

Modelling of organic carbon forms in soils¹

Modélisation des formes du carbone organique dans les sols¹

M.Pansu², Z. Sallih³ & P.Bottner³

Summary :

We have recently proposed a mathematical model describing the simultaneous evolution of soil carbon forms (plant debris, microbial biomass, labile and stable humified matter) and total carbon. The present paper reports the situation of this model (MOMO'S model) among other ones proposed since 1945. Some mathematical interests of MOMO'S model are also put in evidence. Its programming on a software of dynamic simulation is a very easy one because of the relative simplicity of formulation and the ergonomy of the chosen software.

Another interest of MOMO'S model is in its capability to fit lots of experimental data from incubation experiments simultaneously : evolution as a function of time of ¹⁴C and total-C in soil, ¹⁴C and total-C in microbial biomass, ¹⁴C and total-C in plant debris separated by a physical mean. The simulation of a 40-year evolution of soils under the same inputs than in the experiment, allow to explain the differences between the two soils about their total carbon contents and their carbon contents in plant debris. Therefore, this modelling both represents a tool for predicting the evolution of soil organic status and understanding the soil organic genesis.

Résumé :

Nous avons proposé récemment un modèle mathématique pour décrire l'évolution simultanée, dans les sols, du carbone : des fractions végétales, de la biomasse microbienne, des matières humifiées labiles et stables et du carbone total. La nouvelle présentation décrite ici permet de situer ce modèle (modèle MOMO'S) parmi d'autres propositions depuis 1945. Un certain nombre d'attraits mathématiques du modèle MOMO'S sont

¹Communication aux quatrièmees journées d'étude des sols, Lille, France, 19-21 Avril 1994

²ORSTOM, BP 5045, 34032 Montpellier Cedex, France

³C.E.F.E - C.N.R.S., BP5051, 34033 Montpellier Cedex, France

Fonds Documentaire IRD



010025752

Fonds Documentaire IRD
Cote : Bx25752 Ex : 1

également montrés. Sa programmation sur un logiciel de simulation dynamique est décrite comme très aisée du fait de la relative simplicité de sa formulation mathématique et de l'ergonomie du logiciel choisi. Un autre intérêt du modèle réside dans sa capacité à ajuster simultanément des séries de données expérimentales d'incubation concernant l'évolution en fonction du temps : du carbone marqué et total du sol, du carbone marqué et total de la biomasse microbienne, du carbone marqué et total de résidus végétaux séparés par une technique physique.

La simulation de l'évolution, pendant 40 ans, des deux sols étudiés, soumis au même régime d'apport que pendant l'expérience, apporte une explication à la différence mesurée de leurs taux de carbone organique total et sous forme de fragments organiques. Elle constitue donc à la fois un outil de prévision de l'évolution du statut organique des sols et de compréhension de leur genèse.

Introduction

L'appréciation du renouvellement des matières organiques des sols et de l'évolution des stocks disponibles à la suite de changements de pratiques culturales (déforestation, disparition du fumier de ferme, culture mécanisée, etc.), constitue un des défis majeurs posés aujourd'hui à la recherche. Au niveau des sciences agronomiques, les matières organiques sont l'une des principales clés du maintien d'une agriculture durable ; au niveau du globe, le carbone du sol constitue une réserve susceptible d'influer le taux de carbone atmosphérique. Les approches de terrain mises en oeuvre pour quantifier l'évolution des matières organiques des sols utilisent la plupart du temps, d'une part des mesures de carbone dans le sol total ou dans certaines de ses fractions (Arrouet et Pelissier, 1994), d'autre part des mesures $\delta^{13}\text{C}$ lorsque les conditions le permettent (Balesdent *et al.*, 1987). Elles nécessitent des suivis sur des durées assez longues avec des échantillonnages difficiles et entachés d'erreurs importantes (Veldkamp et Weitz, 1994).

Les modèles mathématiques constituent, également une approche intéressante et notre travail se situe dans cette voie. Nous avons proposé un modèle à cinq compartiments pour décrire le cycle du carbone organique incorporé depuis les apports végétaux dans les sols (Sallih et Pansu, 1993). L'objet de cette communication consiste à présenter l'évolution de notre réflexion sur ce modèle maintenant appelé MOMO'S (in English « Modelling of Organic Matter Of Soils », en Français « MODélisation des Matières Organiques des Sols »). Elle peut se diviser dans les grands aspects suivants :

- mise en évidence de la continuité du modèle avec des approches plus anciennes, intérêts mathématiques de la formulation, programmation sur un logiciel de simulation dynamique,
- rappel des données qui ont servi à l'établissement du modèle,
- simulation dynamique d'évolution des compartiments carbone sur quelques dizaines d'années (application à des études prévisionnelles d'évolution des sols).

