

CINETIQUE CHIMIQUE ET MODELES COMPARTIMENTAUX : APPLICATION A L'ETUDE DE L'EVOLUTION DU STOCK ORGANIQUE DES SOLS

Marc PANSU

I RESUME

Un exemple simple d'étude cinétique d'un équilibre chimique permet de montrer :

-L'insuffisance et les dangers d'une approche statistique par rapport à une démarche déterministe d'étude des mécanismes.

-L'application de la cinétique chimique à des systèmes écologiques plus complexes où les produits ne sont pas tous identifiés et mesurés.

Dans de tels systèmes, on peut pourtant identifier des variables d'état ou compartiments contenant des produits dont la vitesse de décomposition peut être considérée comme homogène. Entre ces variables, s'échangent des flux de matière régis par les lois classiques de la cinétique chimique.

Nous décrivons alors des modèles à deux ou trois compartiments que nous avons proposés concernant la cinétique d'évolution de mélanges sols-résidus végétaux sous l'action des microorganismes et nous les situons par rapport à un modèle plus simple et un plus complexe proposés antérieurement.

Nous commentons ensuite en relation avec ce travail, les principales étapes de l'élaboration d'un modèle à compartiments : proposition d'hypothèses, estimation des coefficients de décroissance, simulation dynamique et validation. Simultanément, sont décrits quelques outils de calcul avec les moyens informatiques qui ont permis leur mise en oeuvre.

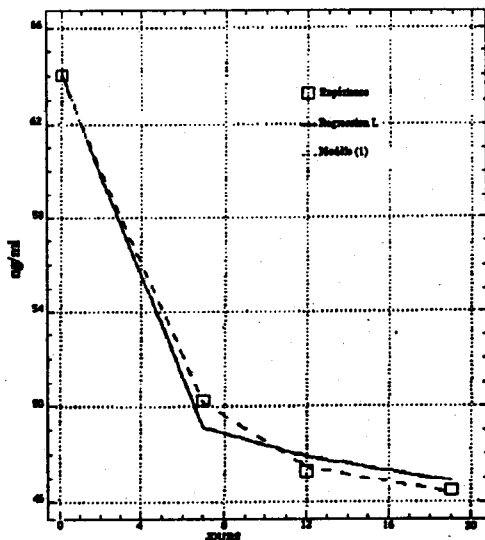
Enfin nous suggérons brièvement les voies de recherche qui à notre avis doivent permettre de transposer nos modèles validés selon des données de laboratoire à de véritables modèles prévisionnels d'évolution des sols en conditions naturelles.

II. APPROCHES STATISTIQUES OU DETERMINISTES

II.1 APPROCHES STATISTIQUES

L'expérimentateur qui suit une évolution, comme celle d'une concentration chimique, est souvent tenté de réaliser un ajustement statistique de ses données. Ainsi, la figure 1 montre un ajustement logarithmique de la concentration en deltaméthrine d'une solution diluée dans l'alcool à l'abri de la lumière en fonction du temps.

Figure 1 : Approches statistique et déterministe de la cinétique de dégradation d'une solution alcoolique de deltaméthrine. la régression linéaire de la concentration par rapport au logarithme du temps est significative (trait plein). Elle ne correspond pourtant à aucune loi contrairement au modèle (1) basé sur la cinétique chimique (traits pointillés).



Cet ajustement est hautement significatif (probabilité de refus $< 0,02$) et peut donc fournir un modèle empirique de l'état des solutions de deltaméthrine. Pourtant une réflexion est nécessaire en ce qui concerne les imperfections ou caractéristiques suivantes :

-il ne fournit de réponse que pour l'ensemble des temps réels positifs $]0, \infty[$ excluant le temps 0 de l'intervalle physique.

-Pour un temps ∞ , la dose restante de deltaméthrine devient nulle et la conservation des solutions alcooliques est impossible

-Il n'est en accord avec aucune loi physique connue. Peut-être s'agit-il de la découverte d'une loi ?

