

Modélisation des formes du carbone organique dans les sols

Marc Pansu, Zaher Sallih et Pierre Bottner

C.R. Acad. Sci. Paris,
t. 322, série II a,
p. 401 à 406,
1996

M. P. : ORSTOM, BP n° 5045,
34032 Montpellier Cedex, France ;

Z. S. et P. B. : CEFE-CNRS, BP n° 5051,
34033 Montpellier Cedex, France.

Résumé Un modèle mathématique est présenté, décrivant l'évolution de différentes formes du carbone dans les sols : matériel végétal (fractions labile et récalcitrante), biomasse microbienne, fractions humifiées (labile et stable). Il a été établi à partir de données expérimentales d'incubations de longue durée en conditions contrôlées (C et ¹⁴C de paille de blé marquée). Sa formulation est simple, modulable avec 2, 3 et 5 compartiments. Les prédictions sont en accord avec les données expérimentales. Il simule la concentration des matières organiques dans deux types de sols très contrastés.

Mots-clés : Carbone du sol, Matière organique, Modélisation, ¹⁴C, Biomasse microbienne.

Abstract Modelling of organic carbon forms in soils

A mathematical model (MOMOS) describing the evolution of different carbon pools in soils (plant debris, microbial biomass, labile and stable humified fractions) is presented. MOMOS was built from experimental long term incubation data (C and ¹⁴C of labelled mature wheat straw). The formulation of the model is simple and was tested with 2, 3 and 5 compartments. The predictions are in agreement with the data. It simulates the organic matter concentration in two contrasting soils.

Keywords: Soil carbon, Soil organic matter, Modelling, ¹⁴C, Microbial biomass.

Abridged English Version

DATA of laboratory long term decomposition experiments using (1) unlabelled and (2) ¹⁴C and ¹⁵N labelled mature wheat straw in Mediterranean soils with contrasting characteristics were used to build a model (MOMOS) describing the organic carbon compartments in soils. In the labelled experiment, two soils (a clayey and a sandy soil; table) were amended with ¹⁴C and ¹⁵N straw over 2 years, with 7 sampling occasions. This paper deals with the C dynamic. Total C and ¹⁴C were measured in the whole soil, in the microbial biomass (fumigation-incubation) and in the plant debris after physical fractionation.

Equation (1) (fig. 1) describes the C evolution of the compartments, after C amendment:

$$(1) \quad \frac{dC_m}{dt} = -k_m C_m + P_m \sum_i k_i C_i$$

C_i, C_m = carbon in compartments; k_i, k_m = kinetic constants, P_m = input proportion in compartment m . This equation was tested for models with 2, 3, and 5 compartments representing the labile (V_L) and resistant (V_R) plant material, labile (A) and stable (H) humus material and the microbial biomass (B). The equation (2) allows the generalisation of the model for successive C inputs (w) and for heterogeneous materials.

$$(2) \quad \frac{dC_m}{dt} = -k_m^* C_m + P_m \sum_i k_i^* C_i + f(t).f(m, r)w$$

$f(t)$ is a Boolean function of time $f(m, r)$ is a function describing the proportion of C input into the compartment and k^* is the corrected value of k accounting for the climatic conditions.

Figure 2 presents the experimental ¹⁴C data and the model predictions. Labile (A)

Note

présentée par
Georges Pédro.

remise le 28 juin 1995,
acceptée après révision
le 6 novembre 1995.



and stable (*H*) humified compartments are not measured. The sum (*A*) + (*H*) was estimated by: total ^{14}C - (biomass ^{14}C + plant ^{14}C). The compartment (*A*) was correlated with the measured water-soluble fraction. Observed values and predictions were in good agreement for total soil ^{14}C , plant debris - and microbial biomass - ^{14}C . The model was validated using total C data in the same compartments. For total C, compared to ^{14}C , the initial (*A*), (*B*) and (*H*) values and the kinetic constant of the *H* compartment ($k [H]$) was modified. The other parameters were unchanged.

