

## RÉSIDUS DE RÉCOLTE ET TRANSFERTS D'AZOTE ET DE CARBONE ENTRE LA PLANTE ET LE SOL

J.C. MULLER  
INRA - Science du Sol  
Route de Montmirail  
Fagnières  
F 51000 CHALONS S/MARNE

### 1. RESULTATS ACQUIS ET PROBLEMES POSES.

Les transferts d'azote et de carbone entre la plante et le sol, par l'intermédiaire des résidus de récolte posent le problème du maintien de la fertilité d'un sol dans un système cultural à dominante de céréales, en fonction de l'utilisation de ces résidus : enfouissement ou enlèvement. Ils posent également la question des palliatifs techniques à mettre en oeuvre pour parer à une baisse éventuelle de fertilité.

Les études conduites en France depuis plusieurs décennies, sur la restitution ou non des pailles, ont permis d'acquérir un certain nombre de réponses sur les relations entre "Humus et Fertilité". Elles se rapportent essentiellement à :

- l'influence sur les rendements des cultures ;
- l'évolution des teneurs en carbone et azote ;
- l'évolution de certaines caractéristiques physiques de comportement du sol : compacité, portance,
- les effets liés à l'enfouissement de fortes quantités de pailles.

Par contre un besoin de connaissances plus approfondies apparaît comme prioritaire : - pour la conception de modèles prédictifs d'évolution du carbone et de l'azote des matières organiques libres ou liées, ou de labilités différentes permettant d'identifier des compartiments homogènes.

Pour une exploitation cinétique de ces modèles, les facteurs essentiels de la transformation des matières organiques dans le sol doivent être précisés. On retiendra :

- la nature des résidus
- la nature du sol
- les conditions édaphiques : température, humidité, aération...
- les interférences avec les fertilisants minéraux.

### 2. IMPORTANCE DES RESIDUS DE RECOLTE DANS LES PHENOMENES DE MINERALISATION ET REORGANISATION.

Le bilan organique des sols, qui résulte de l'enfouissement des résidus des cultures, devrait normalement pouvoir être établi par différence entre les "entrées" et les "sorties". Si les "entrées" sont faciles à connaître, il en va généralement tout autrement des "sorties". On se contente le plus souvent de constater les variations du bilan, ce qui permet, les "entrées" étant connues, d'en déduire les "sorties".

Dans le tableau 1 sont données les quantités de carbone et d'azote introduites par les principales cultures des régions céréalières, pour un rendement moyen.

### 3. QUANTIFICATION DES FLUX DE CARBONE ET D'AZOTE.

#### 3.1. Evolution du carbone et de l'azote des résidus après incorporation dans le sol. Données expérimentales.

Dans une expérience en incubation (MULLER et REMY, 1980) nous avons apprécié la production d'hydrosolubles jusqu'à 24 semaines. Elle permet d'estimer le sens d'évolution des phénomènes. En effet on peut distinguer :

1°/ - la production de carbone hydrosoluble à partir de la matière organique du sol (tableau 2) ;

2°/ - la production d'hydrosolubles à partir des pailles.

Dans le premier cas la production à partir de la matière organique diminue légèrement en fonction du temps pour se stabiliser à des valeurs voisines de 150  $\mu$ g de C par gramme de sol à 2°C et 90,  $\mu$ g à 10° en sol calcaire, et 40  $\mu$ g/g de sol à 2° et 10°C en sol de limon.

Pour le second cas, la production à partir des pailles de la quantité de carbone hydrosoluble libérée est beaucoup plus faible, environ 0,3 à 0,6 % du carbone de la paille. Cette quantité diminue rapidement au cours du temps et la présence d'azote minéral semble activer cette disparition.

La cinétique de dégagement du dioxyde de carbone peut être appréciée par différence entre l'essai (sol + paille) et le témoin (sol).

Le dégagement du CO<sub>2</sub> en fonction du temps ne s'ajuste pas à une loi de décomposition faisant appel à un compartiment unique. Pour des durées d'incubation inférieures à 50 jours, il est intense ; à partir du 84<sup>e</sup> jour il se ralentit considérablement. Si l'on se rappelle que c'est pendant cette première partie de l'incubation que le carbone hydrosoluble est présent en quantité appréciable, on peut supposer qu'il contribue pour une large part au dégagement du CO<sub>2</sub> : Les parcelles de maïs, produisant davantage d'hydrosolubles que les pailles de blé, dégagent davantage de dioxyde de carbone.