II.2 APPROCHE DÉTERMINISTE.

Dans un premier temps, il est possible de prendre du recul par rapport aux données et de rechercher s'il existe un mécanisme et une loi qui peut régir le phénomène à observer.

Dans le cas ci-dessus, une étude par chromatographie gazeuse couplée spectrométrie de masse (PANSU et al., 1988) nous a montré que la décomposition s'accompagnait de la croissance d'un composé identifié comme un stréréoisomère du produit initial. Par ailleurs, RUZO et al. (1978) ont étudié les produits de photodégradation accélérée de la deltaméthrine.

Il ressort que le mécanisme de l'isomérisation peut être pressenti comme un double équilibre radicalaire, le radical intermédiaire I pouvant redonner soit la deltaméthrine D soit son isomère B selon le schéma :



En posant les hypothèses de cinétiques chimiques du premier ordre et d'un état dynamique stable ($d[I]/dt=0$) pour le radical I on aboutit aux équations de vitesse régissant les teneurs des composés D et B :

$$d[D]/dt = -\alpha[D] + \beta[B] \quad (2)$$

$$d[B]/dt = \alpha[D] - \beta[B] \quad (3)$$

Selon que l'on a mesuré D seul ou D et B en fonction du temps, deux types de calculs permettant d'estimer α et β sont alors disponibles en prenant en compte l'ensemble des données. Leur principe sera présenté ci-dessous.

Cet exemple simple montre bien l'intérêt d'une démarche déterministe par rapport à la simple approche statistique. Même si l'ajustement aux données est proche du précédent (figure 1), les trois ambiguïtés citées ci-dessus sont maintenant levées :

-Le modèle (1) donne une réponse sur toute l'échelle de temps;

-Les solutions ne se dégradent pas complètement pour un temps infini mais la teneur en deltaméthrine tend vers une limite lorsque les vitesses des équations 2 et 3 deviennent égales soit :

$$[D] = \beta[B]/\alpha \quad (4)$$

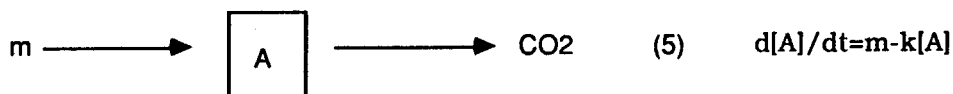
-La validation, par nos résultats expérimentaux, de ce modèle qui respecte les lois classiques de la cinétique chimique constitue une confirmation du mécanisme réactionnel suggéré par RUZO et al. dans d'autres conditions expérimentales.

II.3 CAS DES MATIERES ORGANIQUES DES SOLS

Le devenir des caractéristiques chimiques des sols, l'évolution de leur stabilité structurale et de leur fertilité sont en liaison avec celui de leur stock organique quantitatif et qualitatif. Aussi, dans un souci de prévision de l'effet de différentes pratiques culturales, plusieurs auteurs ont cherché à mesurer l'évolution de ces stocks et à modéliser leurs résultats.

Selon les expériences, la démarche statistique a permis des ajustements en fonction du temps selon des courbes exponentielles (HOFMAN et RUYMBEKE, 1979), hyperboliques (BOIFIN et FLEURY, 1974), puissances (BALESDENT, 1982).

Ces divers ajustements sont tous des variantes de l'ancien modèle présenté par HENIN et DUPUIS (1945) et décrivant la matière organique comme un seul compartiment A dans lequel entrent des apports végétaux m et qui se décompose selon une cinétique chimique du premier ordre :



La décroissance exponentielle correspond bien à la loi de vitesse (5) alors que les ajustements hyperboliques et puissances correspondent respectivement à des cinétiques de décroissance d'ordre 2 et 3 (Tableau I).