The model was run over 100 years with an annual input similar to the one of the experiment. For the clayey soil, the organic content is stabilised after 25 years. The major part of the C amendment remaining in soil is stabilised in the (*H*) fraction. For the sandy soil the

stabilisation is reached after about one century. For both soils the remaining C represented 7 % of the total C of the successive amendments. The simulation predicted a C accumulation in the sandy soil representing 2.3 times that of the clayey soil. This ratio is similar to the ratio of the actual C concentrations in these soils. The model also predicts a plant debris accumulation which is about 5 times higher in the sandy soil compared to the clayey soil. This is in agreement with field data: the plant debris are 4.5 times higher in the sandy soil than in the clayey soil. The predicted and field observed proportion of plant debris C is similar and represents about 15% and 30% of the total soil C in clayey and sandy soil respectively.

MOMOS formulation is relatively simple and was validated with 2, 3 and 5 compartments.

INTRODUCTION

L'appréciation de la formation et du renouvellement des stocks organiques des sols constitue un objectif important, en particulier dans le contexte de modification dans l'utilisation des terres (déforestation, déprise agricole, amendements, fertilisation, culture mécanisée, etc.). La matière organique est 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 sur le taux de carbone atmosphérique. Le modèle MOMOS (MODélisation des Matières Organiques des Sols, *Modelling of Organic Matter Of Soils*) décrit le cycle du carbone organique dans le sol (Pansu et Sidi, 1987 ; Sallih et Pansu, 1993). Il a été construit à partir d'incorporation de matériel végétal (marqué et non marqué au ^{14}C). Cette Note présente le modèle, rappelle les données qui ont servi à son établissement; montre son originalité et donne une application à une étude prédictive.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Données expérimentales

Elles ont été obtenues à partir de deux expériences d'incubation en conditions contrôlées : l'une de paille de blé non marquée (Sidi, 1987), l'autre de paille de blé doublement marquée au ^{14}C et ^{15}N (Sallih, 1990) dans des sols méditerranéens. La dernière expérience utilisait un sol fersialitique calcique (feralsol rhodique) (sol 1) et un sol brun calcaire (calcisol haplique) (sol 2) sous formations herbacées (tableau). Le sol 1 est argileux et moins organique que le sol 2. Ce dernier comporte 45 % de sables grossiers et 2,2 fois plus de carbone que le sol 1. La fraction organique grossière du sol 2 est 4,5 fois supérieure à celle du sol 1. Les données retenues pour ce modèle concernaient l'évolution simultanée : du ^{14}C et C total, du ^{14}C et C de la biomasse microbienne (fumigation-incubation) et du ^{14}C et C des fragments végétaux (fractionnement physique).

Modèle mathématique

Formulation

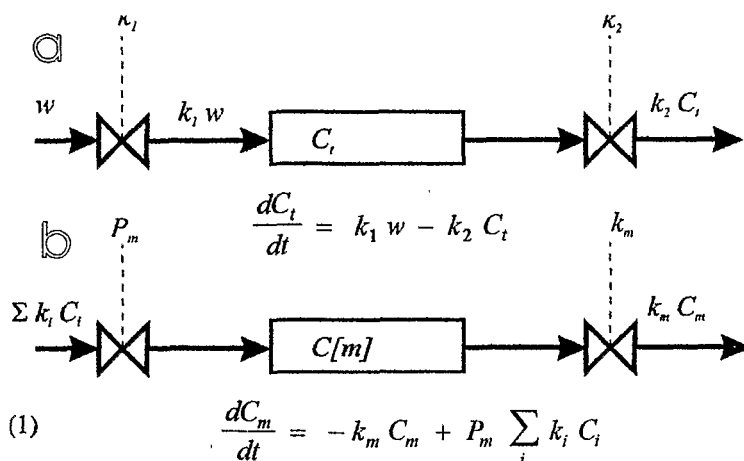
Ce modèle peut être comparé à celui de Hénin et Dupuis (1945), l'un des premiers proposés pour décrire l'évolution du carbone dans les sols (fig. 1). L'équation (1) est établie pour un apport de matériel végétal dont on étudie l'évolution. Elle a été testée pour un nombre de compartiments $i = 2, 3$ (Pansu et Sidi, 1987) et 5 (Sallih et Pansu, 1993), permettant une différenciation plus ou moins détaillée de la matière organique du sol.

