

# Détermination de quelques paramètres caractéristiques de la cinétique d'humification et de minéralisation des amendements organiques dans les sols (1)

Marc PANSU

Orstom, BP 5045, 34032 Montpellier cedex 1

## RÉSUMÉ

*Un modèle à deux compartiments permet de faciliter l'interprétation d'expériences d'incubation d'amendements organiques dans les sols par la détermination de paramètres liés d'une part au type de sol, d'autre part à l'amendement ou au mélange sol-amendement. La sensibilité du modèle aux divers paramètres est étudiée et des recommandations sont fournies pour la mise en place d'expériences. Des simulations permettent de juger de la validité des déterminations en fonction de possibles résultats expérimentaux ; elles devraient permettre la comparaison de paramètres provenant d'incubations de matériaux divers même effectuées sans répétition.*

**MOTS CLÉS :** Cinétique d'humification - Cinétique de minéralisation - Carbone du sol - Amendement organique - Modélisation - Matière organique du sol.

## ABSTRACT

### DETERMINATIONS OF SOME PARAMETERS INVOLVED IN THE HUMIFICATION AND MINERALIZATION KINETICS OF ORGANIC SOIL CONDITIONERS

*A two compartment model allows to promote the interpretation resulting from incubations of organic soil conditioners (OSC) in soils. It implies the determination of parameters related on one hand to the type of soil, and on the other hand to the OSC or the soil-OSC mixture. The model sensitiveness to the different parameters is tested and advices are given for experiments setting. The goodness-of-fit of the determinations is checked through several simulations with respect to possible experimental results ; this should allow comparison of parameters following incubation of different materials even conducted without repetition.*

**KEY WORDS :** Humification kinetics - Mineralization kinetics - Soil carbon - Organic soil conditioner - Modelling-Soil organic matter.

## INTRODUCTION

Durant les quinze dernières années, plusieurs modèles ont été proposés pour décrire l'évolution des matières organiques dans les sols. Ces modèles séparent en général la matière organique en compartiments ou groupes de substances rangées selon leur vitesse de dégradation (PANSU, 1989).

Ils ont parfois permis de simuler le fonctionnement sur de longues durées de parcelles expérimentales où l'on dispose de données depuis plusieurs dizaines d'années (JENKINSON et RAYNER, 1977 ; HOUOT *et al.*, 1989).

(1) Cet article est présenté différemment pour faciliter la lecture des formules.

PARTON *et al.* (1987) définissent leur modèle comme basé sur une structure et des concepts analogues à celui de PAUL et VAN VEEN (1978). Ce modèle est constitué de compartiments qui ressemblent à ceux de JENKINSON et RAYNER (1977) dans leur définition mais avec un diagramme de flux plus complexe nécessitant plus de paramètres.

Le modèle de MOLINA *et al.* (1983) semble plus simple que les précédents dans la représentation à deux compartiments qui en est fournie par HOUOT *et al.* (1989) ; cependant, comme chacun des compartiments comprend une fraction labile et une fraction stable (sans compter les fractions végétales et l'humus très stable), la structure de ce modèle s'avère largement aussi complexe que les précédents.

Les modèles présentés par PARNAS (1975) et BRUNNER et FOCHT (1984) procèdent d'une logique un peu différente des modèles à compartiments ci-dessus, mais ils ne sont guère plus simples, puisque le premier auteur détermine sept paramètres et les suivants quatre ou cinq paramètres selon l'une ou l'autre des équations qu'ils proposent.

Ces divers modèles sont trop complexes pour constituer des outils immédiatement utilisables par l'agronome pour caractériser le comportement dans les sols d'amendements organiques de plus en plus divers (résidus de récoltes, compostage de déchets industriels et urbains, etc.) et de plus en plus nécessaires du fait des modifications des pratiques culturales (travail mécanique intense, disparition du fumier de ferme, etc.).

Aussi, les expérimentateurs chargés de telles caractérisations se contentent-ils la plupart du temps de déterminer un coefficient isohumique défini par HENIN et DUPUIS, dès 1945, comme la fraction de matière organique fraîche transformée en humus à la fin d'une période d'incubation. Divers auteurs ont tenté d'améliorer ce modèle de HENIN et DUPUIS, à cinétique du premier ordre, vers des cinétiques d'ordre deux (BOIFFIN et FLEURY, 1974), d'ordre  $n$  (BALESDENT, 1982) ou selon un processus autocatalytique du premier ordre (IONENKO *et al.*, 1986).

Notre propos se situe dans le prolongement de ces tentatives ; il vise à préciser l'outil de caractérisation des amendements organiques en restant à un niveau de complexité le plus bas possible. Dans une récente publication (PANSU et SIDI, 1987), nous avons cherché à utiliser le modèle de HENIN, MONNIER et TURC (1959) juste un peu plus complexe que celui de HENIN et DUPUIS (1945) puisqu'il comporte seulement deux compartiments. Bien que ce modèle se soit avéré assez satisfaisant pour ajuster les données collectées par SIDI (1987), nous avons été amenés à en donner une autre formulation en conformité, pour partie, avec d'autres propositions (MOREL, 1981).

Intégrant ensuite la cinétique de dégradation des débris végétaux incomplètement transformés dans les sols, nous avons également proposé un modèle à trois compartiments puis nous avons situé nos deux propositions (PANSU, 1988) par rapport à celles de HENIN *et al.* (1959) et JENKINSON et RAYNER (1977) comme le montre la figure 1.

Nous testons ici une simplification de notre précédent modèle à deux compartiments ; notre but consiste à définir une méthodologie permettant d'améliorer la caractérisation de l'évolution des amendements organiques, en relation avec le type de sol.

## MATÉRIELS ET MÉTHODES

### Description du modèle

Si le processus de minéralisation des matières humifiées des sols s'avère très lent avec des demi-vies de plusieurs années, voire de plusieurs dizaines d'années, il en va tout autrement des matières labiles provenant des amendements organiques et de la biomasse microbienne où les demi-vies ne dépassent pas quelques semaines.

Ainsi, lors d'enfouissements de résidus végétaux dans les sols, les courbes de décroissance du carbone en fonction du temps montrent que, dans des conditions optimales d'incubation (température, humidité, taux d'azote, pH, aération), plus de 80 % des pertes en carbone par minéralisation se produisent dans les trois à quatre premiers mois d'incubation, plus de 95 % au cours des six premiers mois.