Au bout d'une année à 28° environ 70 % du carbone de la paille est minéralisée sous forme de CO<sub>2</sub>. A 10 degrés cette quantité diminue à 30 % et à 2°C elle est réduite à 20 %.

L'évolution de l'azote minéral après incorporation de résidus de culture est bien connue. Les figures 1 et 2 donnent l'évolution de l'azote minéral après incorporation de paille de blé, de maïs et de verts de betterave. Elles mettent nettement en évidence la succession des deux phases : immobilisation dominante et minéralisation dominante dont l'ampleur varie avec la composition du végétal. La composition en substances carbonées solubles (protéines, hémicellulose, celluloses) et insolubles (lignine) permet de prévoir la dynamique du carbone et de l'azote dans ses grandes lignes.

### 3.2. Modèles prédictifs de l'évolution du carbone et de l'azote du sol.

On peut distinguer trois types de modèles pour décrire l'évolution de l'azote et du carbone du sol :

- Le modèle comptable de MOREL (fig. 3) qui décrit de manière statique la répartition de l'azote minéralisé et de l'azote réorganisé à partir des intrants en azote : apport d'azote minéral et apports d'azote organique au sol. Ce modèle a été surtout utilisé pour analyser les essais de longue durée des DEHERAIN à GRIGNON.

- Le modèle de HENIN et DUPUIS, qui est le plus couramment utilisé en France, car il fait appel à un nombre minimum de paramètres : le carbone organique total (de la matière organique liée, ou de la matière organique totale) qui est souvent la seule mesure disponible sur de nombreux essais.

L'analyse critique de ce modèle faite par CHADOEUF, dans les hypothèses d'apports annuels constants ou variables, met en évidence les conséquences sur les valeurs des coefficients  $k_2$  (coefficient de minéralisation de l'"humus") et  $k_1$  (coefficient de transformation en "humus" de la matière organique des résidus). Il en ressort que le coefficient  $k_2$  est influencé par le climat, alors que le coefficient  $k_1$  est sous la dépendance de la nature des résidus et des conditions de milieu.

Les tableaux 3 et 4 donnent la définition du modèle et un exemple d'application à l'essai de longue durée, "travail du sol" de l'I.T.C.F. à BOIGNEVILLE.

- Les modèles dynamiques, dont les plus connus sont ceux de JENKINSON et REYNER (1977) et ceux de PAUL et VAN VEEN (1978) introduisent la notion d'analyse compartimentale, et distinguent un certain nombre de fractions dans la matière organique du sol et notamment un compartiment Biomasse microbienne. Ils semblent d'une utilisation prometteuse.

L'utilisation conjointe des techniques de fractionnement par voie physique (méthode de BRUCKER) et des isotopes naturels et/ou artificiels doit permettre de définir les caractéristiques de compartiments homogènes, nécessaires au fonctionnement de ces modèles.

Les modèles de JENKINSON, qui ne font pas appel à des échanges entre compartiments et le modèle de PAUL, qui lui les prend en compte sont donnés dans les figures 4 et 5.

### 4. UTILISATION DES ISOTOPES NATURELS ET ARTIFICIELS DANS L'ANALYSE COMPARTIMENTALE DES TRANSFORMATIONS DES MATIERES ORGANIQUES DES SOLS.

L'utilisation des isotopes naturels et artificiels qui apparaît comme un moyen efficace pour définir des compartiments homogènes et le temps moyen de résidence (ou âge moyen d'une population) des matières organiques dans le sol est un paramètre de première importance dans l'étude des mécanismes fondamentaux de la minéralisation et de l'humification des résidus organiques apportés au sol.