Loi cinétique	Ordre 0 Linéaire	Ordre 1 exponentielle	Ordre 2 hyperbolique	Ordre n puissance
$-dA/dt$	$A \xrightarrow{a}$	$A \xrightarrow{a(A)}$	$A \xrightarrow{a(A)^2}$	$A \xrightarrow{a(A)^n}$
Modèle				
Dimension a				
M = %o massique	MT^{-1}	T^{-1}	$M^{-1}T^{-1}$	$M^{-1}T^{-1}$
T = temps				
Evolution A	$A_0 - at$	$A_0 \exp(-at)$	$A_0(1 + A_0at)^{-1}$	$A_0(1+a)AL^{n-1}t^{-n-1}$ $n < -1$ $(Z^{n-1} - 1)/(n(n-1))A_0^{n-1}$
Demi-vie A	$A_0 / 2a$	$\text{Log } 2 / a$	$1/aA_0$	
Exemples d'applications au carbone des sols	pour mémoire	HOFMAN ET RUYMBEKE (1979) BOIFIN et al. (1986)	BOIFIN ET FLEURY (1974)	BALESDENT (1982)

Tableau 1 : Cinétique de décroissance de modèle monocompartimentaux appliqués au carbone des sols. A = contenu carboné exprimé généralement en pour mille massique du sol sec. t est le temps exprimé en année. A₀ = valeur de A au temps 0. a = coefficient de décroissance. Dans le seul cas de la décroissance exponentielle le temps de demi-vie est indépendant de la quantité de matière à détruire.

Cependant, ces modèles ne peuvent constituer que de grossières approximations de la dynamique des matières organiques des sols. En particulier, ils ne peuvent pas du tout rendre compte du comportement des composés labiles qui se transforment rapidement lors d'apports végétaux. D'un autre côté, ils ne permettent pas de comprendre les âges importants mesurés pour la matière organique des sols. C'est pourquoi, divers auteurs ont préféré des modèles à plusieurs compartiments.

III. MODELES COMPARTIMENTAUX.

III.1 DIAGRAMMES RELATIONNELS : COMPARTIMENTS ET FLUX.

FERRARI(1070) dans une description des techniques de base de simulation dynamique décrit des normes pour construire des diagrammes relationnels. Parmi celles-ci nous retiendrons :



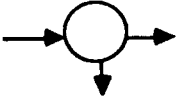
Les variables d'état qui sont le résultat de l'intégration des flux à un instant donné. Nous appelons ces variables des compartiments. Le modèle (5) ci-dessus possède un seul compartiment A qui représente la matière organique totale. Le modèle (1) comporte les 3 compartiments D, I et B.



Les flux de matière entre les variables d'état qui modifient leur contenu



Les variables d'entrée ou de sortie de quantités ne modifiant pas l'équilibre du système. Par exemple CO_2 dans le modèle (5).



Variables intermédiaires ou auxiliaires indiquant un partage des flux.

III.2 LOIS DE DÉCROISSANCE DES COMPARTIMENTS.

Ce sont ses lois qui régissent l'intensité des flux ou quantités de matière qui quittent une variable pendant un intervalle de temps. Ce sont dans notre cas les lois classiques de la cinétique chimique (Tableau I).

Si nous représentons par des crochets les concentrations de chaque variable d'état :

Dans le modèle (1), le flux de D vers B est égal à $\alpha[D]$ et le flux inverse à $\beta[B]$. Dans le modèle (5), le flux de sortie de A est $k[A]$. Ces flux correspondent ici à des cinétiques chimiques du premier ordre exprimant un pourcentage de sortie constant par rapport au contenu du compartiment.

Pour des réaction d'ordre 0, ce sont les flux de sortie qui sont constants et ici respectivement égaux à α , β et k . Pour des réactions d'ordre n nous aurions les flux $\alpha[D]^n$, $\beta[B]^n$ et $k[A]^n$.

A chaque compartiment, sera associé une équation différentielle comme les équations (2), (3) et (5) représentant sa dynamique d'évolution par la différence entre toutes les entrées et toutes les sorties. L'intégration simultanée de toutes les équations, après en avoir estimé les coefficients, constitue la simulation dynamique.