Estimer ensuite la durée de vie des quelques pour cent restants nécessite des expériences de longue durée. Cette estimation a été tentée par plusieurs auteurs que nous citons précédemment (PANSU et SIDI,

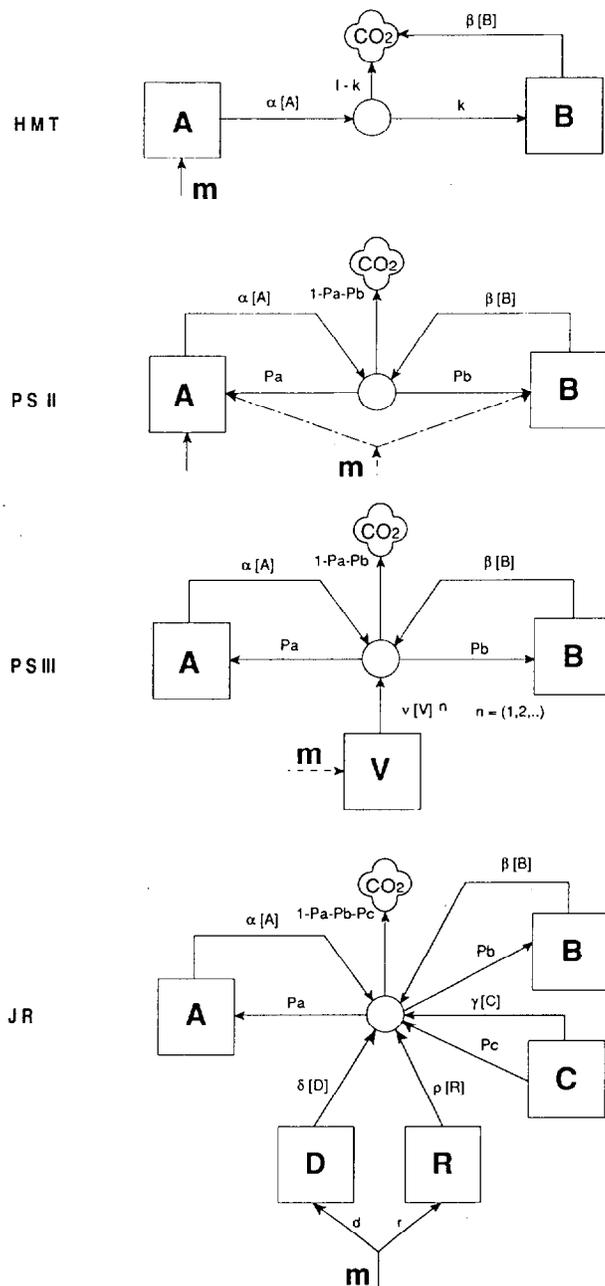


FIG. 1. - Diagrammes des flux comparatifs de modèles à compartiments : HMT (HENIN, MONNIER et TURC, 1959), PSII et PSIII (PANSU et SIDI, 1987), JR (JENKINSON et RAYNER, 1977).

Comparative flow diagrams of compartment models : HMT (HENIN, MONNIER et TURC, 1959), PSII et PSIII (PANSU et SIDI, 1987), JR (JENKINSON et RAYNER, 1977).

- $m$  = apport organique ; organic soil conditioner ;
- A = matière organique labile (HMT, PSII) - labile organic matter (HMT, PSII) ;
- métabolites labiles + biomasse microbienne (PSIII) - labile metabolites + microbial biomass (PSIII) ;
- B = matière organique stable (HMT, PS) - stable organic matter (HMT, PS) ;
- physically stabilized organic matter (JR) ;
- V = amendement non décomposé (PSIII) - plant material (PSIII) ;
- D = décomposable plant material (JR) - decomposable plant material (JR) ;
- R = résistant plant material (JR) - resistant plant material (JR) ;
- C = chimiquement stabilisée matière organique (JR) - chemically stabilized organic matter (JR) ;
- $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $v$ ,  $\gamma$ ,  $\rho$ ,  $\delta$  = coefficients de décroissance respectifs des compartiments A, B, V, C, D, R - kinetic coefficients of decays in the compartments A, B, V, C, D, R ;
- $k$  = coefficient isohumique (HMT) - isohumic coefficient (HMT) ;
- $Pa$ ,  $Pb$ ,  $Pc$  = proportion de renouvellement dans les compartiments A, B, C - turn-over rates in A, B, C compartments ;
- $d$ ,  $r$  = proportion d'entrée dans les compartiments D et R (JR) - input proportions in D and R compartments (JR) ;
- $n$  ordre de la décroissance du compartiment V (PSIII) - kinetics order for decay in V compartment (PS III).

1987) et plus récemment par SALLIH et BOTTNER (1988) avec des incubations de végétaux marqués. Elle est importante pour les études du fonctionnement à long terme des agro-écosystèmes, mais les expériences à réaliser peuvent nécessiter plusieurs années pour déterminer avec une précision acceptable la faible vitesse de minéralisation du compartiment stable B (fig. 1).

À notre avis, les études agronomiques de tests d'amendements organiques peuvent être effectuées dans des essais d'incubation d'une durée inférieure ou égale à six mois en laboratoire (mais un peu plus longues sur le terrain en climat tempéré).

Le modèle que nous proposons (fig. 2) est adapté à l'interprétation de telles expériences. Par rapport à notre proposition antérieure (PSII fig. 1), il comporte trois hypothèses supplémentaires :

- la minéralisation du compartiment B est négligeable devant celle du compartiment A. En conséquence, le coefficient  $\beta$  est considéré comme nul ;
- les pertes en matières organiques d'un horizon humifère supérieur par lixiviation sont équivalentes aux pertes par minéralisation pour le fonctionnement du modèle ;
- la troisième hypothèse concerne ce que nous appellerons plus loin le coefficient d'incorporation du carbone ( $P_a + P_b$ ) : lors de l'apport d'un amendement organique, on peut parfois constater une diminution presque immédiate de carbone après humectation, soit par minéralisation très rapide, soit par lixiviation ; par suite, la première mesure de carbone peut présenter un déficit par rapport au bilan « carbone initial plus carbone apporté ». Le modèle testé suppose que la proportion d'incorporation du carbone est constante lors de l'apport et sur toute la durée de l'expérience. Dans le cas où cette hypothèse ne serait pas vérifiée, nous proposons une modification des équations pour faire intervenir des proportions  $P'_a$  et  $P'_b$  d'incorporation des apports en début d'expérience comme représenté sur la figure 1 (PSII).

La décroissance du compartiment labile A et la croissance simultanée du compartiment humifié B sont traduites par le couple d'équations différentielles :

$$d[A]/dt = -\alpha[A](1-P_a)$$

$$d[B]/dt = \alpha[A]P_b$$

Par intégration, en tenant compte des hypothèses, on obtient :

$$[A] = [A_0 + P_a m]e^{-\alpha(1-P_a)t}$$

$$[B] = B_0 + A_0 P_b/(1-P_a) + m P_b/(1-P_a) - [P_b A_0/(1-P_a) + P_a P_b m/(1-P_a)]e^{-\alpha(1-P_a)t}$$

et l'équation du carbone total  $C_T$  :

$$C_T(m,t) = B_0 + A_0 P_b/(1-P_a) + m P_b/(1-P_a) + [A_0(1-P_b/(1-P_a)) + m P_a(1-P_b/(1-P_a))]e^{-\alpha(1-P_a)t} \quad (1)$$

Avec  $A_0$  et  $B_0$  respectivement les teneurs initiales du sol en matières organiques labiles et stables.

Cette équation est de la forme :

$$C_T = Y_0(m) + Y_1(m) Y_2(t) \quad (2)$$

où  $Y_0(m)$  et  $Y_1(m)$  sont deux fonctions linéaires de l'apport « m » et  $Y_2(t)$  la fonction exponentielle décroissante du temps d'incubation. Pour un temps d'incubation donné, la linéarité de la variation du carbone en fonction de l'apport organique correspond bien à certaines observations, en particulier celle de PANSU et SIDI (1987) et surtout celle de PAL et BROADBENT (1975) (tests de linéarité avec sept apports de paille de riz étagés régulièrement jusqu'à 8 % du poids de sol).

