arables, sur 19,5 millions d'hectares nationaux. Elles se situent principalement dans le Bassin Parisien, le Centre, le Nord, la Haute Normandie, l'Aquitaine, Midi-Pyrénées, les Haut et Bas Rhin. Le pourtour Méditerranéen et la Vallée du Rhône apparaissent relativement déficitaires mais ces résultats demandent confirmation (Base de données lacunaire sur ces zones et modèles peu adaptés à ces régions).

Une estimation des quantités d'amendements organiques nécessaires à un redressement de 10 % (sur 10 ans d'apports) du taux de matière organique sur les surfaces déficitaires a requis la mise en œuvre de modèles simples d'évolution de la matière organique dans les sols : modèles de Hénin-Dupuis (1945) et Andriulo *et al.*, (1999). Les résultats indiquent que 3,7 à 5,5 millions de tonnes de matière organique humifiée seraient nécessaires à ce redressement.

## Mots clés

*Matière organique du sol, modèles, analyse de terre, amendement organique, minéralisation.*

## SUMMARY

### ESTIMATE OF ORGANIC MATTER DEFICIT IN FRENCH ARABLE SOILS AND OF POTENTIAL NEEDS OF ORGANIC AMENDMENTS

*This article deals with assessment of the organic matter deficit in French agricultural soils and with their potential need of organic amendments. This work uses data from a national review of soil tests (Schvartz et al., 1997; Walter et al., 1997).*

*The first goal of this study is to provide a rough estimate on the extension and localisation of areas which can be considered in organic matter deficit. This evaluation is based on Rémy and Marin-Lafèche 's formula (1974) which indicates a desirable organic matter rate depending on soil texture (figure 2). Thus, we estimate that 6 to 7,7 million hectares of arable soils (out of 19,5 million hectares of arable soils in France) are affected by organic matter deficit (figure 8). Those areas mainly correspond to large scale farming areas.*

*The estimation of organic amendments amounts needed for a 10 % increase (+10% of the initial rate within 10 years) was based on two basic soil organic matter models: one by Hénin-Dupuis (1945) (figure 3) and the other by Andriulo et al., (1999) (figure 4). We found that 3,7 to 5,5 million tons of humified organic matter would be necessary for the expected redressing (figure 9).*

#### Key-words

*Soil organic matter, models, soil tests, organic amendment, mineralisation*

## RESUMEN

### EVALUACIÓN DEL DÉFICIT EN MATERIA ORGÁNICA DE LOS SUELOS FRANCESES Y DE LAS NECESIDADES POTENCIALES EN ABONOS ORGÁNICOS

*El primer objetivo de este estudio es facilitar una estimación de la extensión y de la localización de las superficies que se pueden considerar deficitarias en materia orgánica.*

*El inventario presentado aquí se basa sobre los datos resultantes de una síntesis nacional de los análisis del suelo (Schvartz et al 1997; Walter et al 1997).*

*Este déficit se estima en función del ábaco de Rémy y Marin-Lafèche (1974) que indica la proporción de materia orgánica deseable según la composición del suelo. De acuerdo con este método, estimamos que las superficies deficitarias en materia orgánica abarcan entre 6 y 7,7 millones de hectáreas de suelo cultivable, de los 19,5 millones de hectáreas nacionales. Se sitúan principalmente en las regiones de la Cuenca Parisina, del centro y del norte del país, de Alta Normandía, de Aquitania, de Pirineos Meridionales, de Alto y Bajo Rin. El perímetro mediterráneo y el Valle del Ródano se consideran relativamente deficitarios, pero sus resultados necesitan confirmación (la base de datos relativa a estas áreas está incompleta y los modelos poco adaptados a estas regiones).*

*Con el fin de calcular la cantidad de abono orgánico necesario para aumentar en un 10 % la proporción de materia orgánica en las superficies deficitarias (en 10 años de aportes), es necesaria la implantación de modelos simples de evolución de la materia orgánica en los suelos: modelos de Hénin Dupuis (1945) y Andriulo et al (1999). Los resultados indican que, para esta recuperación, serán necesarios entre 3,7 y 5,5 millones de toneladas de materia orgánica humificada.*

#### Palabras claves

*Materia orgánica del suelo, modelos, análisis del suelo, abono orgánico, mineralización*

Ces dernières années furent l'occasion d'une réactualisation des préoccupations concernant le sol (Boiffin et Stengel 1999), ce "patrimoine à ménager" selon l'Institut Français de l'Environnement (Anonyme, 1998). La baisse des teneurs en matière organique (MO) des sols était annoncée comme catastrophique dans les années 70 et 80, du fait de la baisse des restitutions organiques et de leur dilution par approfondissement du labour. Le phénomène n'a pas eu de répercussions directement sensibles sur les rendements et a eu par conséquent peu d'écho auprès de la profession agricole.

Aujourd'hui, plusieurs études locales font le constat de baisses du taux de matière organique des sols français au cours des dernières décennies (Balesdent, 1996). De même, la dégradation des qualités biologiques des sols est à l'ordre du jour (Chaussod, 1996) et les conséquences non agricoles de l'érosion des parcelles (inondations boueuses, contamination des ressources en eau potable...) suscitent de plus en plus de réactions. Sans être le seul facteur explicatif de ces phénomènes, la MO du sol, apparaît comme un élément incontournable dans ce contexte agri-environnemental, au travers de ses différents rôles tant physique (structure du sol) que chimique (nutrition minérale des cultures) et biologique (activité biologique du sol) (Balesdent, 1996). Les réserves organiques du sol peuvent être considérées comme un capital à entretenir et améliorer, dans le cadre d'une gestion durable des agro-systèmes.

Dès lors, il paraît important d'évaluer le statut organique des sols français par rapport à un niveau jugé souhaitable, de quantifier le déficit par rapport à ce niveau et d'aborder le problème du redressement des zones déficitaires. L'ébauche d'un état des lieux quantitatif et spatialisé des besoins paraît nécessaire, à l'heure où les restitutions par épandage de fumier sont moins nombreuses, et alors que de nouveaux gisements d'amendements organiques<sup>(1)</sup> surgissent ou s'organisent, dans le cadre de la valorisation organique promue par le gouvernement dans sa politique des déchets.

Cette démarche quantitative peut être complétée par les travaux de caractérisation qualitative des amendements organiques qui se sont récemment développés (Linères et Djakovitch, 1993; Robin, 1997) et qui apportent les outils d'une meilleure estimation du pouvoir des amendements organiques à produire de la MO stable (pouvoir humigène).

Enfin, un autre regain d'intérêt pour la MO du sol se trouve, avec une perspective plus globale, dans la considération des réserves organiques en tant que réserve de carbone (Smith, Powlson *et al.*, 1997) en rapport avec la problématique de l'effet de serre.

L'étude présentée ici peut constituer un nouvel apport à la réflexion globale concernant la gestion de la MO. En estimant, au niveau français, les surfaces cultivées déficitaires en MO, cette étude vise à fournir une ébauche de réponse quantitative, à

donner des repères dans un domaine où les références synthétiques sont rares voire inexistantes.

L'idée est de mettre à profit les outils existants (modèles et base de données), en étant conscient de leurs limites, en attendant que les programmes de recherche de plus grande ampleur qui se mettent en place ne fournissent leurs premières données (Réseau national de mesure de la qualité des sols).

Basée sur l'utilisation de données issues de la synthèse nationale des analyses de terre (Schvartz *et al.*, 1997; Walter *et al.*, 1997), l'étude que nous présentons ici a deux objectifs:

- estimer, au niveau français, les surfaces cultivées déficitaires en MO par rapport à un taux agronomiquement optimal, dépendant de la texture du sol.

- évaluer les apports en MO nécessaires dans l'hypothèse d'un redressement partiel des taux déficitaires.

Les modèles de Hénin-Dupuis (1945) et de Andriulo *et al.*, (1999) sont mis en œuvre pour modéliser l'évolution de la MO des sols.

## MATÉRIEL ET MÉTHODES

### Synthèse nationale des analyses de terre (BDAT)

La base de données utilisée pour nos calculs est issue de la **synthèse nationale des analyses de terre sur la période 1990-1994**<sup>(2)</sup> (Walter *et al.*, 1998). Cette synthèse est la compilation de l'ensemble des analyses de terre effectuées par 27 laboratoires français agréés par le Ministère de l'Agriculture.

La base de données des analyses de terre (BDAT) publiée par l'AFES rassemble 3 134 332 analyses de terre effectuées entre le 01.01.1990 et le 31.12.1994. Cette période d'étude de 5 ans a été retenue pour minimiser les risques d'avoir deux analyses de la même parcelle.

Une agrégation des données à l'échelle administrative du canton<sup>(3)</sup> a été retenue pour deux types de raison: d'une part, elle assure l'anonymat des données de base; d'autre part, elle concilie les nécessités conjointes de disposer d'un effectif suffisant de données au sein des entités de base et de limiter leur variabilité interne (Walter *et al.*, 1998).

(1): Amendement organique: Produit d'origine végétale ou animale et végétale, apporté principalement pour améliorer les propriétés physiques et l'activité biologique des sols.

(2): Nommée Base AFES dans la suite de l'article

(3): La superficie moyenne d'un canton dans la base AFES est de 17 600 ha.

Le regroupement des analyses selon un découpage cantonal permet de disposer de résultats pour 2881 cantons, soit 82 % du nombre total de cantons français.

### Base de données retenue pour le calcul : base ORVAL

La base ORVAL est issue de la base de données AFES: dans un souci de représentativité, n'ont été retenus dans la base ORVAL que les statistiques des cantons pour lesquels on dispose d'au moins 10 mesures du taux de MO et 10 analyses de la teneur en argile (MO et argile sont deux paramètres primordiaux pour la suite des calculs).

On dispose de la distribution cantonale en quantiles (en quartiles et déciles) des résultats des analyses physiques et chimiques effectuées.

Ainsi, la base ORVAL contient les statistiques des données portant sur **1580 cantons français dont la surface totale représente 51 % de la surface totale nationale**. Ces informations portent sur 225283 mesures de teneur en MO et 103745 mesures de teneur en argile.

### Les données d'entrée des calculs

Nous présentons ici les données de la base ORVAL qui ont été utilisées dans les différents calculs.