Présentation du modèle

Formulation

Le modèle présenté par Sallih et Pansu (1993) a été situé entre ceux plus simples à deux et trois compartiments proposés précédemment par Pansu et Sidi (1987) et celui proposé par Jenkinson et Rayner (1977) pour décrire l'évolution à long terme de compartiments carbone du sol, ce dernier intégrant particulièrement un compartiment de très grande stabilité. Le modèle de Jenkinson (1990) peut également être formulé de

compartiments, avec $i = 2, 3, 4$ ou 5 selon le modèle employé. k_m est le coefficient de vitesse de décroissance du compartiment « m » (T^{-1}) et P_m exprime la proportion de la matière organique provenant des compartiments ($\sum k_i C_i$) qui est incorporée dans le compartiment m . Cette loi est établie pour les conditions de l'expérimentation de Sallih(1990) soit un seul apport en début d'expérimentation dont on étudie l'évolution au cours du temps dans les 5 compartiments du modèle, soit :

- les résidus végétaux labiles : V_L ,
- les résidus végétaux stables : V_R ,
- les matières organiques incorporées dans la partie labile non vivante du sol : A ,
- les matières organiques de la biomasse microbienne : B ,
- les matières humifiées stables H .

Les compartiments permettent de différencier la matière organique du sol. Avec deux compartiments (Hénin, Monnier et Turc, 1959 ; Pansu et Sidi, 1987), la différenciation reste assez globale ; elle permet de distinguer d'une part, le groupe des matières organiques labiles qui peuvent s'accumuler « dans les milieux mal aérés, acides ou au contraire par trop sec » (Hénin, Monnier et Turc, 1959), d'autre part le groupe de matières humifiées stables, généralement à rapport Carbone/azote plus faible. Avec 3 compartiments (Pansu et Sidi, 1987), on peut distinguer les matières d'origine végétale, encore reconnaissables et séparables par des méthodes physiques, des autres matières labiles plus incorporées aux sols de manière chimique ou biologique (assimilation par la biomasse microbienne). La distinction peut s'avérer importante car les deux groupes de matières vont induire des propriétés différentes aux sols, dans leur stabilité structurale par exemple (Sidi et Pansu, 1990). Ce même modèle peut aussi s'écrire avec 4 compartiments si l'on n'englobe pas comme Pansu et Sidi, les matières végétales dans un seul compartiment mais dans un compartiment labile et un compartiment stable comme Sallih et Pansu. L'adjonction d'un compartiment supplémentaire permet alors de distinguer, parmi les matières labiles du sol, celles qui appartiennent à la biomasse microbienne des autres.

Intérêts mathématiques

Ainsi, que l'on considère la matière organique sous une forme globale, ou que l'on affine sa description en prenant en compte sa répartition dans plusieurs compartiments du sol, on dispose de toute une panoplie de modèles avec un concept de fonctionnement analogue. Il paraît étonnant qu'une loi (1) aussi simple puisse suffire à décrire l'évolution d'un milieu si divers que les matières organiques des sols et des phénomènes si compliqués que les processus de l'humification et leurs nombreux mécanismes physiques, biologiques et chimiques. Nous ne sommes pourtant pas les premiers à nous émerveiller de « la déraisonnable efficacité des mathématiques dans les sciences naturelles » (Wigner, 1960) ; cependant, notre loi globale n'explique pas le détail des mécanismes et il n'est pas prouvé qu'elle puisse être appliquée à toutes les conditions.

Les mesures sont souvent relativement peu précises dans le domaine des matières organiques des sols, surtout en conditions naturelles où l'échantillonnage est très difficile du fait des nombreuses fluctuations dans l'espace et surtout dans le temps. Dans ces conditions, une certaine rigidité de la loi mathématique est intéressante pour des études descriptives ; Hénin et Dupuis soulignaient ce fait dès 1945 à la présentation de leur modèle : « la rigidité de la loi mathématique utilisée pour l'interpolation des résultats permet, d'autre part, de faire ressortir sans ambiguïté l'importance des erreurs et leur probabilité » ; il est probable que les agronomes qui ont appliqué ou tenté d'appliquer,

depuis cette date, le modèle de Hénin et Dupuis à des études de terrain ne contrediront pas cette affirmation.