III.3 PARAMETRES DES COMPARTIMENTS.

Nous venons de voir qu'un paramètre essentiel permettant de caractériser un compartiment est son coefficient de décroissance (α , β et k dans nos exemples).

Une variable d'état peut rester stable quantitativement si elle est en équilibre dynamique, c'est à dire que les entrées sont parfaitement égales aux sorties. C'est le cas de l'hypothèse admise pour le

compartiment I du modèle (1) et aussi des compartiments D et B si on est à l'équilibre.

Cette stabilité dynamique ne signifie pas une stabilité des molécules présentes mais leur disparition et renouvellement (turnover) d'autant plus rapide que leur flux de sortie lié au coefficient de décroissance est important. L'âge moyen des molécules d'un compartiment à un temps donné sera en relation avec son temps de résidence dans ce compartiment.

FRISSELL(1982) consacre un article à la définition des temps de résidence dans les modèles écologiques. Il distingue:

-Le temps de résidence dans les modèles de demi-vie. Dans l'exemple du modèle (5) pour un apport nul ($m=0$), la demi-vie des matières organiques peut s'exprimer par :

$$T_{1/2} = 0,693/k \quad (6)$$

correspondant au temps de vie moyen ou temps de résidence :

$$\tau = T_{1/2}/0,693 = 1/k \quad (7)$$

-Le temps de résidence dans les modèles d'état stable :

$$\tau = \frac{\text{quantité retenue}}{\text{quant. traversante}} \quad (8)$$

Dans l'exemple (5) ci-dessus, si $m=k[A]$ nous aurons :

$$\tau = [A]/k[A] = 1/k \quad (9)$$

Enfin, l'auteur indique comment calculer des temps de résidence moyens, des temps de résidence effectifs et des pseudo temps de résidence dans les équilibres écologiques complexes.

III.4 CAS DES MATIERES ORGANIQUES DES SOLS.

Plusieurs modèles à compartiments ont été proposés pour décrire la dynamique des matières organiques des sols sous l'effet des microorganismes. Ces modèles ne sont pas contradictoires mais leur complexité est limitée par le volume des données qui ont permis de les ajuster : mesures biochimiques, datations, etc.

Ainsi un modèle complexe n'infirmes pas la description apportée par un modèle plus simple mais permet l'interprétation de données plus diverses et augmente la précision.

La question suivante est donc posée : à partir de combien de compartiments disposera-t-on d'une précision suffisante pour les études prévisionnelles in situ ? Cette question est d'autant plus importante qu'une prévision en conditions naturelles doit prendre en compte d'autres facteurs que le seul effet des microorganismes simulé par les modèles.

Contrairement au modèle (1) où les contenus des compartiments D et B peuvent être mesurés à tout moment, les compartiments des matières organiques des sols correspondent très rarement à des fractions chimiques aussi aisément identifiables et mesurables. Les données physiques, chimiques ou biologiques conduisent cependant à leur affecter une cinétique de décroissance et à estimer les flux qui les traversent.

Nous ne citerons ci-dessous que les deux modèles entre lesquels nous situons nos propositions :

- Le modèle de HENIN et al.(1959) (HMT fig. 2) permet la distinction entre deux compartiments : matières organiques labiles (A) et matières humifiées plus stables (B) .

- Le modèle de JENKINSON et RAYNER(1977) (JR Fig 2) distingue 5 compartiments : fractions décomposables des végétaux (D), fractions résistantes des végétaux (R), biomasse microbienne (A), matière organique physiquement stabilisée (B) et matière organique chimiquement stabilisée (C).

Nous avons proposé (PANSU et SIDI, 1987) :

- Un modèle à deux compartiments (PS II fig. 2) prenant mieux en compte que celui de HENIN et al. deux réalités physiques :

- la possibilité d'incorporation des apports végétaux pour partie dans chacun des deux compartiments stable et instable.

- le renouvellement des matières organiques entre les deux compartiments.