La première donnée est la **surface totale cantonale** (Source INSEE). Les surfaces totales considérées pour notre étude sont la **Surface Agricole Utile (SAU) totale moins les surfaces toujours en herbe (STH)**; ceci comprend les terres labourées et les cultures permanentes à l'exclusion des prairies permanentes. Ne disposant de cette information qu'au niveau départemental, nous avons supposé que la proportion cantonale (SAU-STH)/Surface totale était la même que la proportion départementale. Cette proportion est donc appliquée aux surfaces totales cantonales pour obtenir les SAU et STH cantonales.

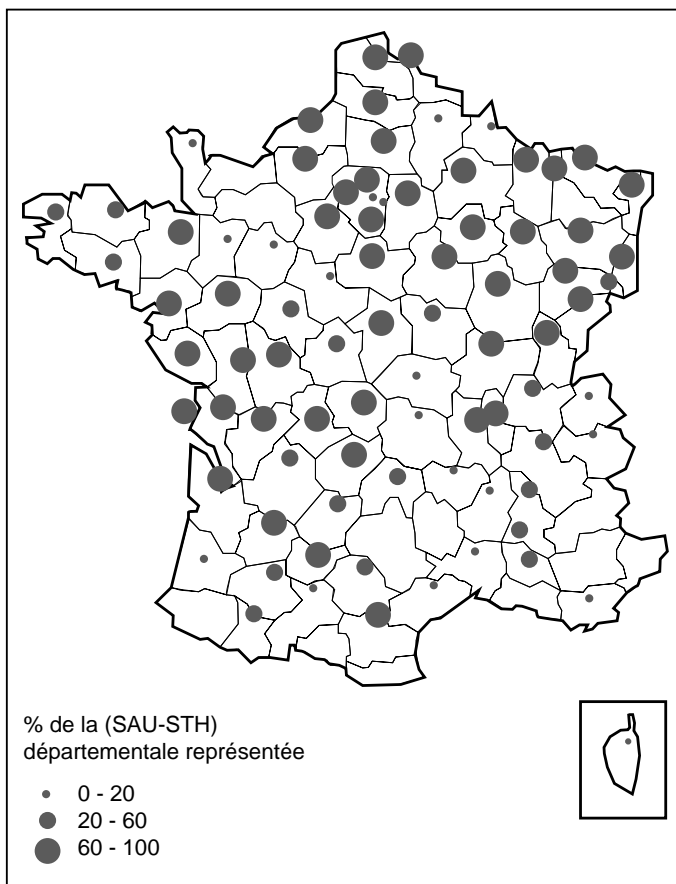
Au total, les cantons inclus dans la base ORVAL représentent 59 % des 19,5 millions d'hectares de la SAU-STH nationale. Cette représentativité est variable selon les départements et la *figure 1* indique la part de la SAU-STH départementale représentée dans la base de données ORVAL.

**Pour les teneurs en argile et en calcaire**, nous considérons la médiane des mesures effectuées sur un canton comme étant la valeur cantonale. Ces données sont utilisées pour le calcul des coefficients de minéralisation de l'humus.

**La texture de sol** la plus représentée au niveau cantonal (texture modale) est supposée représentative de la texture sur l'ensemble du canton. Les classes de textures sont définies en fonction des fractions granulométriques

**Figure 1** - Carte indiquant la représentativité de la base de données utilisée pour les calculs

*Figure 1* - Representativeness of the data base used for calculation.



qui permettent de classer les échantillons dans le triangle de texture. La texture sert à déterminer la "densité apparente cantonale" dont dépendront les besoins en MO. Cette densité apparente est déduite de la classe texturale selon les estimations du Service de cartographie des sols de l'Aisne (Baize, 2000) (*tableau 1*).

**Le taux de matière organique** des sols est estimé à partir de la mesure de la **teneur en carbone (C)** de l'horizon de surface ( $MO = 1,72 \times C$ ). Nous prenons en compte le décile inférieur, le quartile inférieur, la médiane, le quartile supérieur et le neuvième décile des mesures du taux de carbone. Nous considérons que ces valeurs sont respectivement représentatives de 10 %, 15 %, 25 %, 25 %, 25 % des surfaces cantonales, dans le cas de ce que nous appelons **l'hypothèse basse**. Pour **l'hypothèse haute**, nous considérons qu'elles sont respectivement représentatives de 17,5 %, 20 %, 25 %, 20 %, 17,5 % des surfaces.

### Détermination des surfaces déficitaires en matière organique en fonction d'un seuil

La signification agronomique du niveau de MO est interprétée grâce

**Tableau 1** - Valeurs retenues pour la densité apparente en fonction de la texture du sol**Table 1** - Values used for soil density dependant on soil texture

Texture	Densité apparente
Sableuse	1,35
Sablo-limoneuse	1,4
Sablo-argileuse	1,5
Limoneuse	1,35
Argilo-sableuse	1,55
Argileuse	1,45
Argilo-sableuse	1,4

aux résultats des travaux effectués à l'INRA de Laon par Rémy et Marin-Lafèche (1974). Ils ont déterminé une classification des teneurs en MO selon les teneurs en argile et en calcaire (figure 2). Cet abaque, appelé RML dans la suite de l'article, a été défini par ses auteurs en admettant que les niveaux souhaitables de matière organique dans les sols étaient d'autant plus élevés que leur teneur en calcaire était forte et que leur teneur en argile était faible ou forte.

Nous utilisons la limite inférieure du niveau "satisfaisant" de l'abaque<sup>(4)</sup> comme seuil pour définir les sols dont la teneur en MO est déficitaire. Cette estimation est basée sur la comparaison de chacun des quantiles des teneurs en MO (décile inférieur, quartile inférieur, médiane, quartile supérieur et neuvième décile) avec ce seuil. Nous définissons les proportions de surfaces cantonales déficitaires correspondant à l'**hypothèse basse** et à l'**hypothèse haute**. On obtient dès lors, une fourchette d'évaluation des surfaces déficitaires en appliquant les règles de décision suivantes :

(1) Si le premier décile est supérieur au taux satisfaisant de RML, alors nous considérons que

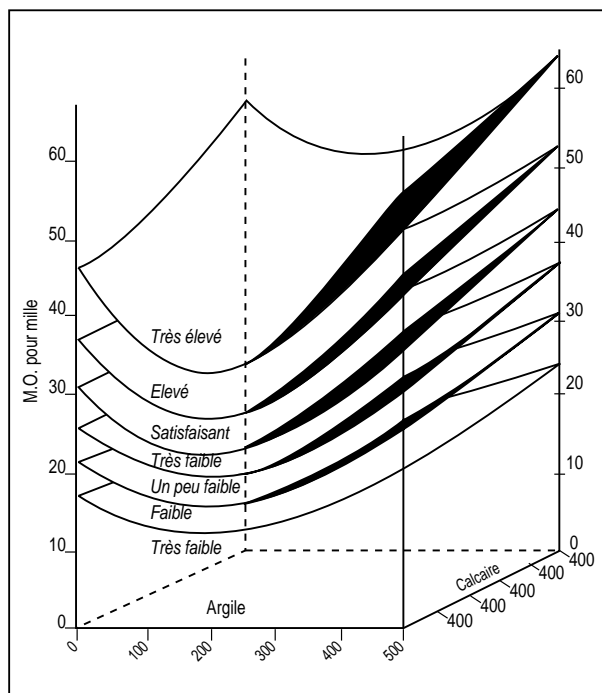
- 0 % de la SAU-STH cantonale est déficitaire, pour l'*hypothèse basse*.
- 5 % de la SAU-STH cantonale est déficitaire, pour l'*hypothèse haute*.

(2) Si le quantile Q (tableau 2) est inférieur au taux satisfaisant de RML et que les quantiles suivants sont supérieurs à ce taux satisfaisant, alors, nous considérons que

- X % de la SAU-STH cantonale est déficitaire (tableau 2), dans le cas de l'*hypothèse basse*.
- Y % de la SAU-STH cantonale est déficitaire (tableau 2), dans le cas de l'*hypothèse haute*.

A titre de comparaison, nous présentons également les

(4) : Ce seuil sera nommé taux satisfaisant de RML dans la suite de l'article.

**Figure 2** - Classification des teneurs en MO en fonction des teneurs en argile et en calcaire (Rémy et Marin-Lafèche, 1974)**Figure 2** - Classification of OM rates depending on the clay and carbonate rates (Rémy et Marin-Lafèche, 1974)**Tableau 2** - Représentativité, en % de la surface cantonale, des différents quantiles de la teneur en MO selon les hypothèses.**Table 2** - Quantiles representation depending on the hypotheses low and high, in % of the cantonale surface.

Q	X	Y
	Hypothèse basse	Hypothèse haute
Premier décile	10	17,5
Quartile inférieur	25	37,5
Médiane	50	62,5
Quartile supérieur	75	82,5
Neuvième décile	90	95

Exemple du mode de lecture du tableau :

Selon ce tableau, si le premier décile de la teneur en MO est inférieur au taux satisfaisant de RML et que le quartile inférieur est supérieur à ce taux satisfaisant, alors

- 10 % de la surface cantonale est considéré comme déficitaire en MO, dans le cas de l'*hypothèse basse*,
- 17,5 % de la surface cantonale est considéré comme déficitaire en MO, dans le cas de l'*hypothèse haute*.

Si le premier décile de la teneur en MO est supérieur au taux satisfaisant de RML, on reproduit le même raisonnement avec le quartile inférieur et ainsi de suite...

résultats d'une autre estimation des surfaces déficitaires. Cette estimation est réalisée directement sur l'intégralité des 274 014 mesures de teneurs en MO de la base AFES, sans effectuer d'agrégation cantonale. Par commodité de calcul, nous fixons à 2 % le seuil en deçà duquel la teneur en MO est jugée déficitaire. Ce seuil correspond grossièrement au taux satisfaisant de RML pour les sols argilo-calcaires, sols les plus couramment rencontrés en France. Le résultat obtenu ne sera donc acceptable que pour son ordre de grandeur.

Nous faisons l'hypothèse que la proportion du nombre d'analyses déficitaires (<2%) dans un département est égale à la proportion de la surface départementale déficitaire en MO.

## Les modèles de l'évolution de la matière organique

Nous avons retenu deux modèles décrivant l'évolution des matières organiques dans les sols à l'échelle de plusieurs années. Le choix se porte sur des modèles simples qui n'intègrent que des données pédologiques, les seules dont nous disposons précisément dans le cadre de notre étude. Les modèles plus complexes existants prennent en compte de nombreuses données additionnelles telles que la température du sol ou son humidité, le type de culture et de pratiques agricoles, la concentration en éléments nutritifs..., autant de paramètres qui ne peuvent être considérés aisément à une échelle nationale (Paustian *et al.*, 1997, Mac Guire *et al.*, 1995; Wu et Mac Gehan, 1998).