BALESDENT ET GUILLET (1982) ont montré l'importance des hypothèses faites sur les lois de mélange, dans les modèles dynamiques du carbone organique total du sol et leur importance sur la loi de distribution des âges. Les courbes de la figure 5 donnent la correspondance entre l'activité  $^{14}\text{C}$  et l'âge moyen de compartiments fonctionnant suivant l'hypothèse de mélange parfait. L'utilisation du  $^{14}\text{C}$  d'origine thermonucléaire comme traceur, permet d'atteindre des âges compris entre la centaine et le millier d'années. Pour des périodes plus courtes, inférieures

à 100 ans, la composition isotopique en  $^{13}\text{C}$  des végétaux en  $\text{C}_3$  et  $\text{C}_4$  semble donner des résultats prometteurs (MARIOTTI communication personnelle). Rappelons que le  $\delta^{13}\text{C}$  des végétaux en  $\text{C}_4$  est voisin de -12 et que celui des végétaux en  $\text{C}_3$  est de l'ordre de -25. La rupture d'une monoculture en maïs, ou l'introduction de cette plante dans une succession de plantes en  $\text{C}_3$  (la majorité des plantes cultivées des zones tempérées) peut fournir des informations sur l'évolution des compartiments stables ou labiles de la matière organique.

Le marquage  $^{15}\text{N}$  de l'azote organique de la matière organique permet également d'accéder à la dimension de compartiments de la matière organique, de suivre les transferts d'azote entre les formes minérales et organiques. Les résultats de GUIRAUD (fig. 6) sur la distinction entre minéralisation nette et minéralisation brute sont particulièrement clairs à cet égard. Cette technique de marquage nous a permis (DENYS, MULLER et PIERRE, travail en cours) de mettre en relation l'influence du type de sol sur le turn-over de l'azote et de suivre l'incorporation de l'azote dans les micro-agrégats stables inférieurs à  $50\ \mu\text{m}$  (fig. 7).

L'ensemble de ces données devrait permettre de mieux comprendre le devenir de l'azote non utilisé par la plante.

#### 4. PERSPECTIVES NOUVELLES SUR L'EVOLUTION DES MATIERES ORGANIQUES EN RELATION AVEC LA MINERALISATION - REORGANISATION DE L'AZOTE.

Le temps de résidence des matières organiques dans les sols est un paramètre de première importance dans l'étude des mécanismes fondamentaux de la minéralisation et de l'humification des matières organiques apportées aux sols (BALESDENT et GUILLET, 1982).

L'hypothèse simplificatrice, qui considère la matière organique du sol comme un mélange, formé principalement de matière organique jeune à turn-over court et de matière organique ancienne à cycle très long, stable à l'échelle agronomique est nécessaire mais non utopique.

Cette hypothèse, montre l'intérêt du fractionnement des matières organiques et de la recherche de compartiments homogènes pour identifier et caractériser :

1° - Les matières organiques anciennes et l'"âge des sols".

2° - Les matières organiques jeunes, ou matières organiques actives, localisées en surface, labiles, génétiquement et structuralement proches des matériels végétaux microbiens subissant un recyclage intense et jouant un rôle essentiel comme source d'éléments minéraux nutritifs pour la plante.

Les études récentes montrent le rôle essentiel joué par la biomasse microbienne dans la dynamique des matières organiques des sols.

La chimie traditionnelle de l'humus qui repose sur des méthodes de fractionnement et de purification des acides fulviques et humiques, et qui cherche à les caractériser par des moyens purement chimiques semble incapable dans le cadre des concepts actuels, de rendre compte de l'évolution dynamique des matières organiques dans le sol.

Dans ces concepts actuels quatre fractions ont une importance biologique particulière (fig. 8) : 1°/ la biomasse microbienne vivante ; 2°/ les structures physico-chimiques récentes des organismes végétaux ou animaux morts dont la demi-vie est de l'ordre de 150 jours (MULLER et BALLIF, 1981) ; 3°/ - Les matières organiques stabilisées d'une demi-vie d'environ 30 ans (PAUL et JUMA, 1981) ; les matières organiques stabilisées dont la demi-vie est de l'ordre de 200 à 800 ans (STEVENSON, 1982).

La première démarche est de trouver des méthodes biochimiques d'appréciation de la biomasse microbienne du sol. Un certain nombre de travaux sont engagés actuellement dans cette voie. Il est ensuite nécessaire de caractériser et de fractionner la matière organique morte afin de préciser ses relations avec la biomasse microbienne. La fraction active de la matière organique morte semble particulièrement importante à étudier. En effet cette fraction est en relation étroite avec la biomasse microbienne, servant de réservoir d'énergie et recevant ses sorties organiques : produits du métabolisme et organismes morts.