Un autre intérêt théorique du modèle est qu'il constitue un système d'équations différentielles linéaires du premier ordre à coefficients constants, ce qui n'est pas toujours le cas dans d'autres propositions. Ceci est une garantie d'un comportement n'évoluant pas vers le chaos ; il est maintenant bien connu que ceci peut se produire même pour des systèmes très simples d'équations mais qui comportent toujours une non linéarité (Eckmann et Ruelle, 1985). En outre, la solution de notre système, dans le cas du modèle à deux compartiments, se ramène à celle d'une seule équation différentielle linéaire du deuxième ordre à coefficients constants : c'est une somme de deux exponentielles (le

diagrammes des flux ou diagrammes relationnels, mais les représentations les plus familières à ce logiciel sont les diagrammes des causes (causal diagram). Une particularité intéressante est que chaque variable d'état peut être décomposée en plusieurs sous-niveaux (subscripts). C'est ainsi que la représentation du modèle selon l'équation (2) devient très simple ; le diagramme causal d'un seul compartiment permettant de décrire le système tout entier (Fig.2).

Vensim fonctionne sous Windows sur micro-ordinateurs compatibles PC. Un co-processeur arithmétique ou un microprocesseur de haut de gamme est conseillé pour certains calculs.

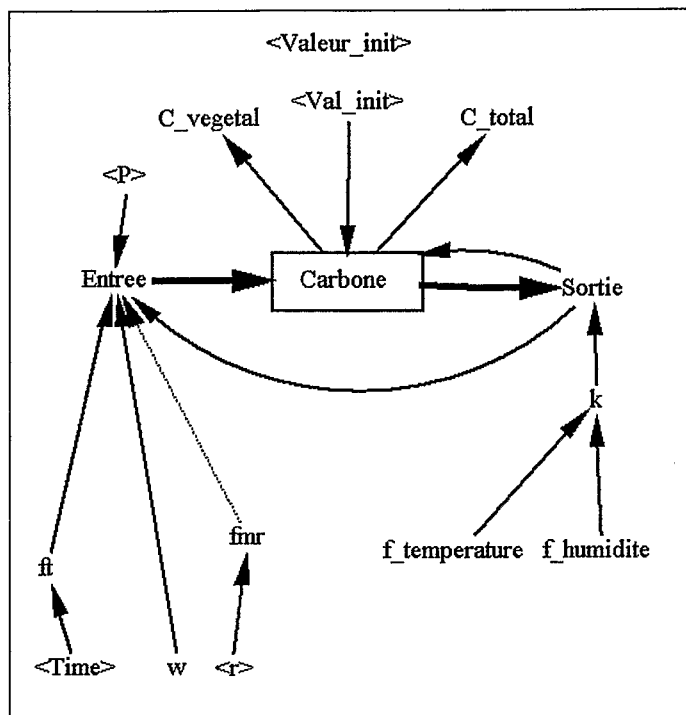


Fig.2 : diagramme causal partiel du modèle MOMO'S (équation 2) établi avec le logiciel VENSIM.

Fig.2 : partial causal diagram of MOMO'S model (equation 2) made with VENSIM Software.

Application

Données expérimentales

Elles ont été obtenues par Sallih(1990) sur des incubations en laboratoire, dans des conditions proches des conditions naturelles, de paille de blé doublement marquée au ^{14}C et ^{15}N mélangée à deux sols développés sous climat méditerranéen humide (tableau I) : un sol fersialitique calcique (sol 1), un sol brun typique sous prairie (sol 2) (CPCS, 1967). Le sol 1 est plus argileux et moins organique que le sol 2. Ce dernier comporte 45 % de sables grossiers et plus de deux fois le taux de carbone du premier avec plus de fragments séparables physiquement.

Tableau I : principales caractéristiques des deux sols utilisés (C-frag = carbone sous forme de fragments séparés par densimétrie et tamisage, Fig.3)

Table I : main characteristics of the two soils (C-Frag = carbon in debris separated by densimetry and sieving, Fig.3)

Sols	Granulométrie (%)					Org.C %	C-frag %	N %	CaCO 3 %	pH(H ₂ O)
	2- 0.2m m	200- 50µm	50- 20µm	20- 2µm	<2µm					
1	7	18	24	21	29	1.2	0.2	0.12	2.2	7.9
2	45	12	11	18	11	2.7	0.9	0.2	<0.1	6.5

Pendant deux ans, de nombreuses mesures ont été effectuées ; celles retenues pour ce modèle concernaient l'évolution simultanée :

- du ¹⁴C total,
- du ¹⁴C de la biomasse microbienne mesuré par une méthode de fumigation,
- du ¹⁴C des fragments végétaux séparés selon une technique physique (Fig.3).

ainsi que les mesures de carbone total (¹²C + ¹⁴C) correspondant aux mêmes compartiments.