Les modèles que nous avons retenus sont :

- Le modèle de Hénin-Dupuis (1945) qui est classiquement utilisé en France (Boiffin *et al.*, 1986)
- Le modèle de Andriulo *et al.*, (1999) qui est une évolution récente du précédent.

### Modèle de Hénin et Dupuis (1945) : modèle monocompartimental

Il s'agit d'un modèle monocompartimental (*figure 3*) qui décrit, avec un pas de temps d'une année, l'évolution de la matière organique du sol dont la dynamique est supposée homogène. Le stock de MO du sol au temps  $t$  ( $y_t$ ) est augmenté par un flux d'humification ( $K_1 \cdot x$ ), issu de la décomposition des résidus organiques (matières organiques fraîches). Ce stock est diminué par un flux de minéralisation qui est supposé proportionnel au stock de MO du sol ( $K_2 \cdot y_t$ ).

La formule de Hénin-Dupuis peut être présentée comme suit :

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

où

$y_t$  : quantité de matière organique humifiée dans le sol au temps  $t$ , en tonnes d'humus ;  $y_0$  : quantité de matière organique humifiée dans le sol au temps  $t = 0$  en tonnes d'humus

$t$  : le temps, en années ;

$x$  : apport annuel de matière organique, en tonnes de matière sèche ;

$K_1$  : coefficient isohumique, dépend de la nature des apports organiques ;

$K_2$  : coefficient de minéralisation, dépendant des conditions pédoclimatiques.

Le coefficient  $K_2$  est issu de la formule de Rémy et Marin-Lafleche (1974), établie pour le Nord de la France :

$$K_2 = 1200 / ((\text{Argile} + 200) \cdot (0,3 \cdot \text{CaCO}_3 + 200)) \quad (2)^{(5)}$$

Rémy et Viaux (1982) ont établi une estimation plus précise de ce coefficient en fonction de la température du sol, mais, pour son application à l'ensemble du territoire français nous ne prenons pas en compte la variation de  $K_2$  en fonction de ces conditions climatiques.

### Modèle de Andriulo *et al.*, (1999) : modèle à deux compartiments

Ce modèle considère deux fractions de matière organique humifiée (*figure 4*), ayant chacune une vitesse de minéralisation spécifique. On suppose qu'une partie de la matière organique est active, et que l'autre est inerte biologiquement ou qu'elle se dégrade extrêmement lentement (Mary et Guérif, 1994). Le pas de temps de ce modèle est également l'année.

Ce modèle a été proposé par Andriulo, Mary et Guérif (1999) et repris par Wylleman (1999). Nous l'appellerons modèle AMG.

L'évolution du stock de carbone peut alors s'écrire :

$$y_t = y_s + y_{AO} \cdot e^{-Kt} + K_1 \cdot x \cdot (1 - e^{-Kt}) / K \quad (3)$$

où

$y_t$  : quantité de matière organique humifiée dans le sol au temps  $t$ , en tonnes d'humus ;

$t$  : le temps, en années ;

$y_s$  : quantité de matière organique humifiée stable dans le sol à  $t = 0$ , en tonnes d'humus ;

$y_{AO}$  : quantité de matière organique humifiée active dans le sol à  $t = 0$ , en tonnes d'humus ;  $y_0 = y_s + y_{AO}$

$x$  : apport annuel de matière organique, en tonnes de matière sèche ;

$K_1$  : coefficient isohumique, caractéristique de la composition des résidus organiques

**K** : coefficient de minéralisation de la fraction active.

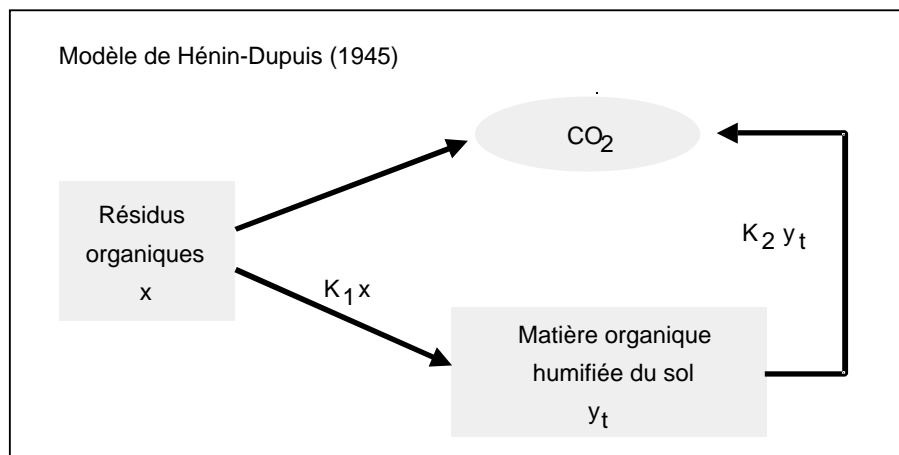
Pour la proportion des deux compartiments de MO, nous retenons la proportion adoptée par Wylleman (1999) en Picardie ainsi que Mary et Guérif (1994) à Rothamsted (GB) : la part stable de la MO représente **2/3 du stock initial** :  $y_s = 2/3 \cdot y_0$

De plus, une nouvelle formulation du coefficient de minéralisation a été validée sur des essais au champ (Mary *et al.*, 1999)

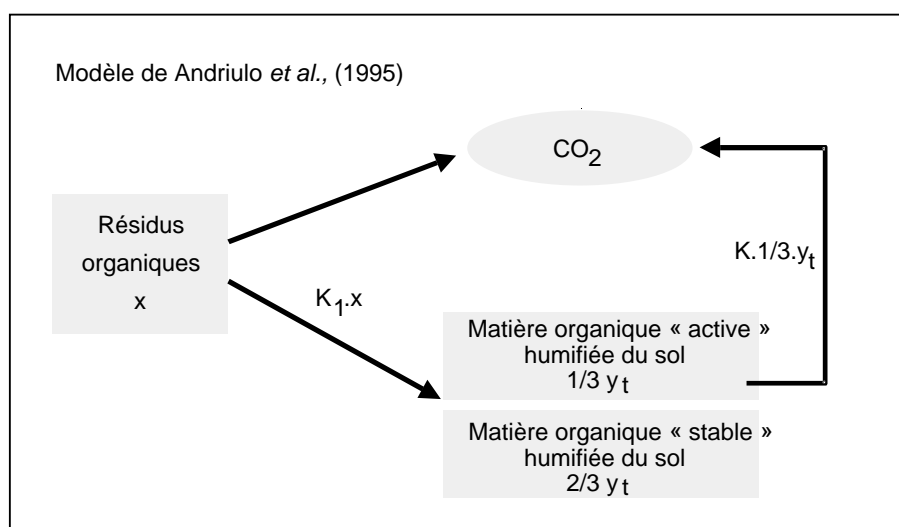
(5) : Argile et  $\text{CaCO}_3$  = teneurs en argile et calcaire en pour mille.

**Figures 3 et 4** - Représentations schématiques des modèles de Hénin-Dupuis et Andriulo et al. Ces schémas indiquent les flux de matière organique arrivant et quittant le sol.

**Figures 3 and 4** - Simplified schemes of the models of Hénin-Dupuis and Andriulo et al. Those schemes show the flux of OM towards and from the soil.



$Y_t$  : Stock de MO dans le sol au temps  $t$  –  
MO stock in the soil at  $t$  time  
 $x$  : Apport de MO – OM input  
 $K_1$  : Coefficient d'humification – Humification coefficient  
 $K_2$  et  $K$  : Coefficients de minéralisation – Mineralisation coefficients.



et intégrée au modèle de simulation sol-plante STICS (Brisson et al., 1998). Comme pour  $K_2$ , nous considérons  $K$  indépendant des conditions climatiques :

$$K = 10200 / ((\text{Argile} + 110) \cdot (\text{CaCO}_3 + 600))^{(5)} \quad (4)$$

### Hypothèse de redressement des zones déficitaires

Dans les cas où la teneur en MO des sols est considérée comme insuffisante par rapport au seuil satisfaisant de Rémy et Marin-Lafèche, nous évaluons les apports en MO nécessaires pour entamer le redressement de ces taux. L'objectif global est de remonter de 10 % la teneur mesurée en MO des sols

**jugés précédemment déficitaires, et ce, en 10 ans d'apport d'amendements organiques.**

L'estimation que nous réalisons implique une hypothèse importante : nous considérons comme teneurs initiales les teneurs de la période 1990-94 contenues dans la base de données ORVAL et supposons que ces teneurs sont à l'équilibre.

Les formules de Hénin-Dupuis et AMG sont appliquées en supposant que **les systèmes de culture restent identiques** pendant les 10 ans de redressement (à l'exception des apports correctifs de MO), et sont identiques à ceux qui ont abouti à la teneur en MO à l'équilibre. Nous considérons une profondeur de **labour moyenne de 25 cm**. Les modèles utilisés n'intégrant pas de données climatiques, **le climat est supposé uniforme** sur l'ensemble du territoire français.

## Mode de calcul

Nous disposons, pour chaque canton, des données rappelées dans le *tableau 3*, avec à chaque fois une valeur supposée représentative pour l'ensemble du canton. La *figure 5* en rappelle les utilisations dans les différentes phases de calcul.

On calcule la proportion de surface cantonale déficitaire (Cf. *raisonnement explicité dans le tableau 2*). Les formules de Hénin-Dupuis et AMG sont ensuite appliquées pour chaque quantile de teneur en MO présentés plus haut, et pour les hypothèses haute et basse. Conservons à l'esprit que chaque quantile correspond à une proportion de la superficie du canton.

Dans le cas de l'utilisation de la formule de Hénin-Dupuis, d'après la formule (1), la quantité annuelle (Q) de MO humifiée à apporter pour assurer le seul redressement est égale à la différence entre la quantité annuelle de matière organique humifiée à apporter pour un entretien et un redressement de 10 %, et la quantité annuelle de matière organique humifiée à apporter pour un simple entretien.