Les conséquences que l'on peut en attendre sur la gestion de l'azote en relation avec les pratiques culturales et la protection de l'environnement sont évidentes.

La gestion efficace de l'azote ne peut être assurée que grâce à une maîtrise de plus en plus grande du cycle de l'azote. A l'aide des modèles informatisés on peut espérer à court terme une information en temps réel sur la minéralisation, l'immobilisation, la nitrification, la dénitrification et la fixation biologique, fournissant ainsi une estimation précise sur les quantités d'azote disponible. Ils sera alors possible de réduire les pertes par lessivage, et d'utiliser au mieux les possibilités de stockage de l'azote ou de dénitrification pour protéger l'environnement et alimenter les plantes en fonction de leurs besoins.

---

BIBLIOGRAPHIE

---

- BALESSENT J. et GUILLET B., 1982. Les datations par le  $^{14}\text{C}$  des matières organiques des sols. Contribution à l'étude de l'humification et du renouvellement des substances humiques.
- CHADOEUF et col., 1984. Modélisation de l'évolution des matières organiques du sol. In "analyse des contraintes agronomiques liées à l'utilisation des pailles comme source d'énergie. Rapport final du contrat I.N.R.A.-C.E.E. n° E.S.E.-R-014 F.
- COURPRON C. & JUSTE C., 1975. Influence de l'incorporation de certaines formes de matières organiques sur le pouvoir chlorosant d'un sol calcaire. Ann. Agron. 26 (2) 215-227.
- DELPHIN J.E. et CONESA A. Ph., 1979. Evolution de la matière organique du sol d'un essai rotation, irrigation, restitution des pailles dans la plaine de la Hardt. I - Etat des réserves organiques. Ann. Agro. 30 (2) 167-178.
- DELPHIN J.E. et CONESA A. Ph., 1979. Evolution de la matière organique du sol d'un essai rotations, irrigation, restitution des pailles dans la plaine de la Hardt. II - Bilan humique. Ann. Agro. 30 (2) 179-189.
- DUTIL P., MULLER J.C. et BALLIF J.L., 1980. Paille et Energie. Données actuelles sur le problème de l'enlèvement des pailles en Champagne crayeuse. Trvx. Station Science du Sol de CHALONS-SUR-MARNE. Public. n° 76.
- GACHON L., 1975. Participation des légumineuses au bilan de l'azote en sol argilo-calcaire de Limagne (2) 89-101.
- GUIRAUD G. et FARDEAU J.C., 1977. Organisation et minéralisation de l'azote dans le sol. Etude au moyen de l'azote quinze. Ann. Agron. 28 (4) - 361-378.
- GUIRAUD G. et MAROL Ch., 1982. Utilisation de l'azote  $^{15}\text{N}$  en Science du Sol. Application à l'étude de transferts d'azote entre les formes minérales et organiques d'un sol calcaire. Science du Sol (2) - 125-144.
- HETIER J.M. et col., 1980. Culture de maïs en milieu contrôlé : Analyse des bilans d'azote et de carbone par  $^{15}\text{N}$  et  $^{14}\text{C}$ . Science du Sol (2) 127-140.
- JACQUIN F., HAIDOUTI C. et MULLER J.C., 1980. Dynamique de la matière organique en sols carbonatés cultivés. Science du Sol (1) 27-36.
- JENKINSON D.S. and RAYNER J.H., 1977. The turnover of soil organic matter in some of the rothamsted classical experiments. Soil Science 123 (5) 298-305.
- JOCTEUR-MONROZIER L. et ANDREUX F., 1981. L'azote organique des sols. Exemples de quantification des formes protéïques et des combinaisons complexes. Science du Sol (3) 219-242.
- JUSTE et col., 1980. Protection des sols en régime d'exportation maximale. Action C.E.E. "Paille-Energie solaire" - Contrat XII/698/76 F.
- LESPINAT P.A. et col., 1976. Utilisation de maïs mûr uniformément marqué au  $^{14}\text{C}$  pour l'étude de la matière organique de trois sols (Andosol, sol brun, sol ferrallithique). Science du Sol (1). 53-65.