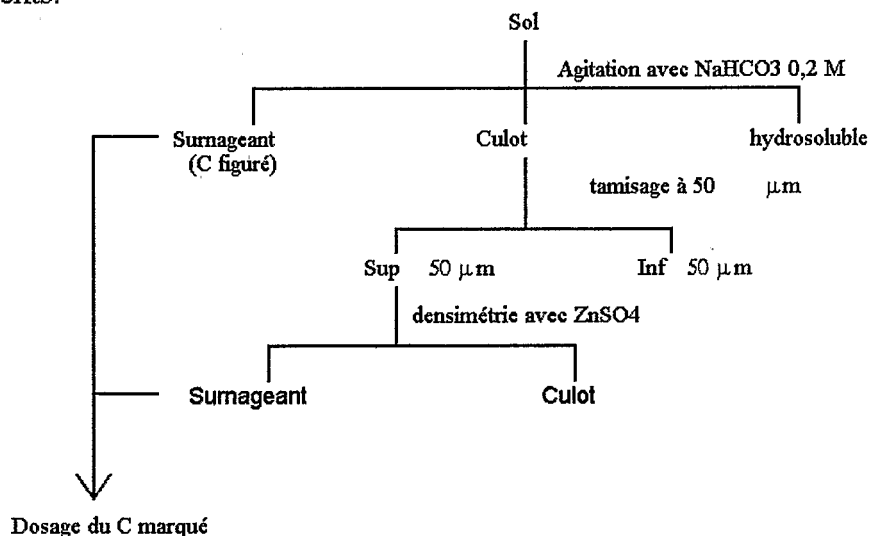


Fig. 3 : Schéma de la technique de fractionnement physique utilisée

Fig.3 : scheme of the used method of physical fractionation,

II.3 Ajustements aux données

La figure 4 reproduit les ajustements obtenus par Sallih et Pansu (1993) pour les deux types de sols étudiés. Les compartiments humifiés labile (A) et stable (H) ne sont pas mesurés mais simulés par le modèle. Leur somme représente le défaut de bilan (¹⁴C-total- (¹⁴C-biomasse+¹⁴C-fragments)). Le compartiment A est en outre corrélé avec la fraction hydrosoluble avec un maximum nettement plus tôt que celui de la biomasse microbienne, mais avec des valeurs plus fortes. L'ajustement global de toutes les données par notre

modèle est aussi satisfaisant que des ajustements plus classiques sur chaque série de données réalisés précédemment par Bottner *et al.*(1988) et Sallih et Bottner (1988).

Cependant des différences assez importantes entre types de sols sont bien mises en évidence par le modèle. Globalement, la minéralisation est plus intense dans le sol 1 et le coefficient de minéralisation que nous avons défini, prend les valeurs : $M= 0,26$ et $0,15$ respectivement pour le sol 1 et le sol 2. En début d'incubation, cet ordre est cependant inversé avec une minéralisation plus rapide dans le sol 2. Deux hypothèses ont été émises pour expliquer ce phénomène : protection des matières labiles par les argiles dans le sol 1 ou bien passé cultural différent des deux sols ; le sol 2, sous prairie depuis longtemps, pourrait posséder une biomasse microbienne mieux adaptée à la destruction des matières labiles.

La simulation de l'humification (compartiment H) est notablement plus importante dans le sol 1 que dans le sol 2, en conformité avec certaines hypothèses concernant le rôle des argiles dans ce processus. Nous avons signalé une ambiguïté dans le calcul du coefficient isohumique selon que l'on considère classiquement la fraction restante de la matière apportée ou celle transformée en humus (définition de Hénin, Monnier et Turc, 1959) simulée par H. Le sol 2 qui paraît le mieux stabilisé au seul vu de la décroissance globale du carbone apporté, est en fait le plus loin de l'équilibre.