Dans le cas où la troisième hypothèse ne serait pas vérifiée, si  $P'_a$  et  $P'_b$  représentent les proportions d'amendement incorporées à l'instant 0 respectivement dans le compartiment labile et le compartiment stable, l'équation 1 deviendrait :

$$C_T(m,t) = B_0 + A_0 P_b/(1-P_a) + m(P'_b + P'_a P_b/(1-P_a)) + [A_0(1-P_b/(1-P_a)) + m P'_a(1-P_b/(1-P_a))]e^{-\alpha(1-P_a)t} \quad (1')$$

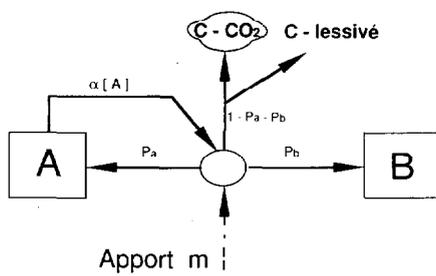


FIG. 2. - Modèle proposé à deux compartiments.  
The two compartment model proposed.

### Paramètres de caractérisation des amendements humiques

Pour un apport donné, l'équation 1 représente la somme d'une exponentielle décroissante et d'une constante qui est l'asymptote de la courbe. Une expérimentation doit permettre de déterminer simultanément cinq paramètres que nous dénommerons comme suit :

- $A_0$  = contenu initial du sol en carbone labile A. On remarque que la préparation du sol (comme sans doute le travail du sol au champ) par séchage, broyage et tamisage provoque toujours l'apparition d'une certaine quantité de carbone labile (*grinding effect*), d'une part en tuant une partie de la biomasse microbienne qui se décompose ensuite, d'autre part en libérant certains composés organiques protégés même sur des sols qui paraissaient auparavant stabilisés (POWLSON, 1980) ;
- $B_0$  = contenu initial du sol en carbone stable B ;
- $\alpha$  = vitesse de transformation du carbone = proportion de transformation par unité de temps ;
- $P_a$  = coefficient de renouvellement du carbone = proportion de matières organiques autotransformées en matières à nouveau labiles ;
- $P_b$  = coefficient de stabilisation du carbone = proportion de l'apport organique transformé en matières humifiées stables.

Il s'avère également possible d'exprimer l'équation (1) à l'aide d'autres paramètres. À l'équilibre, lorsque le temps d'incubation tend vers l'infini, la teneur en carbone devient constante pour un apport donné et s'exprime par :

$$C_T = B_0 + (A_0 + m) P_b / (1 - P_a) \quad (3)$$

HENIN et DUPUIS (1945) définissaient le coefficient isohumique « K » comme la fraction de matière organique fraîche transformée en humus en fin d'incubation. Le coefficient  $P_b / (1 - P_a)$  est ici très proche de cette définition puisqu'il représente la fraction de la somme « matière labile initiale + matière organique apportée ».

Rappelant également que nous avons parlé plus haut d'un coefficient d'incorporation, nous pouvons définir les paramètres suivants :

- $K' = P_b / (1 - P_a)$  = pseudo-coefficient isohumique ;
- $I = P_a + P_b$  = coefficient d'incorporation de la matière organique ;  
ou alternativement à I :
- $M = 1 - I$  = coefficient de minéralisation et lixiviation de la matière organique.

L'équation (1) peut alors s'exprimer par :

$$C_T = B_0 + K'(A_0 + m) + [A_0(1 - K') + m(I - K')]e^{-\alpha t(1 - I)/(1 - K')} \quad (4)$$

ou bien, par analogie avec le modèle prédictif de l'azote potentiellement minéralisable de DEANS *et al.* (1986), si nous appelons  $C_0$  la concentration de carbone organique initiale du sol et  $S = A_0 / C_0$  la fraction de carbone labile :

$$C_T = C_0(1 - S(1 - K')) + K'm + [C_0S(1 - K') + m(I - K')]e^{-\alpha t(1 - I)/(1 - K')} \quad (5)$$

À titre de comparaison, l'équation descriptive du carbone dans le modèle de HENIN *et al.* (1959) s'écrirait en négligeant, comme ici, le terme  $\beta$  de minéralisation du compartiment stable et en appelant K, le coefficient isohumique :

$$C_T = C_0(1 - S(1 - K)) + Km + [C_0S(1 - K) + m(1 - K)]e^{-\alpha t} \quad (6)$$

Il est tentant également de comparer ces équations avec un modèle utilisé pour décrire l'évolution du  $CO_2$  pendant de courtes périodes suivant des perturbations importantes du fonctionnement du sol (CHAUSSOD *et al.*, 1986 ; BLET-CHARAUDEAU *et al.*, 1990) ; ce type de modèle fait également intervenir un compartiment labile et un compartiment stable en considérant que ce dernier se minéralise avec une cinétique d'ordre 0. Dans notre cas, avec  $\beta$  la quantité de matière qui quitte le compartiment stable B pendant l'intervalle de temps dt, l'équation 5 deviendrait :

$$C_T = \beta(1 - K')(I - K') / \alpha(1 - I) + C_0(1 - S(1 - K')) + mK' - (1 - K')\beta t + [C_0S(1 - K') + m(I - K') - \beta(1 - K')(I - K') / \alpha(1 - I)]e^{-\alpha t(1 - I)/(1 - K')} \quad (7)$$

De même que l'équation 1 devient équivalente à l'équation 5, l'équation 1' peut s'écrire, dans le cas où il n'y a pas de perte de carbone au temps 0 ( $P_a' + P_b' = 1$ ) et en appelant  $S'$  la fraction labile de l'amendement :

$$C_T = C_0(1-S(1-K')) + m(1-S'(1-K')) + [C_0S(1-K') + mS'(1-K')]e^{-\alpha t(1-I)/(1-K')} \quad (5')$$

### Expérience d'ajustement du modèle

Nous avons ajusté le modèle dans le seul cas des équations 1 et 5. Les données de carbone provenaient d'une expérience d'incubation destinée à tester l'effet d'un enfouissement organique sur la capacité d'échange cationique (DE BOISSEZON, 1988). Nous rappelons ci-dessous le protocole déjà décrit de cette expérience sur modèle de laboratoire.

Les échantillons de sols provenaient des horizons A1 et B2 d'un sol brun forestier sur limon des plateaux du bassin parisien prélevé à Grignon. Les expériences étaient conduites dans des tubes de verre surmontant un erlenmeyer pour recueillir le drainage, d'une part en utilisant le seul horizon A1 (0-10 cm) enrichi avec différentes doses de paille de luzerne, d'autre part en reconstituant la superposition des horizons A1 (également enrichi en paille) et B2.

Quatre doses (0- 2,5 - 5 - 7,5 %) de paille de luzerne calibrée (0,2 - 2 mm) étaient enfouies dans l'horizon A1 et les colonnes étaient sacrifiées pour analyses aux temps 0, 1, 15, 30, 90 et 180 jours d'incubation, chaque échantillonnage comportant deux répétitions. La température était maintenue constante à 28 °C, à l'obscurité, en atmosphère humide, dans une étuve. Le régime hydrique alterné était réalisé par une humectation initiale *per ascensum* pour chasser les bulles d'air des colonnes, suivie d'un ressuyage par gravité. Les humectations hebdomadaires étaient obtenues en versant de l'eau distillée en haut de colonne pour assurer l'humidité à la capacité de fin de ressuyage plus 10 mL. Les pertes organiques par lixiviation, dosées dans les percolats recueillis, se situaient dans une fourchette allant de 4 % (témoin) à 14 % (amendement le plus fort) des pertes totales en carbone. Les résultats utilisés ici ne concernent que l'évolution du carbone organique total (dosé au four par coulométrie) dans l'horizon A1 du modèle à deux horizons.