### Méthode de calcul de Q :

- Soit la formule (1) pour un simple entretien<sup>(6)</sup> :

$$y_{10,0\%} = y_0 = y_0 \cdot e^{-10 \cdot K_2} + K_1 \cdot x \cdot (1 - e^{-10 \cdot K_2}) / K_2$$

$$\text{d'où } K_1 \cdot x = K_2 \cdot y_0$$

- Soit la formule (1) pour un entretien et un redressement<sup>(7)</sup> de 10 % sur 10 ans (la MO apportée peut être de nature différente du premier cas, d'où l'usage de  $K_1$  et  $x'$ ) :

$$y_{10,10\%} = y_0 \cdot e^{-10 \cdot K_2} + K_1' \cdot x' \cdot (1 - e^{-10 \cdot K_2}) / K_2$$

d'où

$$\begin{aligned} K_1' \cdot x' &= (y_{10,10\%} - y_0 \cdot e^{-10 \cdot K_2}) \cdot K_2 / (1 - e^{-10 \cdot K_2}) \\ &= (1,1y_0 - y_0 \cdot e^{-10 \cdot K_2}) \cdot K_2 / (1 - e^{-10 \cdot K_2}) \end{aligned}$$

car

$$y_{10,10\%} = 1,1y_0$$

Ainsi

$$Q = K_1' \cdot x' - K_1 \cdot x = ((1,1y_0 - y_0 \cdot e^{-10 \cdot K_2}) \cdot K_2 / (1 - e^{-10 \cdot K_2})) - K_2 \cdot y_0$$

soit

$$Q = 0,1y_0 \cdot K_2 / (1 - e^{-10 \cdot K_2})$$

De même, dans le cas de l'utilisation de la formule de Andriulo *et al.*, d'après la formule (2), on a :

$$Q = 0,1y_0 \cdot K / (1 - e^{-10 \cdot K})$$

Les besoins en MO humifiée à apporter pour le redressement sont ensuite sommés pour chaque canton.

## Extrapolations des résultats cantonaux

Les résultats cantonaux d'estimation des surfaces déficitaires et des quantités de MO à apporter sont sommés département par département. Le résultat obtenu est extrapolé à l'ensemble de la surface départementale. Cette extrapolation est faite de façon proportionnelle à la surface départementale représentée dans la base de données.

Afin d'assurer la pertinence des résultats départementaux obtenus par extrapolation, on leur adjoint un indice de confiance, à savoir, la part de la surface départementale effectivement représentée dans la base de données.

Les résultats nationaux sont également obtenus par extrapolation à l'ensemble des départements métropolitains, des résultats obtenus sur les départements représentés dans la base de données. Cette extrapolation est effectuée proportionnellement à la surface des départements représentés dans la base, la SAU-STH des départements représentés correspondant à 94,7 % de la SAU-STH nationale. La même extrapolation est opérée sur les résultats de l'estimation des surfaces déficitaires par rapport au taux fixe de 2 %.

**Tableau 3** - Tableau récapitulatif des données prises en compte dans le calcul et de leur origine

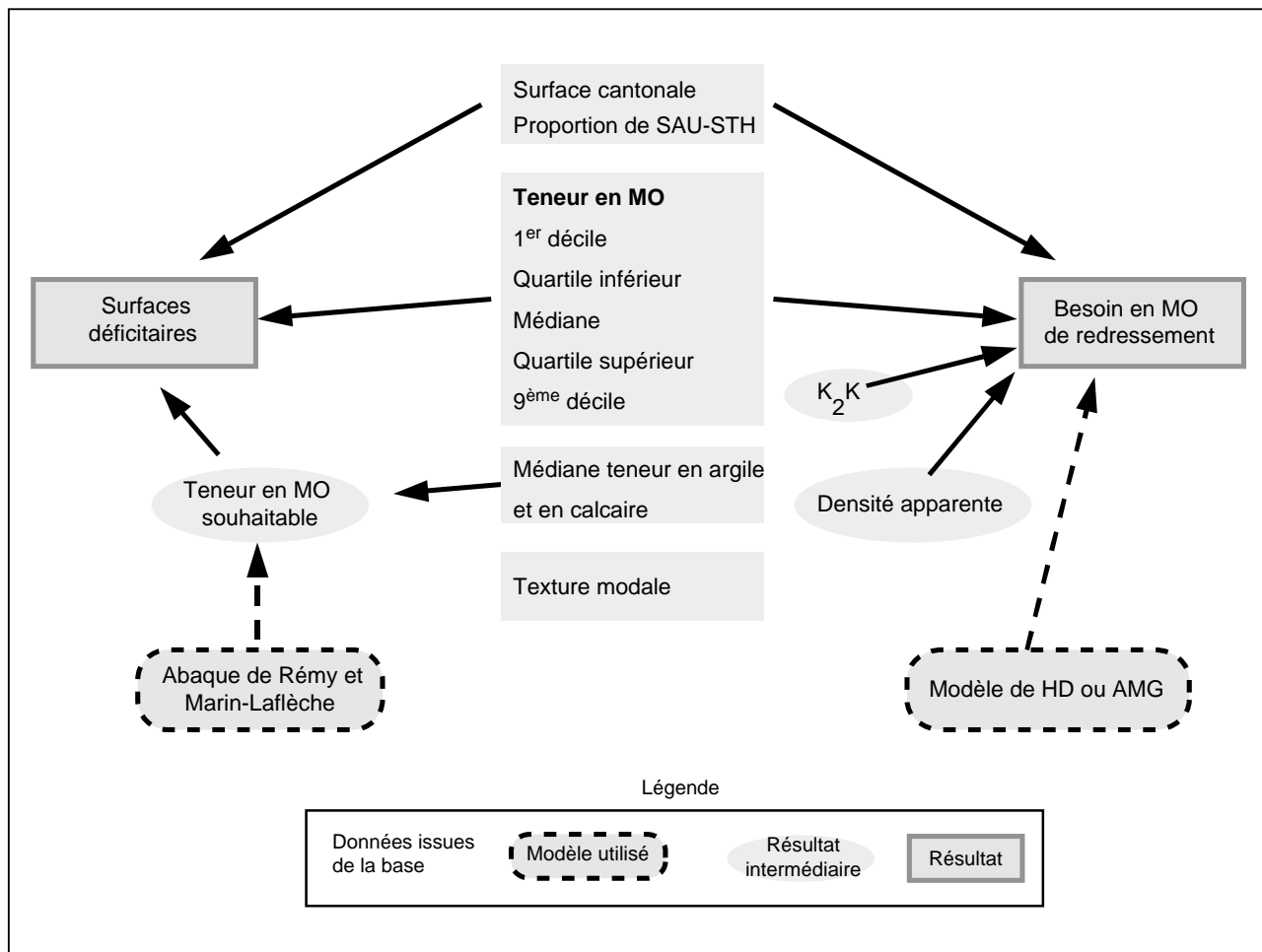
**Table 3** - Overview table of data used for calculation with their origin

Données	Echelle	Mode de représentation	Origine
Surface totale	Cantonale	1 par canton	INSEE
Teneur en argile	Cantonale	Médiane	Base AFES
Teneur en calcaire	Cantonale	Médiane	Base AFES
Texture	Cantonale	Mode	Base AFES, Triangle GEPPA.
Densité apparente	Cantonale	Dépend de la texture	Bibliographie
Coefficient de minéralisation K2	Cantonale	1 par canton	Rémy et Marin-lafleche (1974)
Proportion de SAU-STH	Départementale		INSEE

(6) :  $y_{10,0\%}$  est la teneur en MO après 10 ans, avec un objectif d'entretien

(7) :  $y_{10,0\%}$  est la teneur en MO après 10 ans, avec un objectif de redressement de 10 %



**Figure 5** - Schéma synthétique des estimations spatiales et modèles utilisés.**Figure 5** - Global scheme of spatial estimates and models used

## Étude de sensibilité

Nous avons mené une étude de sensibilité sur les formules de Hénin-Dupuis et AMG afin de mettre en évidence les paramètres dont les variations ont les impacts les plus importants sur le résultat final. Pour cette étude, nous nous sommes intéressés aux variations des quantités de MO humifiée nécessaires au redressement des taux de MO dans le cas d'un "canton moyen fictif". Ce canton moyen est défini en affectant aux valeurs des différents paramètres la moyenne de chacun des paramètres<sup>(8)</sup> de la base de données ORVAL.

On attribue huit valeurs à chacun des paramètres alternativement testés. Ces valeurs sont réparties sur toute la gamme des valeurs que chaque paramètre pourrait vraisemblablement prendre (tableau 4). Cette étude de sensibilité a été réalisée dans le cas d'une hypothèse basse, les autres paramètres que celui étudié conservant leur valeur moyenne.