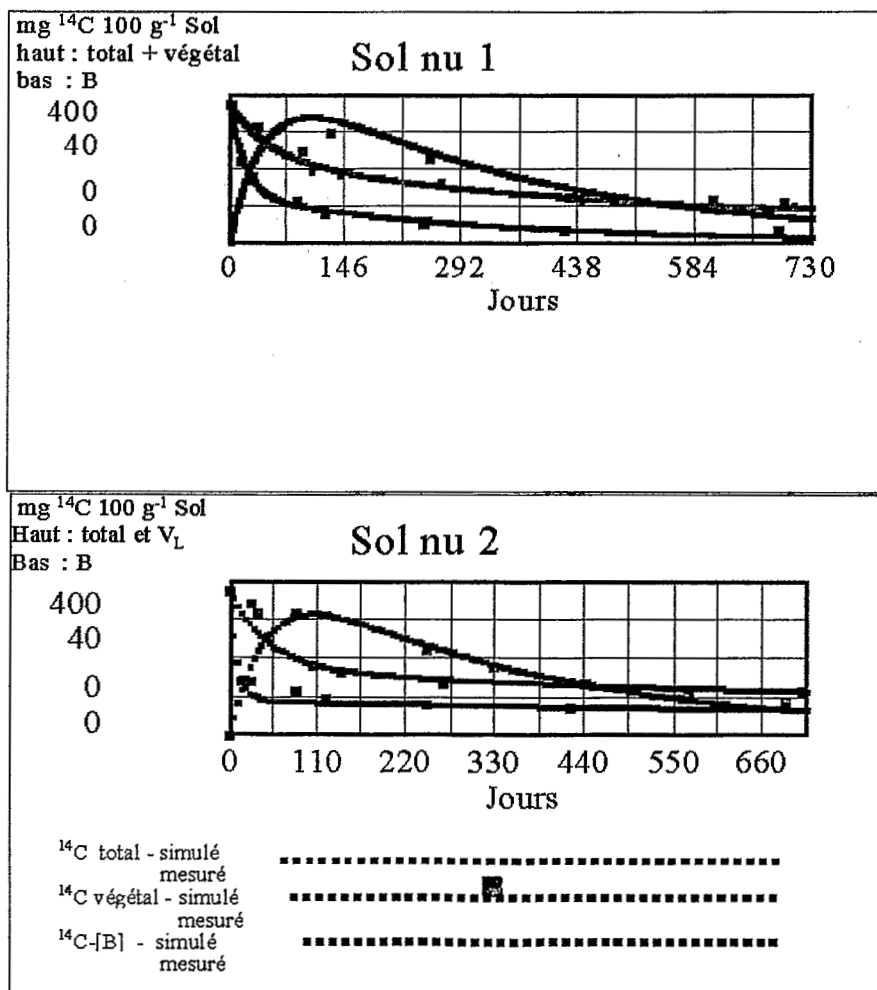


Fig.4 : Ajustement par le modèle des 3 séries de données ^{14}C pour les deux types de sols.

Fig.4 : model fitting of the 3 lot of ^{14}C data for the two soils.

Le même modèle a permis d'ajuster les données C-total en changeant les valeurs initiales des compartiments A, B, H (égales à 0 dans le cas du carbone marqué) en conservant les autres paramètres trouvés pour ^{14}C . Nous ne reproduirons pas ici ces ajustements, le lecteur pouvant se reporter à la publication citée. Nous avons déjà indiqué que cette deuxième série d'ajustements constitue une pseudo-validation interne à l'expérimentation. Ce modèle apparaît donc satisfaisant pour décrire le cycle du carbone, apporté ou natif, dans les sols.

Simulation de l'évolution des sols sous un régime d'apports constants

Comme indiqué en introduction, l'un des intérêts majeurs de ces modèles est de pouvoir servir à des études prévisionnelles d'évolution du statut organique des sols en fonction de leur système de gestion. A titre d'exemple, la figure 5 montre l'évolution simulée par notre modèle, des compartiments carbone des deux sols étudiés soumis tous les deux ans pendant 40 ans, au même régime d'apport que celui du début de l'expérimentation.

Cette figure met bien en évidence les fluctuations saisonnières des matières organiques des sols, souvent supérieures à l'évolution moyenne sur une ou quelques dizaine d'années.

On remarque aussi des différences importantes dans la pédogenèse organique de chacun des sols. Sous ce régime, l'évolution organique du sol 1 se stabilise vers 25 ans, avec une majorité de carbone organique sous forme humifiée bien incorporée au sol (compartiment H). Si l'on considère une répartition uniforme dans les premiers 10 cm du sol, l'apport biennal correspond à environ 5 tonnes de C à l'hectare. L'augmentation de carbone du sol sera d'environ 0,5 %, ce qui correspond à 7 tonnes à l'hectare après 40 ans d'apports soit 100 tonnes apportées au total.