### Techniques d'ajustements et tests de sensibilité du modèle

Les ajustements non linéaires ont été réalisés selon l'algorithme de Marquardt au moyen du logiciel Statgraphics (société Uniware). À partir des premiers paramètres trouvés, le présent travail consistait à tester la sensibilité du modèle selon différents critères afin de préciser la valeur de cet outil de caractérisation et de favoriser une bonne définition des futures expériences d'incubation :

- linéarité avec l'apport organique : les données expérimentales ont permis de nouveaux tests de linéarité en fonction de l'apport  $m$  ;

- sensibilité aux paramètres : réponse du modèle à des variations des paramètres  $K'$ ,  $I$  et  $\alpha$  encadrant les valeurs trouvées (fig. 4) ;

- sensibilité de l'ajustement au plan d'expérience : cette étude vise à préciser l'échantillonnage en fonction du temps d'incubation. Nous étudions l'évolution avec le temps des fonctions de sensibilité définies par les dérivées partielles du modèle (équations 1 et 5) par rapport à chaque paramètre. L'échantillonnage doit être réalisé au voisinage des *extrema* des fonctions de sensibilité, dans la zone où le paramètre influe le plus sur le modèle global. Cette technique a déjà été employée par CHAUSSOD *et al.* (1986) à propos de leur modèle de respirométrie ;

- sensibilité de l'ajustement à la variabilité expérimentale : sur la figure 4, nous avons sélectionné trois paires de courbes par graphique, numérotées de 1 à 9, qui représentent un ensemble très varié d'éventuels résultats expérimentaux. Chaque paire comprend la courbe avec un apport  $m_1 = 30 \text{ ‰}$  de carbone et la courbe témoin correspondante sans apport avec les mêmes paramètres.

Sur chacune des courbes, nous avons sélectionné des points fictifs de mesure du carbone en fonction du temps puis simulé des erreurs expérimentales par rapport à ces points « exacts » avant de recalculer les paramètres (équations 1 ou 5) correspondant à ces pseudo points expérimentaux. Nous avons au préalable testé l'ajustement sur les courbes sans erreur : dans ce cas, les paramètres ont été estimés sans biais ni aléa pour huit des courbes ; seule l'estimation de la courbe 3 a été biaisée de 0,4 % par excès

pour  $C_0$ , de 10 % par excès pour  $K'$  et de 2,6 % par défaut pour  $\alpha$ . Toutes les estimations ont pu être réalisées à partir des valeurs de départ suivantes pour les paramètres :  $C_0 = 20$ ,  $S = 0,2$ ,  $K' = 0,3$ ,  $I = 0,8$ ,  $\alpha = 0,1$ .

Les erreurs aléatoires ont été simulées selon une loi normale dans les cas suivants : 8 points de mesure aux temps 0, 15, 30, 60, 90, 120, 150 et 180 jours d'incubation avec un coefficient de variation de 2 %, 8 points de mesure avec un coefficient de variation de 1 %. Six simulations ont été effectuées pour chaque courbe soit 54 par taux d'erreur et au total 108 simulations.

## RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

### Valeur des paramètres ajustés

Avec l'expérience décrite ci-dessus nous avons trouvé les paramètres suivants (PANSU et DE BOISSEZON, 1989) pour l'équation 1 (valeur  $\pm$  écart-type) :

$$\begin{array}{lll} A_0 = 5,3 \pm 0,9 \text{ ‰} & B_0 = 21,2 \pm 0,7 & \\ P_a = 0,79 \pm 0,02 & P_b = 0,04 \pm 0,01 & \alpha = 0,08 \pm 0,01 \text{ jour}^{-1} \end{array}$$

L'ajustement sur l'équation 5 avec les mêmes données fournit :

$$\begin{array}{lll} C_0 = 26,5 \pm 0,3 \text{ ‰} & S = 0,20 \pm 0,03 & \\ K' = 0,20 \pm 0,03 & I = 0,88 \pm 0,03 & \alpha = 0,11 \pm 0,02 \text{ jour}^{-1} \end{array}$$

La précision des deux ajustements est la même avec un coefficient de détermination  $R^2 = 0,99$  et une somme des carrés des résidus = 34,2. Cependant, l'ajustement sur l'équation 5 fournit une valeur un peu plus forte pour  $I$  ( $P_a + P_b = 0,83$ ) et pour  $\alpha$  avec une précision un peu moins bonne pour ce dernier paramètre. La figure 3 montre l'ensemble des ajustements et la simulation des compartiments labile A et stable B.

#### Remarques :

- l'équation 6 qui comporte un paramètre de moins que l'équation 5 présente une ambiguïté que nous avons déjà signalée (PANSU et SIDI, 1987) pour les estimations ; dans le cas présent nous aurions deux valeurs estimées pour  $K$  respectivement de 0,19 dans le premier membre de l'équation et de 0,36 dans le second membre ;

- la tentative que nous avons effectuée d'ajuster un modèle du type de l'équation 7 s'est avérée infructueuse, les paramètres trouvés n'étant pas significatifs. D'autre part, une équation de ce type n'a pas été testée pour des durées importantes d'incubation ; il est gênant que le carbone tende vers moins l'infini lorsque le temps d'incubation tend vers l'infini. Par ailleurs, les résultats de l'étude de sensibilité qui suit montrent que pour ce type d'expérimentation, il serait illusoire de prétendre ajuster avec une précision acceptable un modèle plus complexe que celui des équations 1 et 5.

### Linéarité du modèle avec l'apport organique

Malgré la large étendue des doses d'amendement de l'expérience décrite ci-dessus, la linéarité en fonction de ces apports «  $m$  », des ajustements de  $Y_0(m)$  et  $Y_1(m)$  de l'équation (2), s'est avérée satisfaisante avec les équations suivantes :

$$\begin{array}{ll} Y_0(m) = 22,19 + 0,19 m & R^2 = 0,986 \\ Y_1(m) = 4,26 + 0,64 m & R^2 = 0,996 \end{array}$$

Cette linéarité confirme bien nos observations antérieures (PANSU et SIDI, 1987) et celles de PAL et BROADBENT (1975) malgré une petite différence de comportement du carbone qui reste à expliquer : l'estimation du « *priming ratio* » selon une méthode proposée par ces derniers auteurs fournit ici des valeurs inférieures à l'unité ; contrairement à leur essai, nous aurions un effet de l'apport de paille plutôt stabilisateur du carbone du sol mais la technique d'estimation sans les éléments marqués est peu précise et les conditions expérimentales très différentes.

Nonobstant cette remarque, il apparaît maintenant tout à fait légitime d'admettre la linéarité en fonction de la dose apportée et de conduire les essais d'incubation avec un seul amendement organique et toujours un témoin.