## RÉSULTATS

### Étude de sensibilité

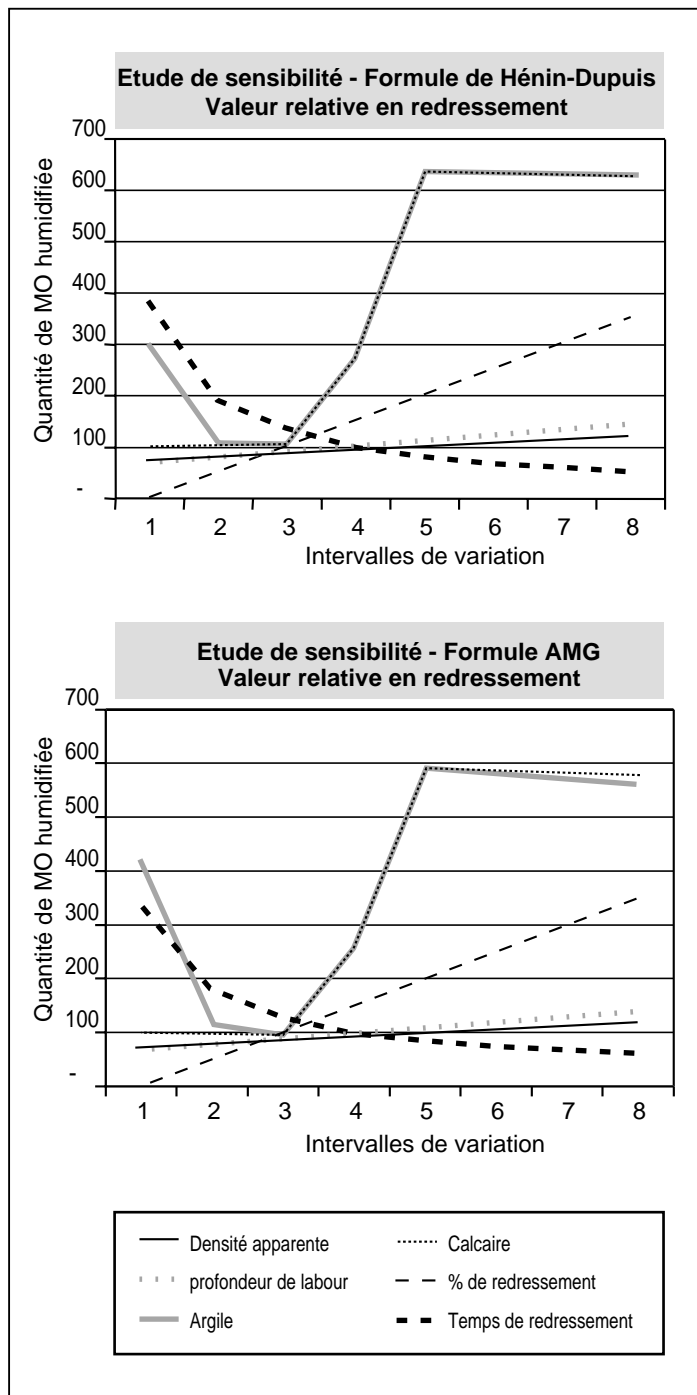
Bâties sur le même schéma, les formules de Hénin-Dupuis et AMG ont des sensibilités similaires aux variations des paramètres: la figure 6 représente, pour chacun des deux modèles, les variations de la quantité de MO humifiée nécessaire au redressement des parcelles du canton moyen fictif.

Les taux d'argile et de calcaire ressortent comme ayant une forte influence sur le résultat, liée aux fondements du modèle: ils

(8): SAU-STH = 42% de la surface cantonale totale; Texture Argilo-limoneuse, Argile = 21,45%, calcaire = 3,12%, Densité apparente = 1,37, Taux MO: 1<sup>er</sup> décile: 1,82%, 1<sup>er</sup> quartile = 2,18%, médiane = 2,68%, 3<sup>e</sup> quartile = 3,40%, 9<sup>ème</sup> décile = 4,34%;  $K_2 = 1,29$ ;  $K = 5,43$

**Figure 6** - Etude de sensibilité de l'influence des paramètres du modèle retenu sur l'estimation de la quantité de MO humifiée nécessaire pour le redressement du "canton moyen".

**Figure 6** - Sensibility study of the influence of model parameters on the amount of OM necessary for increasing "mean county" OM rate.



En abscisse : l'amplitude de variation de chaque paramètre est parcouru en 8 intervalles égaux entre les valeurs extrêmes de variation (Cf. tab. 4). En ordonnée, Quantité de MO humifiée pour le redressement (+10 % de la MO) du "canton moyen". L'indice 100 correspond au résultat obtenu quand tous les paramètres sont à leur valeur moyenne.

Abscissa : Variation of each parameter through 8 equal intervals between their extreme variation values (Cf. tab.4).

Ordinate : OM amount necessary for increasing "mean county" OM rate (+10% of initial rate). The rate 100 corresponds to the result reached when all the parameters have their mean value.

servent à définir directement les surfaces déficitaires, en modifiant le seuil du déficit (formule de Rémy et Marin-Lafèche) et interviennent également dans le calcul des coefficients de minéralisation K et K<sub>2</sub>.

Le temps de redressement et le pourcentage de redressement viennent ensuite comme des paramètres importants avec des poids similaires. Ceci souligne l'importance du choix des hypothèses de redressement.

La profondeur de labour et la densité apparente apparaissent enfin comme des paramètres dont les variations influent le moins sur le résultat cantonal.

## Surfaces déficitaires en matière organique

La figure 7 présente les départements peu ou pas du tout représentés dans la base de données. On recense 32 départements pour lesquels moins de 20 % de la SAU-STH départementale est représentée par les cantons de la base de données ORVAL.

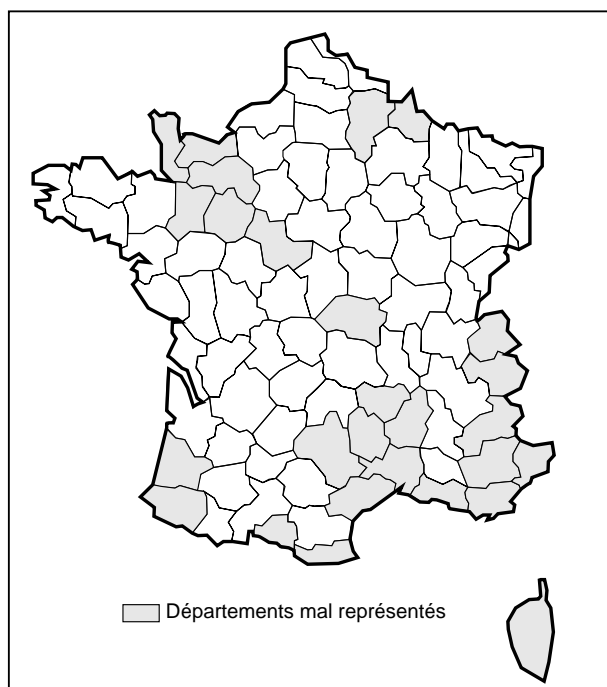
En comparant les teneurs en MO de la base de données ORVAL à l'abaque de RML, on estime que le déficit de MO, par rapport au taux satisfaisant de RML, concernerait une surface selon les hypothèses haute et basse comprise entre 6 et 7,7 millions d'hectares de terres arables sur les 19,5 millions de SAU-STH nationale (figure 8), soit 31 à 39,5 % de cette SAU-STH.

Les zones proportionnellement les plus déficitaires et pour lesquelles les bases de données sont correctement renseignées, concernent le Bassin Parisien dans sa plus grande extension, le Centre, le Nord et la Haute Normandie, l'Aquitaine et le Midi-Pyrénées, les Haut et Bas Rhin.

On peut rapprocher ces résultats de celui obtenu en déterminant les surfaces déficitaires par rapport à une teneur de 2 % et en se basant sur l'intégralité des données disponibles dans la base de données AFES. Dans ce cas, on estime à 6,6 millions d'hectares les surfaces dont les teneurs n'excèdent pas

**Tableau 4** - Intervalles de variation des différents paramètres pour l'étude de sensibilité**Table 4** - Intervals of Variation for the parameters of the sensitivity study

Paramètre	Valeur minimale	Valeur maximale	Pas de la variation
Densité apparente	1	1,7	0,1
Profondeur de labour	17,5 cm	35 cm	25 cm
Argile	0 %	70 %	10 %
Calcaire	0 %	70 %	10 %
Temps de redressement	2,5 ans	20 ans	2,5 ans
de redressement	0	35	5 %

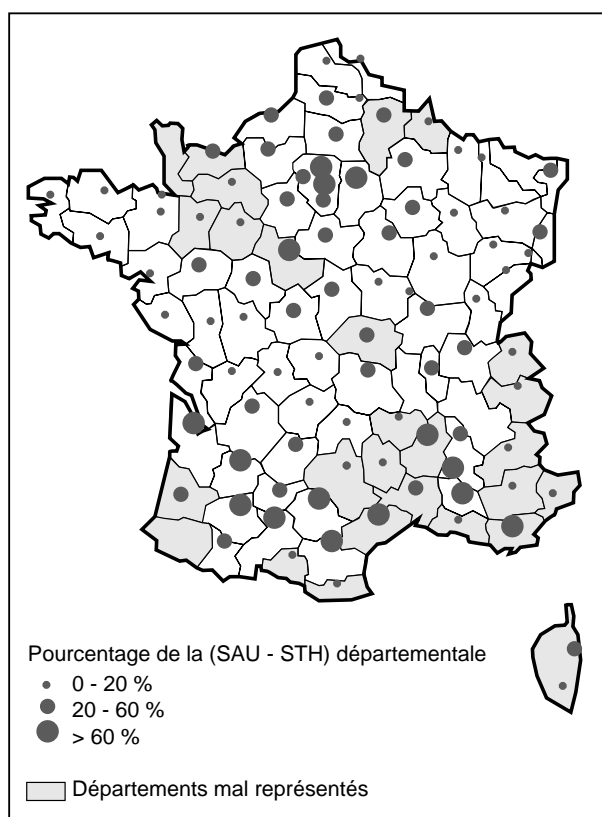
**Figure 7** - Carte des départements pour lesquels moins de 20 % de la SAU-STH est représentée dans la base de données**Figure 7** - Map of the departments for which less than 20 % of the arable surface is represented in the data base

**2 % de MO.** Ce calcul plus grossier vient corroborer le calcul précédent car leurs **ordres de grandeur sont comparables.**

### Apports en matière organique pour un redressement

L'estimation des apports en MO nécessaires pour un redressement de 10 %, sur 10 ans, du taux initial sur les zones déficitaires a été effectuée selon les deux modèles présentés :

Avec la formule de Hénin-Dupuis, les apports sont estimés entre 3,7 et 4,5 millions de tonnes de MO humifiée par an.

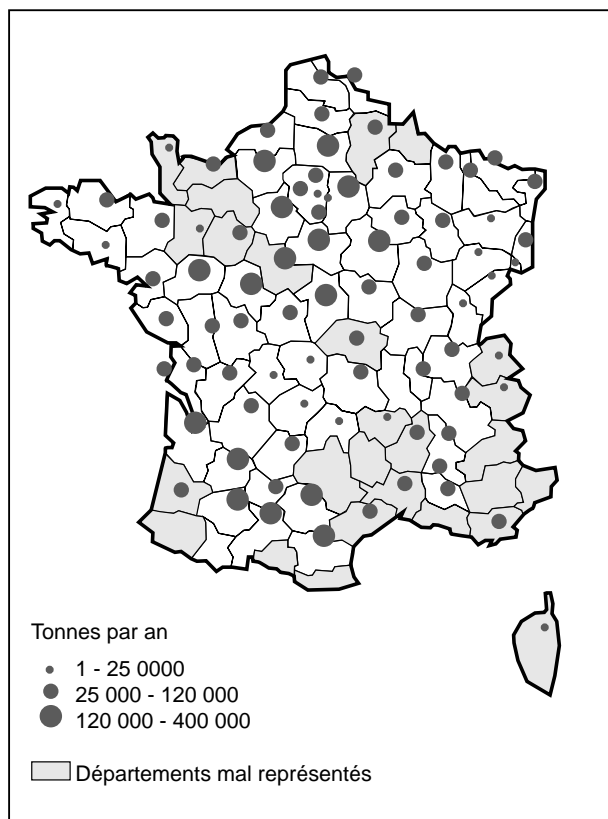
**Figure 8** - Estimation des surfaces déficitaires en MO par département. Les départements grisés sont ceux pour lesquels moins de 20 % de la SAU-STH est représentée dans la base ORVAL**Figure 8** - Estimate of surfaces in OM deficit (by department)

Avec la formule de AMG, les apports sont estimés entre 4,5 et 5,5 millions de tonnes de MO humifiée par an. La *figure 9* en expose la répartition en tonnage total par département dans le cas de l'hypothèse basse.