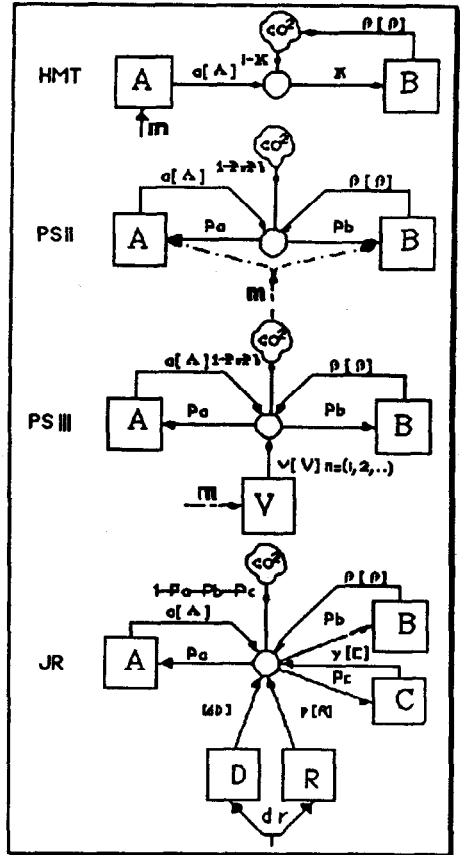
- Un modèle à trois compartiments plus précis que le précédent et qui constitue une simplification de celui de JENKINSON et RAYNER (PS III fig.2) :

- les deux compartiments fractions végétales D et R sont remplacés par un seul V dont l'ordre de la cinétique peut varier. Ce changement provient de nos observations concernant la cinétique de décroissance de matières organiques légères séparées par densimétrie. le compartiment A correspond chez nous à des matières organiques labiles aussi bien d'origine végétale que microbienne.

- le compartiment stable B correspond à des temps de résidence proches de celui de JENKINSON et RAYNER appelé "Physically stabilised organic matter". Pour des prévisions à court terme de l'ordre d'une centaine d'années notre modèle néglige le compartiment C introduit par JENKINSON et RAYNER pour expliquer l'âge important des matières organiques des sols dont le renouvellement est très faible.

Figure 2 : diagrammes relationnels comparatifs de modèles prévisionnels du stock organique des sols : HMT = HENIN, MONNIER et TURC (1959), PS II = PANSU et SIDI (1987) à deux compartiments, PS III = PANSU et SIDI (1987) à trois compartiments, J R = JENKINSON et RAYNER (1977). Les traits pointillés expriment une possible différence d'échelle de temps entre apports et décroissance.

- m apport végétal
 A matière organique labile (HMT? PS II). métabolites végétaux labiles + biomasse microbienne (PS III) (microbial) biomass (JR)
 B matière organique stable (HMT) (PS). physically stabilised organic matter (JR);
 V compartiment végétal non remanié (PSIII).
 D decomposable plant material (JR)
 C chemically stabilised organic matter (JR)
 $\alpha, \beta, \dots, \delta$ coefficients de décroissance respectifs de compartiments A,B,V,C,D,R.
 k coefficient isohumique (HMT).
 Pa, Pb, Pc proportion de renouvellement dans les compartiments A,B,C.
 d,r proportion d'entrée dans les compartiments D et R (JR).
 n ordre de la décroissance du compartiment V (PS III).



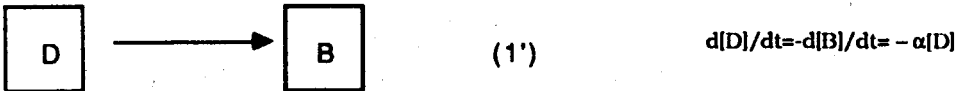
IV. TECHNIQUES DE RECHERCHE D'UN MODELE

Elle passe par de grandes étapes : émission d'une hypothèse correspondant à un diagramme relationnel, recherche des coefficients des équations différentielles correspondant à l'hypothèse, simulation numérique, validation et corrections.