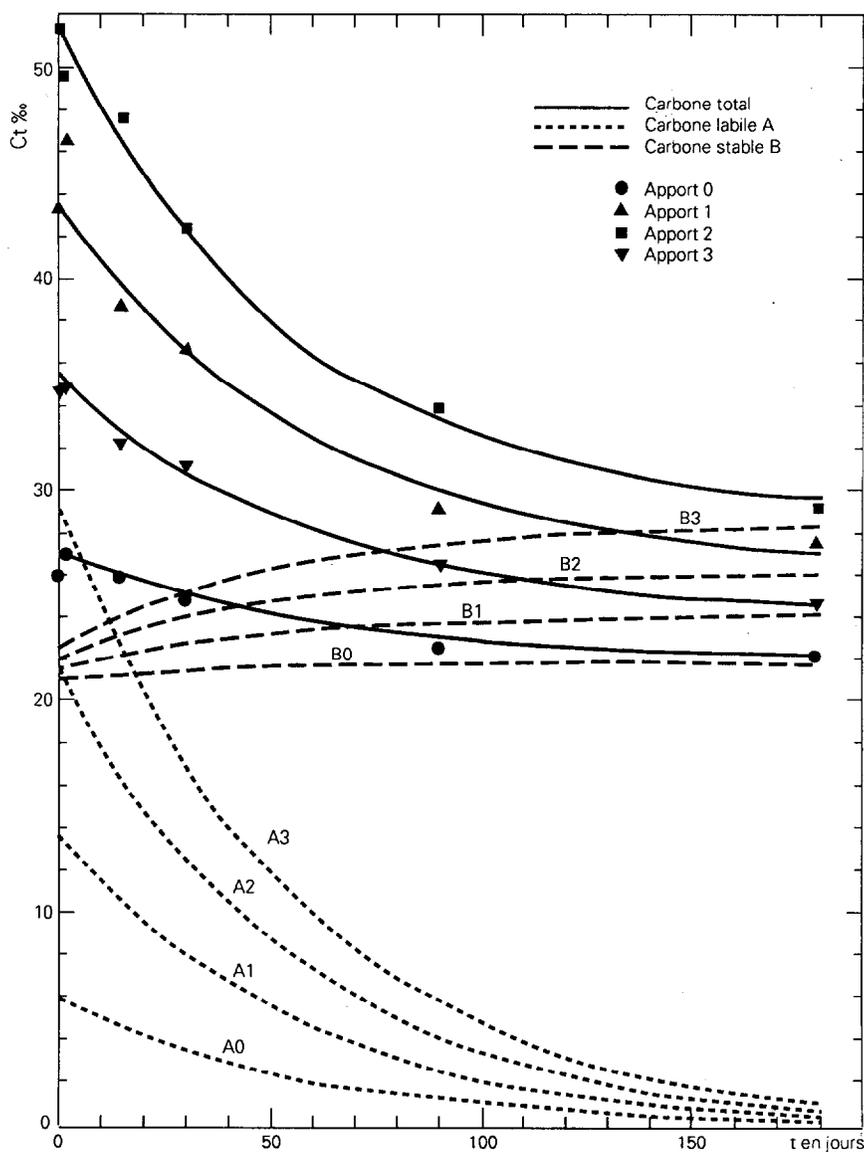


FIG. 3. - Valeurs simulées des compartiments labile A, stable B et du carbone total dans l'expérience d'ajustement (lignes). Les valeurs expérimentales sont les moyennes de deux répétitions (points).

*Simulated values of labile A, stable B compartments and total carbon in the fitting experiment (lines). Experimental data are the mean values of two repetitions (points).*

### Sensibilité du modèle aux divers paramètres

La figure 4 représente différentes courbes fictives d'évolution du carbone pour des incubations de sols sans apport et avec un amendement correspondant à 30 % d'apport en carbone. Toutes ces courbes encadrent les valeurs ci-dessus trouvées pour le modèle (traits gras) et montrent l'influence de variations de  $K'$ ,  $I$  ou  $\alpha$  avec mention des valeurs correspondantes de  $P_a$  et  $P_b$ .

Conformément à l'équation (3), seule la valeur de  $K'$  modifie le niveau de carbone à l'équilibre et pour un amendement où  $K'$  serait nul, ce niveau serait la quantité de carbone stable initial  $B_0$ .

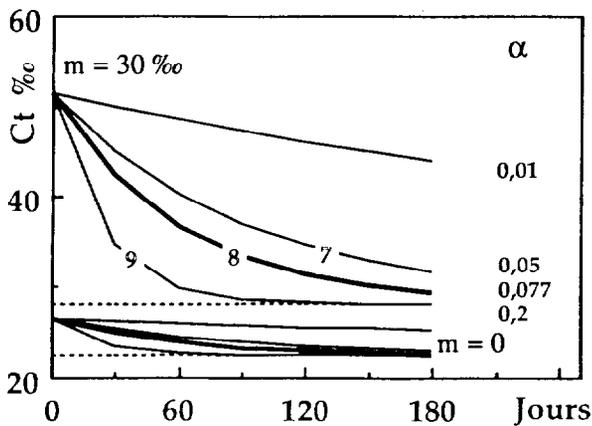
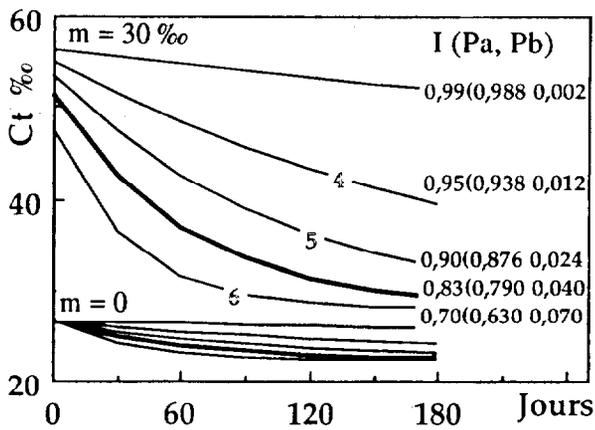
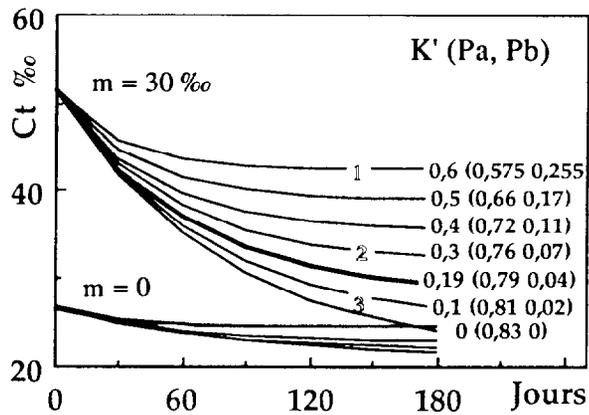


FIG. 4. - Valeurs simulées de décroissances du carbone avec un fort amendement organique (30 ‰ de carbone) et un témoin selon différentes valeurs des paramètres  $K'$ ,  $I$  et  $\alpha$  pour  $C_0 = 26,5 \text{ ‰}$  et  $S = 0,20$ . Les valeurs respectives correspondantes de  $P_a$  et  $P_b$  sont indiquées entre parenthèses. Le couple de courbes en traits gras est celui trouvé à l'ajustement du modèle. Les courbes numérotées 1 à 9 ont servi aux simulations numériques de résultats expérimentaux (Tableaux I, II et III).  
 Simulated values of carbon decreases with a high organic soil conditioner (30 ‰ carbon) and a check sample with different values of  $K'$ ,  $I$  and  $\alpha$  parameters for  $C_0 = 26,5 \text{ ‰}$  and  $S = 0.20$ . Corresponding values of  $P_a$  and  $P_b$  are reported in parentheses. The curves in heavy lines were the ones found with the model fitting. The curves 1 to 9 were used for the numerical simulations of experimental results.