Avec deux compartiments, la différenciation reste assez globale : matière organique labile et matière humifiée stable, généralement à rapport Carbone/Azote plus faible. Avec 3 compartiments, le modèle permet de distinguer les débris végétaux encore reconnaissables (séparables par des méthodes physiques), des autres matières labiles incorporées aux sols. Le modèle à 5 compartiments différencie en outre : (1) les débris végétaux en composés labiles (ex. cellulose) et composés stables (ex. lignine), (2) le matériel labile du sol en biomasse microbienne et composés labiles non vivants. Les 5 compartiments sont alors : résidus végétaux labiles (V_L) et stables (V_R), composés labiles non vivants (A), biomasse microbienne (B), matières humifiées stables (H).

Intérêt de la formulation

L'intérêt principal du modèle réside dans la description relativement simple, par l'équation (1) (fig. 1), de l'humification et de la minéralisation.

D'autre part, l'équation (1) constitue un système d'équations différentielles linéaires du premier ordre, à coefficients constants. Ceci est une garantie d'un comportement n'évoluant pas vers le chaos (Eckmann et Ruelle, 1985). La solution, dans le cas du modèle à deux compartiments ($i = 2$), se ramène à celle d'une seule équation différentielle linéaire du deuxième ordre, à coefficients constants ; c'est une somme de deux exponentielles (le polynôme caractéristique



comportant deux racines réelles distinctes). Ceci concorde avec les observations expérimentales, maintes fois notées, sur la décroissance du carbone à la suite d'apport de matériel végétal dans les sols.

Généralisation

Lorsque l'on considère le cas d'apports organiques hétérogènes dans leur composition et répétés dans le temps, l'équation (1) devient :

$$(2) \quad \frac{dC_m}{dt} = -k_m^* C_m + P_m \sum_i k_i^* C_i + f(t) f(m, r) w$$