IV.1 HYPOTHESES ET DIAGRAMME RELATIONNEL

Il s'agit de définir les variables d'état du système et les flux qui traversent ces variables afin de construire un diagramme relationnel selon les normes indiquées ci-dessus.

Cette construction nécessite d'intégrer le maximum d'observations sur le phénomène étudié. Si l'on ne dispose pas de travaux antérieurs, il faut alors émettre plusieurs hypothèses et les tester ensuite avec des données expérimentales afin d'en sélectionner une. Par exemple pour le modèle (1) on peut émettre l'hypothèse complémentaire d'une réaction irréversible de D en B soit :



Parmi toutes les variables d'état possibles, il faut sélectionner celles qui ont un effet limitant pour l'évolution du système.

Par exemple, dans les modèles que nous proposons pour les matières organiques des sols, les microorganismes n'interviennent pas sur la dynamique du système bien qu'ils soient les responsables de celle-ci. Ceci provient du fait que dans les sols, les microorganismes sont souvent excédentaires par rapport aux aliments dont ils disposent. Leur quantité n'est donc pas un facteur limitant et ils ne sont pris en compte dans nos modèles que dans leur rôle de stockage organique temporaire parmi les autres fractions labiles du compartiment A. Il en est de même dans le modèle de JENKINSON et RAYNER qui intitulent pourtant ce compartiment labile "biomasse microbienne".

IV.2 ESTIMATION DES COEFFICIENTS DE DÉCROISSANCE.

C'est la partie la plus délicate. Elle nécessite une collecte de données, au besoin par la mise en place d'expériences et peut faire appel à une large panoplie de calculs scientifiques.

Ce travail dépend de la complexité des hypothèses à vérifier :

- il peut s'agir de simples régressions linéaires comme dans le cas du modèle (1'), où l'intégration de l'équation de vitesse fournit :

$$D = D_0 \text{EXP}(-\alpha t) \quad (10)$$

signalons pourtant qu'il existe au moins deux manières de réaliser ce simple ajustement de mesures de D en fonction du temps :

- si l'on donne le même poids à chaque point:

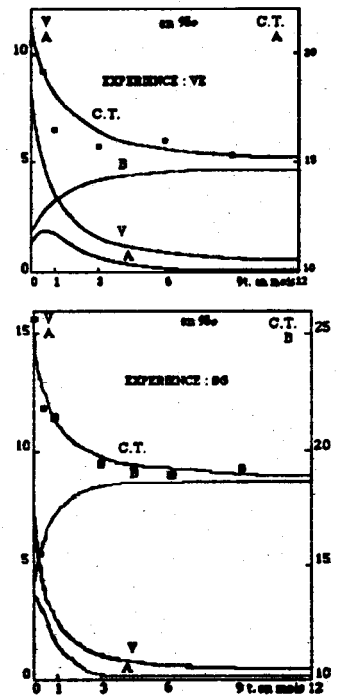
$$\text{LN}(D) = \text{LN}(D_0) - \alpha t \quad (11)$$

- si le point origine D0 est plus sûr :

$$\text{LN}(D/D_0) = -\alpha t \quad (12)$$

ce sont des ajustements du type de l'équation (12) que nous avons utilisé pour établir la cinétique du compartiment V de notre modèle (fig.3.III).

Figure 3 : Evolution simultanée des trois compartiments du modèle PS III (fig.II) et du carbone total dans deux expériences d'incubation de mélanges sols/pailles correspondant à des apports de 8,1°/oo de carbone.



-les régressions non linéaires représentent un outil plus puissant que nous avons utilisé pour valider le modèle I (fig.3). En effet, dans ce cas, l'intégration des équations de vitesse des compartiments A et B est possible et conduit à un modèle pour l'évolution du carbone total de la forme :

$$C = a \text{ EXP}(-\alpha t) + b \text{ EXP}(-\beta t) \quad (13)$$

de nombreux auteurs ont d'ailleurs utilisé des ajustements du type de l'équation (13) pour des courbes de décroissance de résidus végétaux dans les sols selon une démarche statistique et non déterministe. Nous

avons dressé un tableau comparatifs de différents résultats (PANSU et SIDI, 1987).