Les courbes montrant l'influence de I et  $\alpha$  tendent donc toutes vers un même équilibre indiqué en pointillé sur le dernier graphique. Conformément à l'équation (3), la différence de niveau entre les deux traits pointillés avec et sans apport est égale à la fraction « K'm » de l'amendement transformé en humus.

Le coefficient de vitesse de transformation  $\alpha$  traduit la rapidité avec laquelle on atteint l'équilibre fixé par K'. Pour une valeur de 0,2 jour<sup>-1</sup>, il est atteint dès trois mois d'incubation alors que pour  $\alpha = 0,1$  il faut environ six mois et ce temps d'équilibre augmente ensuite d'autant plus vite que  $\alpha$  se rapproche de 0.

Le coefficient d'incorporation I intervient sur le niveau initial de carbone mais également sur le temps nécessaire à l'équilibre. Ce dernier sera de trois mois pour un coefficient I de 0,7, de six mois environ pour un coefficient de 0,8 et il augmente d'autant plus vite que I se rapproche de 1.

### Sensibilité de l'ajustement à l'échantillonnage au cours du temps

Les fonctions de sensibilité ont été reportées en fonction du temps sur la figure 5 avec les valeurs des paramètres mentionnées ci-dessus.

Cette figure montre que dans les conditions utilisées, les mesures vers deux mois d'incubation sont primordiales pour une bonne détermination des paramètres  $\alpha$ , I ou  $P_a$  alors que la détermination des paramètres K',  $P_b$  et S sera meilleure pour des incubations de longue durée, le temps total utilisé de 6 mois se situant près des paliers optimaux. La figure 4 montre bien que, dans les conditions expérimentales utilisées, il n'y aurait aucun intérêt à poursuivre ces incubations sur des durées supérieures à un an si ce n'est d'augmenter l'incertitude de la détermination des paramètres  $\alpha$ , I et  $P_a$ . La fonction de sensibilité du paramètre Co est optimale au temps initial, avec cependant une sensibilité du modèle à ce paramètre peu variable avec le temps.

Ces fonctions varient avec la valeur des paramètres; ainsi avec  $\alpha = 0,05$  l'optimum des dérivées partielles se situe à 3 mois d'incubation pour  $\alpha$ , I et  $P_a$  alors que pour  $\alpha = 0,2$  il se situe à moins d'un mois; pour I = 0,9 l'optimum passe à 4 mois d'incubation et pour I = 0,95 à plus de 6 mois; ainsi, il pourra s'avérer utile de renouveler les expériences avec des plans redéfinis en fonction des premiers résultats.

### Sensibilité de l'ajustement à l'erreur expérimentale

#### INDÉPENDANCE DES PARAMÈTRES

Le tableau I indique les coefficients de corrélations obtenus entre les divers paramètres de l'équation 5 à partir des 54 simulations avec 2 % d'erreur sur la mesure du carbone. Ce tableau confirme l'indépendance des paramètres avec l'absence de corrélation dans la plupart des cas; on note toutefois une corrélation faiblement significative aux risques de 5 % et 2 % respectivement entre  $\alpha$  et I d'une part, entre K et S d'autre part, ainsi qu'une corrélation très significative entre les deux paramètres spécifiques du sol Co et S; avec les simulations d'erreurs plus faibles, seule cette dernière corrélation reste significative. Ce type d'ajustement semble donc compenser un éventuel défaut d'estimation du carbone total par un défaut dans

TABLEAU I  
Coefficients de corrélation entre les paramètres de l'équation 5 pour 54 simulations avec 2 % d'erreur (\*, \*\* \*\*\* : significatifs avec risques respectifs inférieurs à 5 %, 2 % et 1 %)  
*Correlation coefficients between parameters of equation 5 for 54 simulations with 2 % error (\*, \*\*, \*\*\* : significant with risks lower than 5 %, 2 % and 1 %, respectively)*

Co	S	K	I	$\alpha$
Co	0,82 ***	0,20	0,25	-0,04
S		0,34 **	-0,17	-0,17
K			-0,10	0,06
I				0,28 *

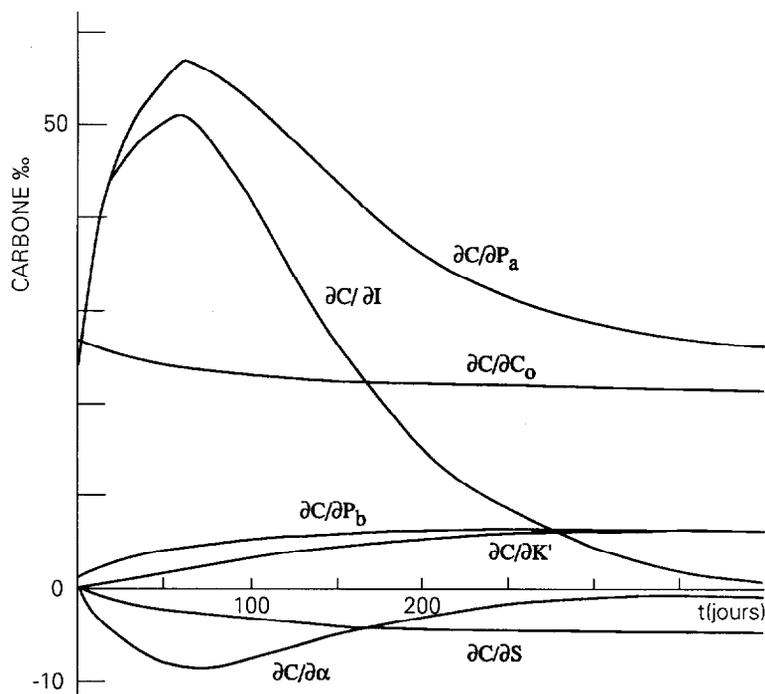


FIG. 5. - Fonctions de sensibilité des paramètres des équations 1 et 5. Pour la représentation sur une échelle unique, les dérivées partielles par rapport à chaque paramètre ont été multipliées par la valeur du paramètre trouvée à l'ajustement.  
 Sensitiveness functions of the parameters of equations 1 and 5. The partial derivatives, with respect to each parameter, have been multiplied by the parameter value found at the fitting, in order to use a single scale.

le même sens sur le taux de fraction labile ; il faut pourtant garder à l'esprit que  $C_o$  n'est pas un véritable paramètre de l'expérience puisqu'il peut être mesuré indépendamment et qu'il est possible pour un sol donné de ne faire intervenir dans les équations que le paramètre  $S$ .

#### PRÉCISION DES ESTIMATIONS

Le tableau II montre la précision globale que l'on peut attendre sur chacun des paramètres pour chaque erreur expérimentale simulée.  $C_o$ , qui n'est pas vraiment un paramètre de l'expérience d'incubation, est toujours le plus précis. Les paramètres  $I$  et  $P_a$  sont déterminés avec sensiblement la même précision conformément à la structure du modèle, précision encore très acceptable puisque inférieure ou égale au double de l'erreur expérimentale. Le coefficient de variation lié au paramètre  $S$  devient proche de 8 fois celui de la mesure du carbone. L'erreur sur les trois autres paramètres  $\alpha$ ,  $K'$  et  $P_b$  s'avère encore beaucoup plus importante avec, conformément aux relations, un coefficient de variation de  $P_b$  proche de celui de  $K$  ; l'erreur sur  $P_b$  est également proche de celle sur  $P_a$  en valeur absolue ( $s_d$ ) mais elle devient très différente en valeur relative du fait de la valeur faible de  $P_b$ .