La différence de résultat entre les deux formules correspond à la différence d'évaluation de la quantité de MO minéralisée

**Figure 9** - Estimation, selon le modèle d'Andriulo et al., des quantités des MO humifiées à apporter pour un redressement de 10 % en 10 ans. Cas de l'hypothèse basse. Résultat global en tonnes par département.

**Figure 9** - Estimate, with Andriulo's model, of humified OM amounts necessary for 10 % increasing within 10 years. Low hypothesis. Global result in tons by department).



annuellement, au sein de la MO apportée lors du redressement. Par sa définition, le coefficient de minéralisation  $K$  (Modèle AMG) est en moyenne 3 à 4 fois supérieur au coefficient  $K_2$  (Modèle Hénin-Dupuis) mais porte sur la part active de la MO du sol soit 1/3 du stock. Globalement, le modèle AMG estime donc de façon légèrement supérieure et de façon plus réaliste (Mary et Guérif, 1994 ; Andriulo *et al.*, 1999) la minéralisation de la MO.

La répartition des quantités de MO nécessaires au redressement correspond aux zones estimées déficitaires précédemment. Les besoins peuvent être exprimés en quantité totale par département, ce qui pourrait être utile dans le cadre d'une gestion des ressources en MO, alors qu'une représentation des besoins rapportés à l'hectare donne une idée des apports théoriques moyens à effectuer au niveau parcellaire. Dans les cas les plus élevés, les valeurs atteignent 600 kg de MO humifiée par ha et par an (PACA, Ile de France, Midi Pyrénées). Cela cor-

respond à 18 tonnes par an d'un fumier moyen de bovin ( $K_1$  de 20 % et MO/MB = 16,5 %, soit 54 tonnes tous les 3 ans) ou à 4,8 tonnes de compost ( $K_1$  de 50 % et MO/MB<sup>(9)</sup> = 25%, soit 14,8 tonnes tous les 3 ans).

## DISCUSSION

Les diverses hypothèses adoptées au cours de notre raisonnement sont récapitulées dans le *tableau 5*. La volonté de travailler à une échelle nationale explique bon nombre de ces hypothèses et imposait les extrapolations opérées. Ces hypothèses conditionnent les divers résultats présentés et en sont fondamentalement indissociables. Nous en discutons certaines ci-dessous.

### Fiabilité de la base de données et des extrapolations

La base de données AFES (dont est issue la base ORVAL) résulte d'une synthèse de mesures faites dans les laboratoires et commandées par des agriculteurs. L'échantillonnage de cette base n'est donc pas maîtrisé et sa représentativité est délicate à évaluer. L'élaboration de la base ORVAL (par sélection des cantons suffisamment représentés) vient renforcer cette représentativité des données utilisées même si elle réduit leur couverture géographique.

En terme de répartition géographique des analyses et donc des bases de données, on remarque principalement deux phénomènes :

- d'importants vides correspondant soit à des zones de faible activité en matière d'analyses de terre (par exemple le Massif Central) soit à des zones couvertes par des laboratoires n'ayant pas communiqué de résultats correspondant à la période d'étude,
- deux zones très riches en analyses, reflétant les localisations des équipes de travail de la synthèse nationale des analyses de terre (le Nord et la Bretagne).

La littérature ne fait pas état de travaux similaires qui pourraient venir corroborer nos sources de données. Ceci souligne l'intérêt du programme national de mesure de la qualité des sols mis en place sous l'impulsion des Ministères de l'Agriculture et de la Pêche et de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement. Ce programme prévoit l'installation d'un réseau de surveillance national des sols français avec une maille de 16 km.

Notre étude n'est qu'une "photographie" de la situation à un moment donné. Il serait pertinent d'intégrer cette démarche dans une perspective plus évolutive, pour suivre les évolutions des teneurs en MO. Un complément et une actualisation de la base AFES seraient, dans cette optique, très bénéfiques.

(9) : MB : Matière brute

**Tableau 5** - Rappel des hypothèses et des sources d'approximations prises en compte dans nos calculs**Table 5** - Summary of the hypothesis and approximation sources included in our calculations

Phase du calcul	Hypothèses	Sources d'approximations
Base de données AFES		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Non maîtrise de l'échantillonnage</li> <li>• Couverture incomplète</li> <li>• Résultats des mesures à l'échelle cantonale</li> </ul>
Base de données ORVAL	<ul style="list-style-type: none"> <li>• (SAU-STH)/Surf. totale départementale = (SAU-STH)/Surf. totale cantonale</li> <li>• Médianes des mesures considérées représentatives du canton</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sélection des cantons représentatifs (10 mesures de MO et argile)</li> </ul>
Calcul des zones déficitaires	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Quantiles des teneurs en MO représentant une part des surfaces cantonales (Hypothèse haute et hypothèse basse).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abaque de Rémy et Marin-Lafèche</li> </ul>
Calcul des apports pour un redressement	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Redressement de 10 % en 10 ans des teneurs mesurées déficitaires</li> <li>• Climat uniforme sur tout le territoire</li> <li>• Y0 = teneur à l'équilibre</li> <li>• Systèmes de culture stables</li> <li>• Profondeur de labour de 25 cm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modèles de Hénin-Dupuis et d'Andriulo <i>et al.</i>,</li> <li>• Extrapolation des résultats cantonaux au niveau départemental puis national</li> </ul>

## Étude de sensibilité

L'étude de sensibilité menée dans notre étude montre l'importance de pouvoir disposer des teneurs en argile et calcaire. La façon dont ces critères sont pris en compte dans nos calculs correspond grossièrement à travailler sur des sols fictifs, aux caractéristiques recomposées. Nous associons en effet des caractéristiques moyennes et les supposons représentatives de certaines surfaces. Il n'est ainsi pas pris en compte les corrélations éventuelles entre facteurs. Il apparaît donc qu'un travail similaire mené sur les données originelles émanant des mêmes mesures présenterait l'intérêt d'intégrer ces corrélations.

### Choix de l'abaque de Rémy et Marin-Lafèche

L'abaque de Rémy et Marin-Lafèche est perfectible, en particulier pour les sols méditerranéens, justement ceux pour lesquels notre base de données comporte quelques lacunes. Il est largement utilisé en France pour l'interprétation de routine des analyses de sol. Bien qu'ancien et peu documenté quant à son domaine de validité, cet abaque n'a pas encore pu être remplacé par une autre référence similaire d'interprétation d'analyse de sol et de conseil aux agriculteurs.

### Limites inhérentes aux modèles

Notre souci n'a pas été de valider l'un ou l'autre des deux modèles utilisés. Nous avons retenu le modèle de Hénin-Dupuis qui présente l'intérêt de disposer de nombreuses références en

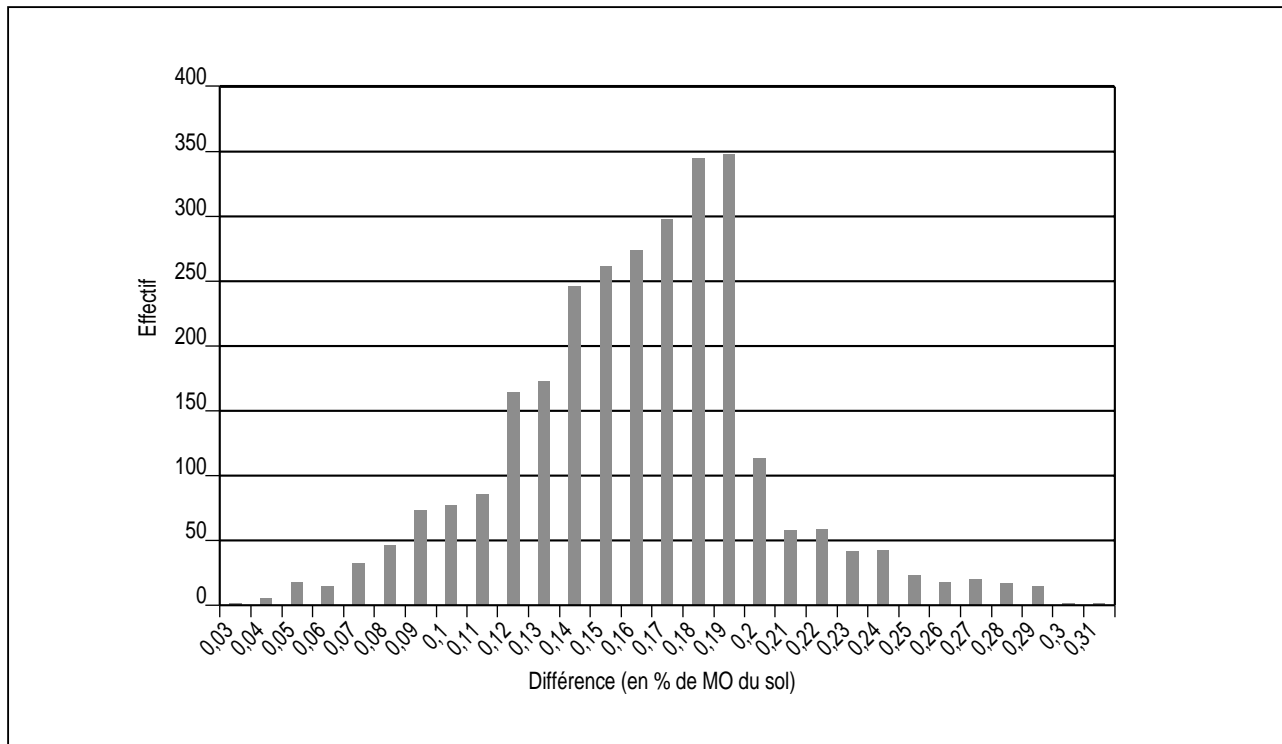
France et qui est simple à mettre en œuvre. Différentes études ont mis en évidence les limites de ce modèle (Boiffin *et al.*, 1986; Plénet *et al.*, 1993; Mary et Guéris, 1994; Andriulo, 1995): sur-estimation des stocks de MO à court terme après mise en culture ou quand les restitutions organiques sont fortes, sous-estimation à long terme ou quand les restitutions sont faibles. A moyen terme, 13 ans d'après Andriulo (1995), le modèle mono-compartimental ne peut être définitivement rejeté. C'est pourquoi nous l'avons conservé.