De tels ajustements peuvent être réalisés au moyen de logiciels existant dans le commerce (STATGRAPHICS, sté Uniware) ou plus spécialisés (CHEVILLOTTE et TOUMA, 1987). L'algorithme de calcul le plus employé demeure celui de MARQUARDT (1963).

Un ajustement non linéaire peut être également utilisé pour rechercher le modèle (1) si l'on dispose de mesures du seul compartiment D en fonction du temps. En effet, en exprimant la constance de la teneur totale par $Co=D+B$, l'intégration de l'équation (2) fournit :

$$D = \beta Co / (\alpha + \beta) + (Do - \beta Co / (\alpha + \beta)) e^{-(\alpha + \beta)t} \quad (14)$$

-Pour ajuster simultanément quatre paramètres concernant la décroissance de résidus végétaux dans les sols, JENKINSON et RAYNER ont utilisé la méthode du maximum de vraisemblance préconisée par ROSS (1974) pour l'ajustement des données écologiques.

-dans le cas d'un équilibre du type (1) nous avons utilisé la technique suivante, pour ajuster simultanément des mesures de D et B en fonction du temps. Il s'agit de trouver simultanément les coefficients de deux équations différentielles du type :

$$d[D]/dt = a[D] + b[B] \quad (2')$$

$$d[B]/dt = c[D] + d[B] \quad (3')$$

si V est la matrice à 2 lignes et n colonnes des vitesses expérimentales et T la matrice des teneurs correspondantes pour les temps (1,2,...,n), nous pourrions écrire tous les couples d'équation (2') et (3') selon l'équation matricielle :

$$|V| = |K| |T| \quad (15)$$

|K| étant la matrice des coefficients :

$$|K| = \begin{vmatrix} a & b \\ c & d \end{vmatrix} \quad (16)$$

On démontre que la solution est alors donnée par une équation du même type que celle des équations de régressions classiques (Mullon et Perrier, ORSTOM, com. pers. :

$$|K| = |VT^t| |TT^t|^{-1} \quad (17)$$

Si l'ensemble des données vérifie le modèle (1) les valeurs espérées pour les coefficients de (16) sont d'après les équations (2) et (3):

$$c = -a = \alpha \text{ et } b = -d = \beta \quad (18)$$

Nous avons programmé les calculs au moyen des routines de méthodes numériques TURBO PASCAL TOOLBOX. L'avantage de cette technique est qu'elle peut facilement être étendue à des modèles plus complexes avec un nombre plus important d'équations différentielles.

-Enfin, la simulation dynamique décrite ci-dessous constitue également un moyen d'affecter des valeurs plausibles aux coefficients de vitesse.

IV.3 SIMULATION DYNAMIQUE ET VALIDATION.

Il s'agit de trouver la solution à une valeur initiale d'un système d'équations différentielles ici du premier ordre.

Différents algorithmes d'intégration numérique d'équations différentielles peuvent être employés parmi lesquels le plus utilisé est celui de RUNGE-KUTTA.

Là aussi, il est possible d'utiliser soit des bibliothèques de calculs numériques du commerce comme TURBO PASCAL TOOLBOX, soit des logiciels spécialisés (G. PICHON, ORSTOM, com. pers.).

Un modèle sera validé par des données expérimentales si les valeurs d'une ou plusieurs variables d'état obtenue(s) pour les temps d'intégration correspondant à leur collecte sont en accord avec ces données.

Un modèle peut également être validé par des données équivalentes à la somme de variables d'état. C'est le cas de nos modèles fig.2, la mesure la plus aisée dans les sols étant celle du carbone total.