Le taux de matières organiques du sol 2, par contre, continue de croître à plus de 40 ans. Il faut une centaine d'années pour arriver à une stabilisation vers 1,2% de C (16 Mg ha⁻¹). Pour les deux sols, le rapport du carbone restant au carbone total apporté dans tout le cycle se situe donc vers 7%. Il est intéressant de constater que la simulation fournit à l'équilibre une quantité plus importante de carbone dans le sol 2 que dans le sol 1. Elle va donc dans le même sens que la pédogenèse des sols, les taux de carbone total à l'origine étant de 1,2 % pour le sol 1 et 2,7 % pour le sol 2 (Tableau I). Cette simulation portant sur les produits marqués pourrait être envisagée comme la mise à l'équilibre en carbone organique des sols qui n'en contiendraient pas au départ ; dans ces conditions les différences notées entre carbone total des sols (tableau I) et carbone simulé à l'équilibre, pourraient correspondre au carbone très stable (tel que celui du compartiment COM de Jenkinson et Rayner, 1977) non pris en compte dans notre modèle ; ce carbone très stable représenterait donc 58 et 56 % du carbone total respectivement pour les sols 1 et 2. Il faut cependant être prudent car un tel calcul nécessite que l'apport choisi et les conditions ambiantes soient proches de ceux subis antérieurement par les sols. Les chiffres cités peuvent tout de même avoir un certain sens dans la mesure où les conditions expérimentales d'incubation étaient assez peu éloignées des conditions naturelles. Ils seraient intéressants de les comparer d'une part à des mesures de carbone restant après des attaques chimiques violentes comme des hydrolyses acides prolongées des sols initiaux, d'autre part à des mesures de datation du carbone de ces sols. Les données d' ^{14}C , jointes aux mesures de taux de carbone, sont particulièrement intéressantes ; elles devraient nous permettre d'ajuster simultanément avec le modèle, les apports annuels moyens subis par les sols et

leurs taux de carbone très stable, selon un travail analogue à celui de Jenkinson *et al.*(1992) poursuivi par Jenkinson et Coleman (1994).