- MARIOTTI A., MULLER J.C., GUILLEROT J. et MARNE E., 1980. Variations de la composition isotopique naturelle ( $^{15}\text{N}$ ) de l'azote minéral de sols carbonatés suivies en incubation et au champ. *Science du Sol* (2) 141-159.
- MARIOTTI A. et MULLER J.C., 1981. Abondance isotopique naturelle de l'azote minéral apparu en incubation et au champ, sur l'exemple de la rendzine sur craie. Colloque "Humus - Azote" 7-10 juillet - REIMS p. 167-173.
- MARTEL Y.A. and PAUL E.A., 1974. The use of radiocarbene dating of organic matter in the study of soil genesis. *Soil Sc. Soc. Amer. Proc.* 38, 501-506.
- MARY B. et REMY J.C., 1979. Essai d'appréciation de la capacité de minéralisation de l'azote des sols de grande culture.  
I - Signification des cinétiques de minéralisation de la matière organique humifiée. *Ann. Agro.* 30 (6). 513-527.
- MOREL M.R., 1977. Quelques aspects de la dynamique de l'azote dans le sol. *C.R. Acad. Agric. de France* 11, 687-697.
- MOREL R., 1978. Quelques aspects de la dynamique de carbone et de l'azote dans le sol. *Ann. Agron.* 29 (4) 357-379.
- MOREL R., 1984. Essai d'évaluation de l'organisation et de la réorganisation de l'azote minéral du sol par la méthode des modèles compartimentaux.  
II. Cas d'un sol cultivé : relations sol végétal. *Agronomie* 4 (3) 295-303.
- MULLER J.C., 1966. Observation sur les effets à long terme des fumures organiques et minérales sous climat méditerranéen. II. Action sur le bilan de l'azote total du sol. *Ann. Agron.* 17 (1) 21-36.
- MULLER J.C., 1974. Arrière effet du précédent cultural sur le reliquat d'azote minéral à la sortie de l'hiver : cas du maïs-grain. *C.R. Acad. Agric. de France.* 60 (11). 850-856.
- MULLER J.C. et BRUN F., 1975. Action de la paille enfouie et de la paille mise en couverture sur l'évolution de l'azote et des composés humiques d'un sol calcaire méditerranéen. *Agrochimica* 19 (3-4). 287-296.
- MULLER J.C. et VEDY J.C., 1978. Morphoscopie et fractionnement des matières organiques des rendzines sur craie. *Science du Sol* (2). 129-144.
- MULLER J.C., 1981. Devenir de l'azote non utilisé par la plante.  
FORUM du COMIFER 21-22 janvier - PARIS. ACTA Ed., 1984 p. 48-63.
- MULLER J.C. et MARY B., 1981. Influence des résidus de culture sur la réorganisation de l'azote minéral. *C.R. Acad. Agric. de France*, p. 888-902.
- MULLER J.C. et BALLIF J.L., 1981. Azote minéral en sol de craie.  
II. Bilan en lysimètres. Colloque "Humus-Azote" 7-10 juillet.  
REIMS p. 297-303.
- MULLER J.C. et REMY J.C., 1981. Effet de l'azote minéral sur le cinétique de décomposition des pailles. Colloque "Humus-Azote" 7-10 juillet - REIMS, p. 351-361.
- MULLER J.C., 1984. Lutte contre l'excès des nitrates, stockage dans le sol.  
Colloque A.I.D.E.C. "La pollution par les nitrates - Quels responsables ?"  
23-24 Octobre - DIJON.

- TABLEAU 1 -

QUANTITES DE CARBONE ET D'AZOTE  
INTRODUITES DANS LE SOL, POUR  
UN RENDEMENT MOYEN  
( d'après DALLIF 1983 )

Culture	Résidus enfouis	Rend. t. ha <sup>-1</sup>	M.S. C N		
			← kg. ha <sup>-1</sup> →		
BLE	feuille	7.0	2200	3400	47
ESCORBON	id	7.0	7100	3000	27
SEIGLE	id	5.1	8000	3400	78
ORGE	id	4.1	4700	2000	30
AVOINE	id	5.3	6900	2900	45
MÂIS	id	9.0	7350	3000	37
BET. SUCR.	feuilles	52.1	4170	1700	95
P. d. T	fanés	47.2	2100	875	40
CHANVRE	feuilles	9.0	3600	1500	109
COLZA HIVER	tiges+feuilles	2.0	5100	2100	56
TOURNEBOL	id	3.6	8400	3500	86
POU	id	3.5	4800	2000	52
MOUTARDE	id	2.7	2500	1040	83
RADIS	id	3.3	3000	1300	93