La simulation pendant 12 mois (fig. 3) de l'évolution simultanée des trois compartiments organiques de notre modèle PS III (Fig.2) est en accord avec les observations d'autres auteurs sur les matières organiques des sols.

Le maximum fourni par la simulation du compartiment labile A en début d'incubation permet d'expliquer d'autres données collectées lors de l'expérience qui a servi à établir ces modèles, comme un maximum observé simultanément sur les taux d'agrégats des sols. Cette simulation a donc d'autant plus de valeur qu'il n'est pas possible actuellement de fractionner chimiquement et de mesurer ce compartiment A.

V. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.

Les modèles à compartiments constituent une extension intéressante des lois plus faciles à vérifier des mécanismes réactionnels et de la cinétique chimique.

La différence essentielle réside dans le fait que les équilibres écologiques et biologiques sont trop complexes, pour mesurer précisément chaque constituant chimique. On doit regrouper en compartiments des ensembles de produits proches quant à leur cinétique de décomposition puis simuler l'évolution simultanée de tous ces compartiments.

Les modèles que nous avons proposés pour décrire la cinétique d'humidification et de minéralisation des mélanges sols, résidus végétaux ont été validés par nos expériences de laboratoire.

Leur transposition en conditions naturelles devrait être facilitée par:

- leur relative simplicité par rapport aux autres propositions
- la possibilité de simuler des apports à pas de temps variable

Pourtant, une telle transposition ouvre encore bien des voies de recherches et d'approches multidisciplinaires.

Elle concerne surtout la prise en compte des facteurs climatiques (VANVEEN et PAUL, 1981) mais aussi les phénomènes de transport convectif dans les sols et des facteurs moins directement reliables (évasion, faune des sols etc...).

Toutefois l'effet simulé par un modèle semble prépondérant dans la description de la dynamique des matières organiques dans les sols.

VI BIBLIOGRAPHIE

BALESDENT J., 1982 -Etude de la dynamique de l'humification de sols de prairies d'altitude (Haut-Jura) au moyen des datations ^{14}C des matières organiques. Thèse Docteur-Ingénieur, Univ. Nancy I, 90 p.

BOIFIN J. et FLEURY A., 1974 -Quelques conséquences agronomiques du retournement des prairies permanentes. *Ann. agron.* 25, 4, 555-573.

CHEVILLOTTE H. et TOUMA J., 1988 -Le logiciel OPTIM : optimisation d'ajustements non linéaires, ORSTOM, à paraître.

FERRARI J., 1982 -Basic techniques of dynamic simulation, in PENNING DE VRIES et VAN LAR ed., centre of agricultural publishing and documentation, Wageningen

FRISSEL M.J., 1981 -The definition of residence times in ecological models, *Ecol. Bull. (Stockolm)*, 33-49.

HENIN S. et DUPUIS M., 1945 -Essai de bilan de la matière organique du sol, *Ann. Agron.*, 15, 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.

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.

MARQUARDT D.W., 1963 -An algorithm for least squares estimation of non linear parameters, *J. of the society of industrial and applied mathematics*, 11, 2, 431-441.

PANSU M. et ELISSA N., 1988 -Evolution des solutions diluées de deltaméthrine en relation avec leur pouvoir insecticide, *Actualité chimique*, à paraître.

PANSU M. et SIDI H., 1987 -Cinétique d'humification et de minéralisation de mélanges sols-résidus végétaux, *Science du sol* 25, 4, 247-265.

ROSS G.J.S., 1974 -Fitting methods to ecological data, in CORSTEN and POLSTENICU ed., *Proc. 8th int. biometric conf.*, Constanza Romania.

RUZO L.O., HOLMSTEAD R.L. et CASIDA J.E., 1977 -pyrethroid phytochemistry : decamethrin, *J. of agric. food chem.*, 25, 6, 1385-1394.

VAN VEEN J.A. et PAUL E.A., 1981 -Organic carbon dynamic in glassland soils. 1 Background information and computer simulation, *Can. J. Soil Sci.* 61, 185-201.