Les taux d'erreur sur ces trois derniers paramètres rendent leur détermination très imprécise dès que l'erreur expérimentale sur la détermination du carbone dépasse 1 % ; une telle précision peut difficilement être obtenue par des mesures de carbone après broyage du sol et il conviendrait plutôt de faire appel aux techniques de respirométrie.

Il s'avère pourtant nécessaire de mieux examiner ces erreurs selon la valeur des paramètres ; le tableau III représente les différents coefficients de variation obtenus sur les six simulations de chaque taux d'erreur appliqué à chacune des courbes choisies sur la figure 4.

Conformément aux prévisions des courbes de sensibilité (fig. 5), l'erreur sur  $K'$  et sur  $P_b$  est maximale dans tous les cas où la durée de l'expérience n'est pas suffisante et où l'on se trouve encore loin de l'équilibre à 6 mois d'incubation, soit dans l'ordre décroissant par rapport à l'erreur, les courbes 4, 5, 3, 7 ; dans les autres courbes, le paramètre  $K'$  est déterminé avec moins de 6 % d'erreur, même avec une

TABLEAU II

Erreur aléatoire globale des estimations de chaque paramètre pour les neuf courbes sélectionnées en fonction de l'erreur simulée (6 répétitions par courbe) :

$s_d$  = écart-type des différences par paire = écart quadratique moyen (EQM) en l'absence de biais, CV = coefficient de variation (EQM par rapport à la valeur moyenne du paramètre) pour 54 simulations de chaque erreur expérimentale

*Global random error of each parameter estimation for the nine selected curves in terms of simulated experimental error (6 repetitions by curve) :*

*$s_d$  = standard deviation of paired differences = mean quadratic deviation in absence of systematic error, CV = variation coefficient ( $s_d$  with respect to the mean value of the parameter) for 54 simulations of each experimental error*

Erreur	test	Co	S	I	K'	$\alpha$	$P_a$	$P_b$
1 %	sd(EQM)	0,20	0,016	0,017	0,032	0,016	0,013	0,013
	CV %	0,77	8	2	13,3	18,2	1,6	20,1
2 %	sd(EQM)	0,3	0,03	0,027	0,097	0,041	0,027	0,020
	CV %	1,3	16,5	3,2	41,3	46,6	3,5	32,3

TABLEAU III

Coefficients de variations (% écart-type par rapport à la moyenne) trouvés pour chaque paramètre en fonction du coefficient de variation associé à la mesure du carbone (6 répétitions par détermination)

*Variation coefficients (% standard deviation with respect to the mean value) found for each parameter in terms of the variation coefficient associated with carbon measurement (6 repetitions by determination)*

Courbe	Erreur	Co	S	I	K'	$\alpha$	$P_a$	$P_b$
1	1,0 %	1,1	15	2,4	1	18	4,8	13
	2,0 %	1,5	21	3,6	3,3	33	10	23
2	1,0 %	0,7	10	1,2	2,4	8,1	1,3	10
	2,0 %	0,8	10	2,4	5,3	8,9	2,2	14
3	1,0 %	0,4	4,8	2,4	10	10	0,9	12,5
	2,0 %	1,5	14	4,9	50	30	2,2	52,5
4	1,0 %	0,8	10	1	29	27	1,2	36
	2,0 %	1,1	14	2,1	290	79	1,1	224
5	1,0 %	0,8	5	2,2	21	23	0,6	35
	2,0 %	1,5	14	2,2	61	39	2,6	61
6	1,0 %	0,4	5	4,2	5	13,2	1,9	13,9
	2,0 %	0,4	5	2,9	5,3	5,6	6,5	10
7	1,0 %	0,8	5	1	11	8	0,6	16,4
	2,0 %	1,1	14	2,4	22	17,6	1,3	20
8	1,0 %	1,1	5	1,2	11	10	1,2	11,9
	2,0 %	1,9	14	2,4	11	13	2,2	21,7
9	1,0 %	0,4	5	2,4	2,6	10	1,3	9
	2,0 %	1,9	15	4,7	5,3	31	2,3	25,2

précision expérimentale de 2 %, à l'exception de la courbe 8 où le taux d'erreur se situe à une position intermédiaire de 11 %.

L'erreur sur  $\alpha$  est également maximale pour les courbes 4 et 5 ; comme les précédentes, cette erreur augmente très vite lorsque augmente le coefficient d'incorporation  $I$ . Elle est également augmentée en présence de pseudo coefficients isohumiques  $K'$  forts (courbe 1) ou faibles (courbe 3) ; seule la courbe 2 où ce coefficient est intermédiaire ( $K' = 0,3$ ) permet des ajustements de  $\alpha$  avec moins de 9 % d'erreur quelle que soit la variabilité expérimentale testée. Les erreurs sont moins variables en fonction de  $\alpha$  à part une faible augmentation avec la valeur de ce paramètre.

L'erreur sur  $S$  varie peu avec la valeur des paramètres  $\alpha$ ,  $I$  et  $K'$  ; sa valeur moyenne se situe à environ 8 fois l'erreur expérimentale.

L'erreur sur  $I$  (ou  $P_a$ ) est toujours la plus faible de toutes (hormis celle sur  $C_0$ ) ; elle dépend peu également de la valeur des paramètres et se situe vers 1,5 fois l'erreur expérimentale.

Cette étude devrait permettre à chaque expérimentateur d'estimer la précision de ses résultats en fonction des paramètres qu'il aura trouvés et de son incertitude expérimentale. Elle montre que cette précision est très variable selon l'allure des courbes de décroissance ; dans certains cas, la détermination des paramètres perd toute signification. Dans le cas de l'expérience décrite ci-dessus, avec une erreur expérimentale de l'ordre de 1,5 % sur la mesure du carbone, la précision observée sur la détermination des paramètres concorde assez bien avec les simulations sur la courbe 8. On a donc une validation du modèle gaussien pour l'erreur expérimentale et les intervalles de confiance à 95 % calculés de manière classique (6 répétitions pour le calcul de l'erreur, 2 répétitions pour l'expérience, coefficient de variation moyen des simulations avec 1 % et 2 % d'erreur) fournissent :  $C_0 = 26,5 \pm 0,7$  ;  $S = 0,20 \pm 0,04$  ;  $I = 0,85 \pm 0,03$  ;  $K' = 0,20 \pm 0,04$  ;  $\alpha = 0,09 \pm 0,02$  ;  $P_a = 0,79 \pm 0,03$  ;  $P_b = 0,040 \pm 0,013$ .

## CONCLUSION

La simplification, que nous avons proposée, d'un précédent modèle à deux compartiments, permet de déterminer, en une seule expérience d'incubation, un taux de carbone labile dans le carbone initial du sol ainsi que trois autres paramètres caractéristiques de l'expérience : un coefficient de vitesse de décomposition, un taux de renouvellement et un taux de stabilisation du carbone. Alternativement, les deux derniers paramètres peuvent être remplacés par les dénominations peut-être plus familières aux expérimentateurs de pseudo coefficient iso-humique et taux d'incorporation.

Le modèle a pu être correctement ajusté avec des données d'incubation *in vitro* en régime hydrique alterné avec saturation en eau ; les pertes en carbone par lixiviation sont alors équivalentes à celles par minéralisation pour l'ajustement de l'évolution de l'horizon humifère supérieur. Nous proposons pourtant une modification des équations pour une application plus générale quelles que soient les conditions d'incubation.