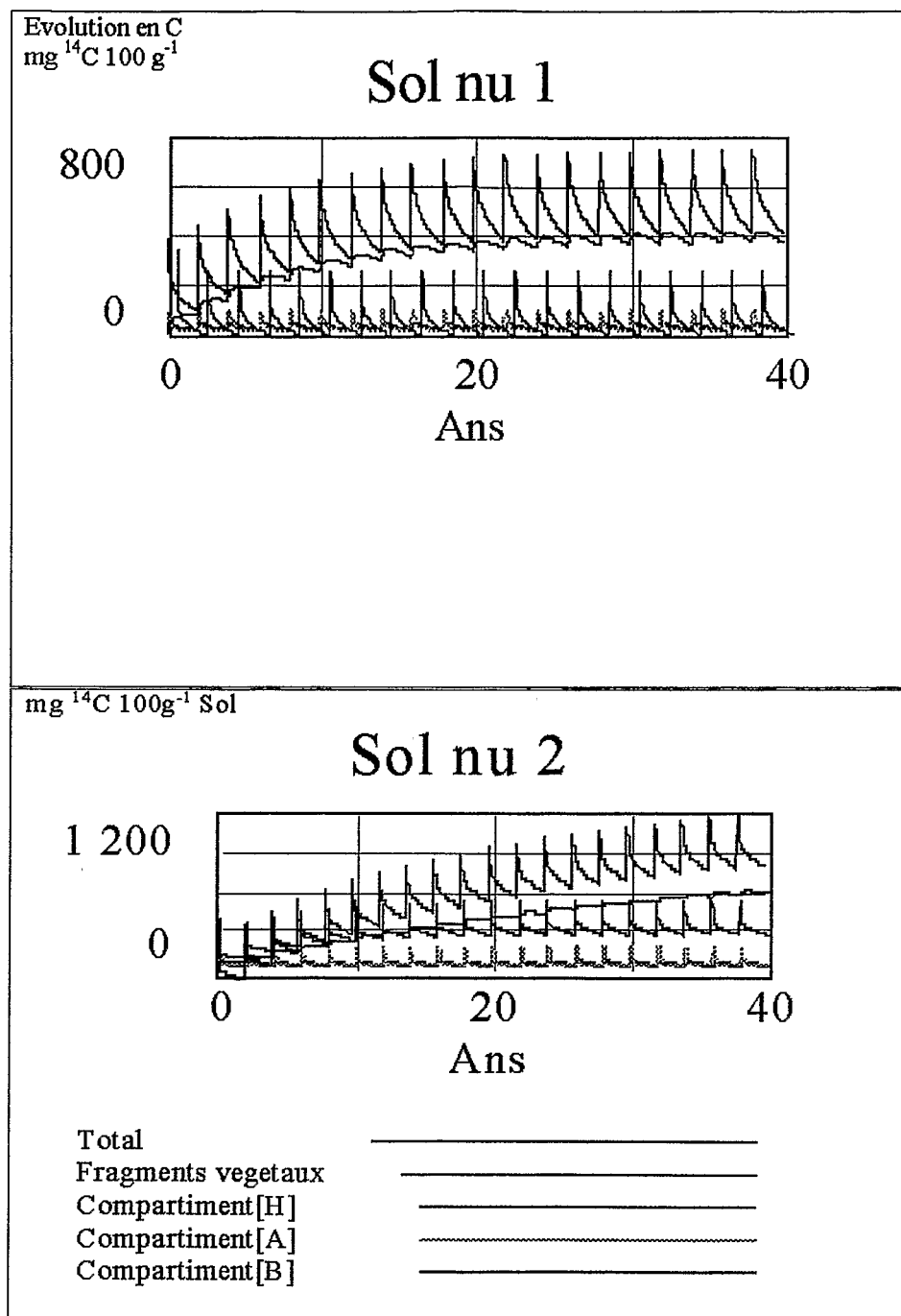


Fig. 5 : évolution organique des deux sols étudiés soumis au même régime d'apport que dans les expériences, pendant 40 ans. Le compartiment A n'est pas représenté, mais se situe au même niveau que B avec des fluctuations plus importantes.

Fig.5 : organic evolution of the two mediterranean soils under the same input of organic matter than in the experiments, during 40 years. A compartment is not shown but it is at the same level than B with more fluctuations.

Dans le sol 2, le modèle montre également une accumulation de carbone sous forme de débris végétaux bien plus importante que dans le sol 1 ; ce carbone représente un stock presque aussi important que celui des matières humifiées (plus important les dix premières années). Ceci concorde bien avec l'analyse du sol 2 qui indique une fraction grossière nettement plus forte que dans le sol 1 (Tableau I). Comme pour le carbone total, la quantité de carbone sous forme de fragments est très variable selon la saison ; les estimations du modèle sous notre régime d'apports après 40 ans représentent des quantités moyennes de fragments organiques d'environ 80 et 350 mg 100g⁻¹ respectivement pour les sols 1 et 2 ; une comparaison précise avec les échantillons initiaux (Tableau I) nécessiterait plus d'information sur la période de prélèvement de ces derniers et les apports organiques qu'ils ont subi. Pourtant le modèle fournit là aussi, comme pour le carbone total, une explication plausible des différences observées entre les deux sols sur les taux de carbone sous forme de fragments organiques. On notera que les pourcentages de carbone sous forme de fragments par rapport au carbone total sont sensiblement les mêmes dans la simulation et dans les échantillons de départ, environ 30 %.

Par contre, les deux sols accumulent dans la biomasse microbienne la même quantité de carbone marqué ; l'évolution de ce compartiment semble donc peu dépendre du type de sol mais plus de la matière à détruire par les micro-organismes.

Conclusion et perspectives

L'intérêt principal des modèles MOMO'S, réside dans une formulation mathématique plus simple que d'autres déjà proposés ; cet avantage, est particulièrement intéressant dans un domaine où la fluctuation des mesures est très grande. La formulation se situe en bonne continuité avec le plus ancien des modèles, celui proposé par Hénin et Dupuis en 1945, puis celui de Jenkinson et Rayner en 1977, celui de Jenkinson(1990) et nos propositions antérieures. A la façon des poupées Russes, elle est modulable avec le nombre de compartiments et donc la précision de la description. Sa linéarité ne protège pas d'une dérive dans les prédictions, mais elle met à l'abri d'une évolution chaotique (encore non décrite pour le carbone des sols). Elle est aussi conforme à la plupart des résultats expérimentaux concernant la décroissance du carbone organique dans les sols.

L'autre aspect très important de ce modèle réside dans sa capacité d'expliquer les variations simultanées de séries de données expérimentales, tant pour les mesures de carbone marqué que pour celles de carbone total. Ces données ont été obtenues en conditions contrôlées, mais nous avons indiqué la voie à suivre pour la transposition en conditions naturelles. Dans le même esprit, il conviendrait de mieux tester le modèle en effectuant sur divers types de sols, des expériences de décomposition de matériaux marqués du même type que celles décrites ici. Il serait bon aussi de regrouper plusieurs types de données en effectuant ces expériences sur des sols provenant de situations où l'on peut suivre *in situ* le renouvellement des matières organiques au moyen de l'outil $\delta^{13}\text{C}$. Des mesures de datation sur les échantillons initiaux permettraient également d'estimer avec le modèle, les apports moyens incorporés dans les sols au cours de leur histoire récente, ainsi que leur taux de carbone très stable.