Ces études montrent, entre autres, que le coefficient  $K_2$  varie avec l'importance des restitutions organiques, et concluent que la MO du sol est hétérogène du point de vue de sa dynamique d'évolution (Andriulo, 1995). Mary et Guéris (1994) mettent en évidence qu'un modèle à deux compartiments est un modèle de substitution intéressant et permet de tenir compte du fait que "la" MO du sol est hétérogène: elle peut être subdivisée en plusieurs compartiments ayant des vitesses de décomposition différentes. La plupart des modèles plus complexes simulant l'évolution de la MO du sol sont basés sur ce concept (Balesdent, 1996, Powlson *et al.*, 1996; Smith et Smith *et al.*, 1997; Paustian *et al.*, 1997). Le modèle AMG en est une version basique.

Une limite commune à nos deux modèles vient du fait que ces modèles sont plutôt paramétrés pour les sols du nord de la France et ne sont que relativement peu adaptés aux sols méditerranéens. Une adaptation de ces modèles (paramétrage...) serait donc nécessaire (dans le cas où la base de données dis-

**Figure 10** - Distribution de la différence (en % de MO) entre les taux de MO mesurés et les taux après redressement de 10 %. Ces différences ont été calculées pour chacun des quantiles de teneur en MO contenus dans la base ORVAL et considéré déficitaires.

**Figure 10** - Distribution of the difference (in % of OM) between initial MO rate and MO rate after 10 % increase. Those differences have been calculated for each quantile of MO rate of the ORVAL database and presenting a MO deficit



poserait de données suffisantes concernant les régions méditerranéennes).

### Objectif de redressement

L'objectif fixé n'est pas d'atteindre partout et tout de suite le taux jugé satisfaisant. Le taux de 10 % de redressement a été choisi pour différentes raisons :

- D'un point de vue agronomique, il représente un redressement progressif des teneurs en MO, conseillé dans la pratique, ne modifiant que progressivement les équilibres du système sol-plante et les conditions physico-chimiques du milieu de culture.
- Ce taux correspond à une réalité commerciale et technique, du point de vue des agriculteurs qui devraient mettre en œuvre des chantiers de redressement de leur parcelle : la teneur moyenne en MO des parcelles déficitaires de la base de données retenue est de 1,61 % de MO. Redresser de 10 % en 10 ans un sol à 1,61 % impose un apport exogène de 0,7 tonnes de MO humifiée par hectare et par an soit un apport de l'ordre de 17 tonnes d'amendement organique tous les 3 ans ( $K_1 = 50\%$ ,  $MO/MB = 25\%$ ).

Ce choix de 10 % est discutable à l'échelle d'une parcelle prise individuellement car les apports dépendent alors du taux actuel de MO et non pas de l'ampleur du déficit. Mais, on peut considérer que l'application à un niveau global d'une telle hypothèse entraîne des compensations entre les parcelles très déficitaires et les parcelles très peu déficitaires. En effet, en prenant en compte les différences entre les taux initiaux de MO et les taux après redressement, on obtient une distribution (coefficient de distribution des données) quasi-symétrique (*figure 10*). Nous pouvons donc considérer que par sommation, les apports que nous estimons forts dans le cas des parcelles peu déficitaires (apports correspondant à 10 % d'un taux élevé), sont compensés par les apports que nous estimons faibles dans le cas des parcelles fortement déficitaires (apports correspondant à 10 % d'un taux faible). Ainsi, les résultats présentés dans cette étude seraient a priori plus fiables quand ils sont pris au niveau national qu'à l'échelle départementale. Une utilisation des résultats à l'échelle régionale voire départementale imposerait une étude de la distribution des données à ces échelles.

A titre de comparaison, l'hypothèse des 10 % de redressement peut être confrontée à d'autres hypothèses :

- (1) L'hypothèse d'un redressement complet de l'ensemble des parcelles déficitaires en 25 ans, jusqu'au taux satisfaisant de RML<sup>(10)</sup>,
- (2) L'hypothèse d'un redressement proportionnel au déficit de MO, c'est-à-dire à la différence entre le taux mesuré et le taux satisfaisant de RML.

L'hypothèse (1) aboutit à l'estimation d'un besoin national de 8,1 millions de tonnes de MO humifiée par an (Modèle AMG). Dans le cas de l'hypothèse (2), il faut viser un redressement de 33 % du déficit sur 10 ans pour atteindre un besoin de 4,5 millions de tonnes de MO humifiée par an équivalent à notre résultat d'estimation des besoins.

Enfin, une de nos hypothèses était que les taux mesurés présents dans la base de données correspondaient aux taux à l'équilibre. Ceci suppose donc que les apports que nous estimons nécessaires pour un redressement ne sont qu'une partie des apports réellement nécessaires. A ces apports devraient être ajoutés, dans une perspective plus réaliste d'évolution des besoins, les apports en MO nécessaires pour réellement atteindre une situation d'équilibre correspondant aux taux mesurés. Certains taux de la base de données peuvent en effet avoir été mesurés dans des parcelles où la teneur en MO n'est pas stabilisée, comme il a été constaté dans de nombreuses régions (Balesdent, 1996).

Notre estimation correspond donc à une estimation minimaliste des besoins puisque le redressement envisagé est peu ambitieux et, qu'il suppose des taux déjà stabilisés, ce qui n'est *a priori* pas le cas partout.

## Discussion sur les résultats des calculs

Le déficit en matière organique est une tendance générale mais l'interprétation en fonction des régions est complexe : elle doit intégrer des considérations géologiques ou pédologiques, l'influence climatique ou encore celles des systèmes de production.

De plus, notre estimation tendrait à placer le pourtour méditerranéen et la vallée du Rhône parmi les zones déficitaires. Mais l'incertitude sur ces zones est importante : la base de données AFES est peu renseignée dans ces régions et les modèles utilisés ont été essentiellement paramétrés pour le Nord de la France. A l'opposé, les départements qui apparaissent comme à faible déficit ne sont pas nécessairement des zones où le problème de l'entretien de la MO peut être négligé, notamment du fait d'hétérogénéités locales ou de l'éventuelle existence de décroissances plus rapides des teneurs, en lien avec les changements encore récents des systèmes de culture.

Il convient ainsi de considérer nos résultats comme une première ébauche à soumettre à l'avis d'experts régionaux qui pourront venir compléter, confirmer ou corriger ces évaluations.

(10) : Ce qui correspond à l'objectif conseillé en routine à l'INRA d'Arras

(11) : Coefficient de passage de MO fraîche à MO humifiée

## Comparaison des besoins aux gisements actuels et potentiels d'amendements

Les apports sont pour l'heure exprimés en MO humifiée. Ces 3,7 à 5,5 millions de tonnes obtenus par les deux modèles correspondent à **30 à 44 millions de tonnes d'amendement organique** moyen de type compost, en matière brute (MB) ( $K_1^{(11)}$  de 50 % et MO/MB = 25 %). La production française actuelle 1999 peut être estimée à environ 200 000 tonnes d'amendements organiques industriels, 100 000 tonnes de composts végétaux utilisés en amendement, 500 000 tonnes de composts urbains et 150 000 tonnes de composts de boues d'épuration (Estimations réalisées à partir de différentes sources : ADEME, Chambre Syndicale des Amendements organiques et Supports de culture (CAS), Fédération Nationale des Activités du Déchet et de l'Environnement (FNADE), Syndicat des Professionnels du Recyclage en Agriculture (SYPREA).

A titre de comparaison, la quantité de MO humifiée (3, 7 à 5,5 millions de tonnes humifiées) représente l'équivalent à la MO issue de **114 à 166 millions de tonnes de fumier pailleux** moyen de bovin ( $K_1$  de 20 % et MO/MB = 16,5 %), soit approximativement la production annuelle de l'ensemble du cheptel bovin français (130 millions de tonnes de fumier en 1991) (Defaye et Plumail, 1991). D'après nos hypothèses de calcul, tout ce fumier ainsi que certains résidus de récolte sont déjà incorporés au sol et participent au maintien des taux actuels, il ne peut donc pas venir répondre aux besoins dans le cadre d'un redressement (sauf dans le cas de zones excédentaires en MO).

Ces résultats illustrent, par leur ampleur, la quantité très importante de MO théoriquement nécessaire pour le redressement supposé. Soulignons qu'envisager la réponse à ce besoin ne peut se faire qu'en considérant la qualité des amendements apportés et leur pouvoir humigène. Des études complémentaires pourront là encore être mises en œuvre pour établir la corrélation (d'un point de vue qualitatif et géographique) entre besoins en MO et gisements disponibles. Ces tonnages pourraient correspondre à des amendements organiques élaborés à partir de fraction fermentescible d'ordures ménagères, de déchets végétaux... Dans tous les cas, l'insuffisance des ressources supplémentaires de MO implique de porter également notre attention sur les changements de systèmes de culture et de production : le recours aux prairies de longue durée, l'enherbement des cultures pérennes ou le non-labour pourraient venir modifier la tendance générale.

## CONCLUSION

Les travaux présentés ici fournissent une première évaluation d'un besoin en MO des sols français. Etant donné les limites mises en évidence concernant les calculs et les bases de données utilisées, il semble prudent de ne retenir que les ordres de grandeur des résultats nationaux exposés ici (les résultats pré-

sentés à une échelle départementale étant encore plus soumis à réserve). Ces limites mises à jour ont également le mérite de souligner le besoin de travaux complémentaires de quantification des besoins, de création d'outils d'évaluation qui pourront venir valider ces premiers résultats et en compléter les interprétations.