Nous avons pu également constater que le nombre de paramètres proposé semble bien adapté à la description des expériences d'incubation : avec un paramètre de moins nous avons une ambiguïté, avec un de plus une absence de significativité.

Les équations proposées nous permettent de donner aux expérimentateurs des précisions concernant les conditions expérimentales : apport organique et échantillonnage avec le temps d'incubation.

En outre, les simulations de résultats expérimentaux ont permis de préciser l'indépendance des paramètres et l'erreur aléatoire associée à leur détermination. Cette erreur impose une rigoureuse exigence sur la précision expérimentale et les techniques de mesure de la respiration du sol conviendraient probablement mieux que les mesures de carbone sur les échantillons. Notre étude devrait permettre aux futurs expérimentateurs de connaître *a posteriori* l'intervalle de confiance attaché à chacun de leurs paramètres en fonction d'une part de la précision des mesures, d'autre part de l'allure des courbes et des résultats obtenus. Elle autorise donc des tests de signification à des différences de paramètres qui pourront être observées lors d'expériences d'incubation de divers matériaux organiques dans divers sols ; il pourra cependant s'avérer nécessaire de procéder à quelques simulations supplémentaires du même type que celles décrites ici en fonction des équations choisies et des paramètres trouvés.

## REMERCIEMENTS

Nous remercions M<sup>me</sup> E. PERRIER, M. C. MULLON (LIA Orstom Bondy) et M. J. BALESDENT (Inra Versailles) pour la correction attentive de ce manuscrit ainsi que M. P. DE BOISSEZON (Orstom Montpellier) qui a été à l'initiative de ce travail (présentation commune de la première proposition de ce modèle à la réunion du « Groupe d'étude des matières organiques des sols » à l'Inra Bordeaux le 18 avril 1989).

Manuscrit accepté par le Comité de rédaction le 10 mars 1992

## BIBLIOGRAPHIE

- BALESDENT (J.), 1982. - *Étude de la dynamique de l'humification de sols de prairies d'altitude au moyen de datations C<sup>14</sup> de matières organiques*, thèse ingénieur-docteur, univ. Nancy-I, 90 p.
- BLET-CHARAUDEAU (C.), MULLER (J.) et LAUDELOUT (H.), 1990. - Kinetics of carbon dioxide evolution in relation to microbial biomass and temperature, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54 : 1324-1328.
- BOIFFIN (P.) et FLEURY (A.), 1974. - Quelques conséquences agronomiques du retournement des prairies permanentes, *Ann. Agron.*, 25 : 555-573.
- BOISSEZON (P. de), 1988. - Effets de l'enfouissement de paille de luzerne sur la capacité d'échange d'un sol brun sur limon des plateaux (C. R. journée de pédologie Orstom sept. 1988). *Cah. Orstom sér. Pédol.*, vol. XXIV, n° 4 : 337-339.
- BRUNNER (W.) et FOCHT (D. D.), 1984. - Deterministic three half order kinetic model for microbial degradation of added carbon substrates in soil, *Applied & Environmental Microbiology*, 47 : 167-172.
- CHAUSSOD (R.), NICOLARDOT (B.), SOULAS (G.) et JOANNES (H.), 1986. - Mesure de la biomasse microbienne dans les sols cultivés, II-Cinétique de minéralisation de matière organique microbienne marquée au C<sup>14</sup>, *Rev. Ecol. Biol. Sol.*, 23 : 183-196.
- DEANS (J. R.), MOLINA (J. A. E.) et CLAPP (C. E.), 1986. - Models for predicting potentially mineralizable nitrogen and decomposition rate constants, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 50 : 323-326.
- HENIN (S.) et DUPUIS (M.), 1945. - Essai de bilan de la matière organique du sol. *Ann. Agron.*, XV : 17-29.
- HENIN (S.), MONNIER (G.) et TURC (L.), 1959. - Un aspect de la dynamique des matières organiques du sol. *C. R. Acad. Sci. Fr.*, 248 : 138-141.
- HOUOT (S.), MOLINA (J. A. E.), CHAUSSOD (R.) et CLAPP (C. E.), 1989. - Simulation by NCSOIL of net mineralization in soils from the Deherain and 36 parcelles fields at Grignon, *Soil Sci. Soc. of Am. J.*, 53 : 451-455.
- IONENKO (V. I.), BATSULA (A. A.), GOLOVACHEV (Y. A.), 1986. - Kinetics of humification. *Soviet Soil Sci.*, 18 : 33-42.
- JENKINSON (D. S.) et RAYNER (J. H.), 1977. - The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments. *Soil Sci.*, 123 (5) : 298-303.
- MOLINA (J. A. E.), CLAPP (C. E.), SHAFER (M. J.), CHICHESTER (F. W.) et LARSON (W. E.), 1983. - NCSOIL, a model of nitrogen and carbon transformations in soil: description, calibration and behavior. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47 : 85-91.
- MOREL (R.), 1981. - Essai d'évaluation de l'organisation et de la réorganisation de l'azote minéral du sol par la méthode des modèles compartimentaux- I. Cas d'un sol maintenu sans culture. *Agronomie*, 1 : 19-26.
- PAL (D.) et BROADBENT (F. E.), 1975. - Kinetics of rice straw decomposition in soils. *J. of Environ. Qual.* 4 : 256-260.
- PANSU (M.) et BOISSEZON (P. de), 1989. - *Dynamique du carbone organique dans les mélanges sols-résidus végétaux. Influence sur la capacité d'échange cationique*. Actes Gemos-Inra, Bordeaux, avril 1989.
- PANSU (M.) et SIDI (H.), 1987. - Cinétique d'humification et de minéralisation de mélanges sols-résidus végétaux, *Sci. du Sol* 25 : 247-265.
- PANSU (M.), 1988. - Proposition de modèles descriptifs de la dynamique des matières organiques des sols, (C. R. journées de pédologie Orstom sept. 1988). *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, vol. XXIV, n° 4 : 361-362.
- PANSU (M.), 1989. - Cinétique chimique et modèles compartimentaux : application à l'étude de l'évolution du stock organique des sols. Actes séminaire Seminfors II « la modélisation : aspects pratiques et méthodologie - Orstom sept. 1988 », *Colloques et séminaires* : 63-78.
- PARNAS (H.), 1975. - Model for decomposition of organic material by microorganisms. *Soil Biol. Biochem.*, 7 : 161-169.
- PARTON (W. J.), SCHIMEL (D. S.), COLE (C. V.) et OJIMA (D. S.), 1987. - Analysis of factors controlling soil organic matter levels in great plains grasslands. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 51 : 1173-1179.
- PARTON (W. J.), STEWART (J. W. B.), COLE (C. V.), 1988. - Dynamics of C, N, P and S in grassland soils : a model. *Biogeochemistry*, 5 : 109-131.
- PAUL (E. A.) et VAN VEEN (J.), 1978. - The use of tracers to determine the dynamic nature of organic matter. *Trans. Int. Congr. Soil Sci.*, 11th : 61-102.
- POWELSON (D. S.), 1980. - The effect of grinding on microbial and non-microbial organic matter in soil. *J. of Soil Sci.*, 31 : 77-85.
- SALLIH (Z.) et BOTTNER (P.), 1988. - Effect of wheat (*Triticum aestivum*) roots on mineralisation rates of soil organic matter. *Biol. Fertil. Soils*, 7 : 67-70.
- 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 doct. ing. Ina. Paris Grignon.