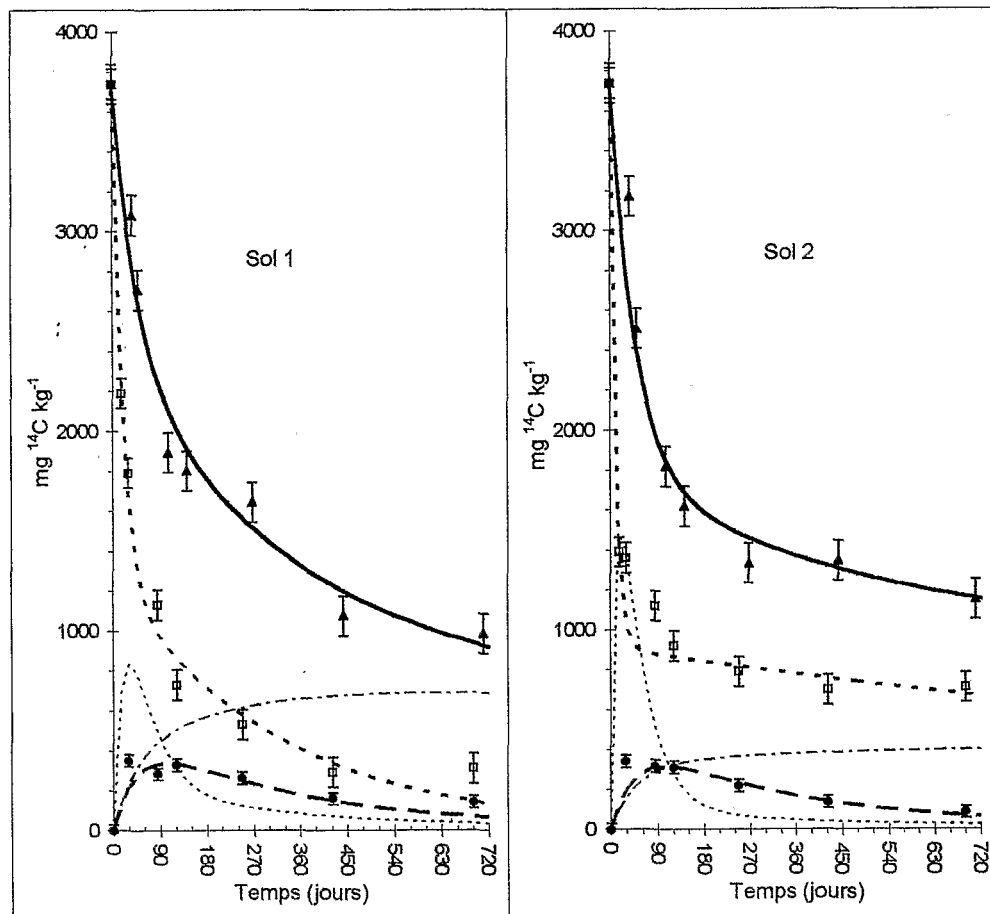
w étant l'apport organique constant ou variable, exprimé en unité de carbone par unité de sol total (comme C_m et C_i), $f(t)$ et $f(m, r)$ respectivement une fonction booléenne du temps (égale à 1 au moment de l'apport, sinon à 0) et une fonction de répartition de l'apport dans les compartiments. Pour la plupart des apports d'origine végétale, on aura $f(m, r) = r$ pour $m = V_L$, $f(m, r) = 1 - r$ pour $m = V_R$ (r désignant la fraction labile de l'amendement) et $f(m, r) = 0$ pour $m \in \{A, B, H\}$. Pour d'autres entrées, par exemple du type exsudation racinaire, on pourra avoir $f(m, r) = 0$ pour $m \in \{V_L, V_R, B\}$, $f(m, r) = r$ pour $m = A$ et $f(m, r) = 1 - r$ pour $m = H$. En conditions naturelles, les

Fig. 1 Continuité des modèles ; a = modèle à un seul compartiment (Hénin et Dupuis, 1945), b = modèle proposé, à plusieurs compartiments (w = apport, k_1 = coefficient isohumique, k_2 = coefficient de minéralisation, C_t = carbone total, C_i , C_m = carbone des compartiments, k_i , k_m = constantes de vitesse, P_m = proportion d'entrée dans le compartiment m).

Continuity of the models ; a = one compartment model (Hénin and Dupuis, 1945), b = suggested model with several compartments (w = input, k_1 = humification coefficient, k_2 = mineralization coefficient, C_t = total-C, C_i , C_m = C in compartments, k_i , k_m = kinetic constants, P_m = input proportion to compartment m).

Fig. 2 Ajustement du modèle aux données ^{14}C pour les deux types de sols : Δ = total, \square fragments, \bullet biomasse microbienne.

Model fitting to ^{14}C data for both soils: Δ = total, \square debris, \bullet microbial biomass.



constantes de vitesse k_i doivent être multipliées par des facteurs de correction de température et d'humidité des sols (Van Veen et Paul, 1981 ; Parton *et al.*, 1987) et un facteur traduisant l'influence des plantes sur l'humification (Jenkinson *et al.*, 1992). La formulation simple du modèle rend sa programmation accessible aux non spécialistes.