Envisager un redressement de 10 % des teneurs des sols déficitaires pouvait paraître peu ambitieux mais cet objectif s'avère requérir un gisement potentiel en MO des plus conséquents.

En réponse à l'évaluation des besoins, une évaluation quantitative et qualitative (pouvoir humigène) des gisements de MO qui pourraient répondre aux besoins paraît également nécessaire (estimation et répartition des fumiers, des composts de sous-produits organiques...).

Nous avons abordé la question du besoin en MO des sols. Déterminer un besoin des sols ne veut pas dire identifier une demande de la part des agriculteurs. Il semble qu'une re-sensibilisation des agriculteurs et de leurs prescripteurs aux besoins de leurs sols puisse être utile à mettre en place.

## REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier Marie-Laure Guillotin et Jean-Claude Kéromnes pour leur aide précieuse et avertie, ainsi que messieurs Jean Roger-Estrade et Pierre Stengel pour leurs commentaires éclairés en tant que correcteurs de cet article.

## BIBLIOGRAPHIE

- Anonyme, 1998 - Le sol, un patrimoine à ménager. Collection Les données de l'environnement, Institut Français de l'Environnement. n° 38, juillet 1998, 4 p.
- Andriulo, A., 1995 - Modélisation de l'évolution des matières organiques des sols de la Pampa. Relation avec les systèmes de culture. Thèse doctorat INA-PG, 143 p.
- Andriulo A., Mary B., Guerif J., 1999 - Modelling soil carbon dynamics with various cropping sequences on the rolling pampas. *Agronomie* vol. 19, n° 5, 365-377.
- Baize D., 1988 - Guide des analyses courantes en pédologie. INRA Editions, Paris, 172 p.
- Baize D., 2000 - Guide des analyses en pédologie. 2<sup>e</sup> édition. INRA Editions, Techniques et pratiques, 266 p.
- Balesdent J., 1996 - Un point sur l'évolution des réserves organiques des sols en France. *Étude et Gestion des Sols*, 3 (4), 1996, 245-260, N° spécial.
- Boiffin J., Keli-Zagbahi J., Sebillote M., 1986 - Systèmes de culture et statut organique des sols dans le Noyonnais: applications du modèle de Hénin et Dupuis. *Agronomie*, 6: 437-446.
- Boiffin J., Stengel P., 1999 - DEMETER 2000, Réapprendre le sol: Nouvel enjeu pour l'agriculture et l'espace rural. *Economie et stratégies agricoles*, Ed. Armand Colin, 72-147.
- Brisson N., Mary B., Ripoche D., Jeuffroy M.H., Ruget F., Nicoulaud B., Gate P., Devienne F., Antonioletti R., Durr C., Richard G., Beaudoin N., Recous S., Tayot X., Plenet D., Cellier P., Machaet J.M., Meynard J.M., Delecolle R., 1998 - STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balance. I. Theory and parametrization applied to wheat and corn. *Agronomie* 18, 311-346.
- Chaussod R., 1996 - La qualité biologique des sols: évaluation et implications. *Étude et gestion des sols*, 3 (1996), 261-279.
- Defaye S., Plumail D., 1991 - Les fumiers de bovins, Aspects agro-écologiques et technico-économiques. *Biomasse Normandie pour le Ministère de l'Agriculture et de la Forêt et l'ANRED*, 43 p.
- Le Bissonnais Y., Montier C., Daroussin J., King D., 1998 - Cartographie de l'aléa érosion des sols en France (Ifen, MATE, INRA). *Études et travaux n°18 - août 1998*, 63 p.
- Hénin S., Dupuis M., 1945 - Essai de bilan de la matière organique des sols. *Ann. Agron.* 1945; 15: 161-172.
- Linères M., Djakovitch J.L., 1993 - Caractérisation de la stabilité biologique des apports organiques par l'analyse biochimique. *Journées de Blois - GEMAS - COMIFER - Novembre 1993*.
- Martin S., Baize D., Bonneau M., Chaussod R., Ciesielski H., Gaultier J.P., Lavelle P., Legros, J.P., Lepretre A., Sterckeman T., 1999 - Le suivi de la qualité des sols en France, la contribution de l'Observatoire de la Qualité des sols. *Étude et Gestion des Sols*, vol. 6 (3), 215-230.
- Mary B., Guerif J., 1994 - Intérêts et limites des modèles de prévision de l'évolution des matières organiques et de l'azote dans le sol. *Cahiers Agricultures* 1994; 3: 247-57.
- Mary B., Wyllan R., Guerif J., 1999 - Evolution des stocks de matière organique dans les sols cultivés: caractérisation et modélisation. *Colloque Nature et fonctions des Matières organiques dans l'environnement*, Versailles, 2-3 juin 1999.
- Mc Guire A.D., Melillo J.M., Kicklighter D.W., Joyce L.A., 1995 - Equilibrium responses of soil carbon to climate change: empirical and process-based estimates. *Journal of Biogeography* (1995), 22, 785-796.
- Paustian K., Levine E., Post W.M., Ryzhova I.M., 1997 - The use of models to integrate information and understanding of soil C at the regional scale. *Geoderma* 79 (1997) 227-260.
- Powelson D.S., Smith P., Smith J.W., 1996 - Evaluation of soil organic matter models. Springer Verlag, Berlin, 429 p.



- Plenet D., Lubet E., Juste C., 1993 - Evolution à long terme du statut carboné du sol en monoculture non irriguée de maïs. *Agronomie* 1993; 13: 685-98.
- Remy J.C., Marin-Lafèche A., 1974 - L'analyse de terre : réalisation d'un programme d'interprétation automatique. *Ann. Agron.*, 1974, 25(4), 607-632.
- Rémy et Viaux (1982) in " Azotes, cultures légumières et fraisier. Environnement et Qualité - CTIFL, Hortipratic, 1999. pp. 40-41 - 1999 - Paris ".
- Robin D., 1997 - Intérêt de la caractérisation biochimique pour l'évaluation de la proportion de matière organique stable après décomposition dans le sol et la classification des produits organo-minéraux. *Agronomie* 1997, 17, 157-171.
- Schvartz C., Walter C., Claudot B., Bouedo T., Arousseau P., 1997 - Synthèse nationale des analyses de terre. I. Constitution d'une banque de données cantonale. *Étude et Gestion des Sols*, vol. 4 (3), 191-204.
- Smith P., Powlson D.S., Glendining M.J., Smith J.U., 1997 - Potential for carbon sequestration in european soils: preliminary estimates for five scenarios using results from long term experiments. *Global Change Biology* (1997) 3, 67-79.
- Smith P., Smith J.U., Powlson D.S., McGill W.B., Arah, J.R.M., *et al.*, 1997 - A comparison of the performance of nine soil organic mater models using datasets from seven long-term experiments. *Geoderma* 80 (1997) 153-225.
- Walter C., Schvartz C., Claudot B., Bouedo T., Arousseau P., 1997 - Synthèse nationale des analyses de terre. II. Constitution d'une banque de données cantonale. *Étude et Gestion des Sols*, vol. 3 (4), 205-219.
- Walter C., Schvartz C., Claudot B., Arousseau P., Bouedo T., 1998 - Synthèse nationale des analyses de terre : Période 1990-1994. Ed. AFES 2<sup>e</sup> édition, Avril 1998, 66 p + cartes.
- Wu L., Mac Gechan, 1998 - A review of Carbon and nitrogen processes in four soil nitrogen dynamics models. *J; agriculteur. Engng Res* (1999) 69, 279-305.
- Wylleman R., 1999 - Caractérisation et modélisation de l'évolution des stocks de matière organique des sols de grande culture en Picardie. Étude INRA pour l'Union des experts agricoles, fonciers et immobiliers du Nord de la France et la Chambre régionale d'agriculture de Picardie. Paris, 34 p.

---

## PUBLICATIONS ET DOCUMENTS PUBLIÉS PAR L'AFES

### REVUES

#### SCIENCE DU SOL

Revue scientifique publiée de 1952 à 1993.  
Elle comporte 300 à 400 pages par an. Un index est présenté tous les ans dans le quatrième numéro.  
A cessé de paraître fin 1993. Certains numéros disponibles.

#### LA LETTRE DE L'ASSOCIATION

Publiée quatre fois par an, ce journal annonce les nouvelles de l'association, les réunions nationales et internationales; il donne des critiques d'ouvrages, de thèses, de la documentation, etc.

La Lettre est envoyée à chaque adhérent de l'association : elle accompagne l'adhésion.

Rédacteur en chef : J.P. Rossignol, ENITH, Angers.

#### ÉTUDE ET GESTION DES SOLS

Revue trimestrielle, francophone traitant de la connaissance et de l'usage des sols.

Rédacteur en chef : M. Jamagne.

Secrétariat de rédaction : Micheline Eimberck et J.P. Rossignol.

Le Comité Éditorial est composé de trente membres de France et de pays francophones.

### OUVRAGES

#### LE LIVRE JUBILAIRE (1984)

Point sur les acquis à cette date en matière de science du sol et de pédologie.

#### FONCTIONNEMENT HYDRIQUE ET COMPORTEMENT DU SOL (1984)

#### PODZOLS ET PODZOLISATION

par D. Righi et A. Chauvel : ouvrage publié en coédition par l'AFES et l'INRA, avec le concours du CNRS, de l'ORSTOM, et de la région Poitou-Charentes (1987).

#### MICROMORPHOLOGIE DES SOLS/SOIL MICROMORPHOLOGY

par N. Fédoroff, L.M. Bresson, Marie Agnès Courty, publié par l'AFES avec le concours du CNRS, de l'INAPG, de l'INRA, du Ministère de l'Environnement et de l'ORSTOM (1985) (épuisé).

#### CARTE MONDIALE DES SOLS ET SA LÉGENDE

Présentée sous forme de deux diapositives (1984).

#### LE RÉFÉRENTIEL PÉDOLOGIQUE

Principaux sols d'Europe, deuxième édition 1995. Ouvrage collectif publié par l'AFES et l'INRA.

#### SYNTHÈSE NATIONALE DES ANALYSES DE TERRE : PÉRIODE 1990-1994

par C. Walter, C. Schvartz, B. Claudot, P. Arousseau et T. Bouedo, avec le concours du Ministère de l'Agriculture et de la Pêche.

#### ACTES DU XVI<sup>E</sup> CONGRÈS MONDIAL DE SCIENCES DU SOL, MONTPELLIER - AOÛT 1998