L'approche modélisation que nous avons pratiquée peut donc être riche de renseignements, non seulement pour prévoir l'évolution prochaine des sols, mais aussi pour mieux comprendre leur genèse et les échanges avec la biosphère. L'intérêt n'est

d'ailleurs pas limité au carbone mais peut aussi s'étendre aux autres éléments associés aux matières organiques.

Bibliographie

- Arrouays, D. & Pelissier, P. 1994. Changes in carbon storage in temperate humid loamy soils after forest clearing and continuous corn cropping in France. *Plant and Soil*, **160**, 215-223.
- Balesdent, J., Mariotti, A. & Guillet, B. 1987. Natural ^{13}C abundance as a tracer for soil organic matter dynamics studies. *Soil Biology & Biochemistry*, **19**, 25-30.
- Bottner, P., Sallih, Z. & Billes, G. 1988. Root activity and carbon metabolism in soils. *Biology and Fertility of Soils*, **7**, 71-78.
- CPCS 1967. *Classification des sols*. Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie - France, Paris-Grignon, 87 p.
- Eckmann, J.P. & Ruelle, D. 1985. Ergodic theory of chaos and strange attractors. *Reviews of modern physics*, **57**, 617-656
- Hénin, S. & Dupuis, M. 1945. Essai de bilan de la matière humique du sol. *Annales Agronomiques - France*, **15**, 17-29.
- Hénin, S., Monnier, G. & Turc, L. 1959. Un aspect de la dynamique des matières organiques du sol. *Compte rendu de l'académie des sciences - France*. **248**, 138-141.
- Jenkinson, D.S. 1990. The turnover of organic carbon and nitrogen in soil. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, **329**, 361-368.
- Jenkinson, D.S. & Rayner, J.H. 1977. The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments. *Soil Science*, **123**, 298-303.
- Jenkinson, D.S. & Coleman, K. 1994. Calculating the annual input of organic matter to soil from measurements of total organic carbon and radiocarbon. *European Journal of Soil Science*, **45**, 167-174.
- Jenkinson, D.S., Harkness, D.D., Vance, E.D., Adams, D.E. & Harrison, A.F. 1992. Calculating net primary production and annual input of organic matter to soil from the amount and radiocarbon content of soil organic matter. *Soil Biology & Biochemistry*, **24**, 295-308.
- Pansu, M. & Sidi, H. 1987. Cinétique d'humification et de minéralisation de mélanges sols-résidus végétaux. *Science du sol*, **25**, 247-265.
- Parton, W.J., Schimel, D.S., Cole, C.V. & Ojima, D.S. 1987. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in great plains grasslands. *Soil Science Society of America Journal*, **51**, 1173-1179.

- Sallih, Z. & Bottner, P. 1988. Effect of Wheat roots on mineralisation rate of soil organic matter. *Biology and Fertility of Soils*, **7**, 67-70.
- Sallih, Z. & Pansu, M. 1993. Modelling of soil carbon forms after organic amendment under controlled conditions. *Soil Biology & Biochemistry*, **12**, 1755-1762.
- Sallih, Z. 1990. *Relation entre activité rhizosphérique et décomposition de la matière organique des sols au niveau de la biomasse microbienne et de la minéralisation du carbone et de l'azote*. Thèse Doctorat, université Montpellier II, 155 p.
- Sidi, H. & Pansu, M. 1990. Effets d'apports organiques et de gypse sur la stabilité structurale de deux sols méditerranéens. *Science du sol*, **28**, 237-256.
- Van Veen, J.A. & Paul, E.A., 1981. Organic carbon dynamic in grassland soils. I. Background information and computer simulation. *Canadian Journal of Soil Science*, **61**, 185-201.
- Veldkamp, E. & Weitz, A.M. 1994. Uncertainty analysis of $\delta^{13}\text{C}$ method in soil organic matter studies. *Soil Biology & Biochemistry*, **26**, 153-160.
- Wigner, E. 1960. The unreasonable effectiveness of mathematics in the natural sciences. *Communications on Pure and Applied Mathematics* **13**, 1-14.