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Ajustements aux données

La figure 2 présente 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

(^{14}C -total - (^{14}C -biomasse + ^{14}C -fragments)). Le compartiment *A* est corrélé avec la fraction hydrosoluble mesurée ; les deux présentent un maximum au cours du premier mois d'incubation, au lieu du troisième pour la biomasse microbienne. La simulation du compartiment *A* conduit cependant à des valeurs nettement plus fortes que les valeurs mesurées, suggérant que tous les composés qu'il contient ne sont pas hydrosolubles. La mesure expérimentale du contenu des compartiments *A* et *H* pose un problème difficile, en raison de la complexité du groupe des substances humifiées labiles (mono et polysaccharides, amino-sucre, amino-acides,...) et stables (acides humiques, acides fulviques, humines). MOMOS fournit un ajustement de toutes les données aussi satisfaisant que ceux obtenus de manière empi-

Tableau Principales caractéristiques des deux sols utilisés (C-frag = carbone sous forme de fragments séparés par fractionnement physique).
Main characteristics of both soils (C-Frag = carbon of plant debris separated from the soil by physical fractionation).

Sols	Granulométrie (g kg ⁻¹)					Org.C (g kg ⁻¹)	C-frag (g kg ⁻¹)	N (g kg ⁻¹)	CaCO ₃ (g kg ⁻¹)	pH (H ₂ O)
	2-0,2 mm	200-50 µm	50-20 µm	20-2 µm	< 2 µm					
1	70	180	240	210	290	12	2	1,2	22	7,9
2	450	120	110	180	110	27	9	2	<1	6,5

rique par Bottner *et al.* (1988) et Sallih et Bottner (1988).

Des différences importantes entre les deux types de sols sont bien mises en évidence par le modèle. La minéralisation globale est plus intense dans le sol 1 que dans le sol 2, mais cet ordre est inversé en début d'incubation, avec une minéralisation plus rapide dans le sol 2. L'humification est également plus importante dans le sol 1, où la décomposition des débris est la plus avancée en fin d'incubation. Le sol 2, qui paraît le mieux stabilisé au seul vu de la courbe ¹⁴C total, comporte plus de fragments végétaux résiduels. Des hypothèses ont été émises par Sallih et Pansu (1993) pour expliquer ces phénomènes.

MOMOS a permis d'ajuster les données du C-total en changeant les valeurs initiales des compartiments A, B, H (égales à 0 dans le cas du carbone marqué) et en conservant la plupart des paramètres trouvés pour ¹⁴C (Sallih et Pansu, 1993). Cette deuxième série d'ajustements constitue une pseudo-validation du modèle ; celui-ci apparaît donc satisfaisant pour décrire le cycle du carbone, apporté ou natif du sol.

Évolution des sols

Sous le régime d'apport de matériel végétal utilisé dans cette expérience, 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 annuel de carbone correspond à environ 2,5 Mg ha⁻¹. L'accumulation du carbone du sol sera d'envi-

ron 7 Mg ha⁻¹ après 40 ans d'apports, soit 100 Mg apportés au total.

Avec un même amendement organique dans le sol 2, il faut une centaine d'années pour arriver à une stabilisation à 16 Mg ha⁻¹, pour 250 Mg d'apport total. Pour les deux sols, le rapport du carbone restant au carbone total apporté dans tout le cycle se situe donc vers 7%. La simulation fournit à l'équilibre une quantité 2,3 fois plus importante de carbone dans le sol 2 que dans le sol 1, soit le même rapport que celui des concentrations en C natif du sol (tableau). Des datations devraient permettre d'ajuster avec le modèle, (1) les apports annuels moyens subis par les sols et (2) leur taux de carbone très stable (Jenkinson *et al.*, 1992 ; Jenkinson et Coleman, 1994).

Dans le sol 2, MOMOS montre également une accumulation de carbone sous forme de débris végétaux, environ 5 fois plus importante que dans le sol 1 ; ce carbone représente un stock presque aussi important que celui des matières humifiées (H). Ceci concorde bien avec les données initiales du sol 2, qui indiquent une fraction grossière 4,5 fois plus forte que dans le sol 1 (tableau). 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 15 % pour le sol 1 et 30 % pour le sol 2.

CONCLUSION

MOMOS a permis de décrire les variations simultanées de séries de données expérimentales, tant pour les mesures de carbone marqué que pour celles de carbone total. Ces

données ayant été obtenues en conditions contrôlées, nous avons indiqué la voie à suivre pour la transposition en conditions naturelles. Il conviendrait de tester le modèle sur divers types de sols, avec des matériaux marqués. Il serait bon aussi de confronter ces données d'incubation avec d'autres mesures, en particulier celles fournies par les outils isotopiques $\delta^{13}\text{C}$ (Balesdent *et al.*, 1987) et $d^{14}\text{C}$ en abondance naturelle.

La formulation de MOMOS apparaît relativement simple parmi d'autres déjà proposées. Elle se situe en bonne continuité avec des modèles plus anciens (Hénin et Dupuis, 1945 ; Jenkinson et Rayner, 1977 ; Pansu et Sidi, 1987 ; Jenkinson, 1990). Elle est modulable avec la précision de la description (nombre de compartiments). Sa linéarité ne protège pas d'une dérive dans les prédictions, mais elle met à l'abri d'une évolution chaotique. Elle est aussi conforme à la plupart des résultats expérimentaux concernant l'évolution des apports organiques dans les sols.

Remerciement : Nous remercions M. Jawdat Touma (ORSTOM

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BALESDENT, J., MARIOTTI, A. et GUILLET, B., 1987. Natural ^{13}C abundance as a tracer for soil organic matter dynamics studies, *Soil Biology & Biochemistry*, 19, p. 25-30.
- BOTTNER, P., SALLIH, Z. et BILLES G., 1988. Root activity and carbon metabolism in soils, *Biology and Fertility of Soils*, 7, p. 71-78.
- ECKMANN, J. P. et RUELLE, D., 1985. Ergodic theory of chaos and strange attractors, *Reviews of modern physics*, 57, p. 617-656.
- HÉNIN, S. et DUPUIS, M., 1945. Essai de bilan de la matière humique du sol, *Annales Agronomiques, France*, 15, p. 17-29.
- JENKINSON, D. S., 1990. The turnover of organic carbon and nitrogen in soil, *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 329, p. 361-368.
- JENKINSON, D. S. et RAYNER, J. H., 1977. The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments, *Soil Science*, 123, p. 298-303.
- JENKINSON, D. S. et 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, p. 167-174.
- JENKINSON, D. S., HARKNESS, D. D., VANCE, E. D., ADAMS, D. E. et 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, p. 295-308.
- PANSU, M. ET SIDI, H., 1987. Cinétique d'humification et de minéralisation de mélanges sols-résidus végétaux, *Science du Sol*, 25, p. 247-265.
- PARTON, W. J., SCHIMMEL, D. S., COLE, C. V. et OJIMA, D. S., 1987. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in great plains grasslands, *Soil Sc. Soc. Amer. Journ.*, 51, p. 1173-1179.
- SALLIH, Z. et BOTTNER, P., 1988. Effect of Wheat roots on mineralisation rate of soil organic matter, *Biology and Fertility of Soils*, 7, p. 67-70.
- SALLIH, Z. et PANSU, M., 1993. Modelling of soil carbon forms after organic amendment under controlled conditions, *Soil Biology & Biochemistry*, 12, p. 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, Université Montpellier-II*, 155 p.
- SIDI, H., 1987. Effet de l'apport de matière organique et de gypse sur la stabilité structurale de sols de région méditerranéenne (Mateur-Tunisie), *Thèse Docteur-Ingénieur, INA-PG*, 206 p.
- VAN VEEN, J. A. et PAUL, E. A., 1981. Organic carbon dynamic in grassland soils. I. Background information and computer simulation, *Canadian Journ. Soil Sci.*, 61, p. 185-201.