Tableau 2

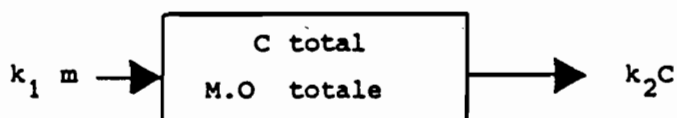
TRAITEMENTS <i>Agro minéral appliqué</i>	SOL DE CRAIE						SOL DE LIMON					
	BLE			MAIS			BLE			MAIS		
	0	30	100	0	30	100	0	30	100	0	30	100
température : 0 - 2°C												
0 semaine	57	75	67	43	63	149	61	31	37	137	93	81
3 "	43	0	6	31	12	43	0	0	18	25	25	0
12 "	18	0	7	55	0	31	12	12	6	12	6	12
24 "	0	0	0	0	0	0	6	13	0	13	6	6
température : 10°C												
0	24	25	13	6	6	43	0	19	19	18	57	124
3	49	49	43	30	69	37	0	13	7	24	13	7
12	0	0	0	0	12	0	6	0	6	6	0	12
24	0	0	6	0	0	0	6	0	6	6	0	12

Tableau 1 : Production de carbone hydrosoluble à partir de pailles  
(g/g de sol) pour trois doses (0,30 et 100) d'azote

Tableau 3

21 - Définition du modèle de HENIN-DUPUIS

C'est un modèle à un compartiment (carbone total) qui fait le bilan des entrées-sorties sur un pas de temps donné. Il présente l'intérêt de n'utiliser que le carbone total qui est souvent la seule mesure effectuée sur de nombreux essais.



m = apport annuel de résidus de récoltes

k<sub>1</sub> = coefficient de transformation en M.O des résidus

k<sub>2</sub> = coefficient de minéralisation

$$\text{alors } \Delta C = k_1 m - k_2 C \quad (1)$$

22 - Intégration du modèle

a/ - Les apports annuels sont constants

Si l'intervalle d'intégration est grand devant le pas de temps de mesure, on passe à la limite en

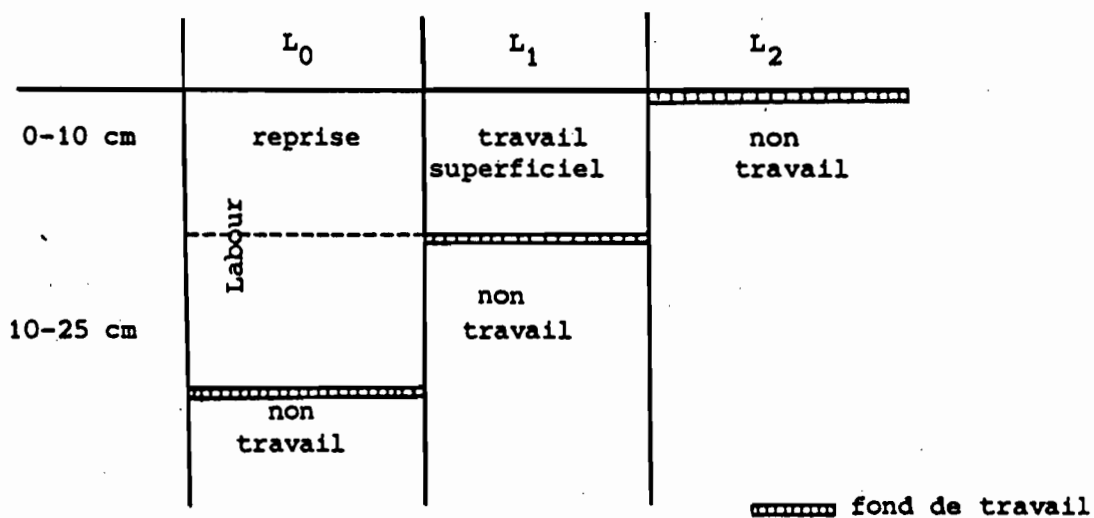
$$\frac{dC}{dt} = k_1 m - k_2 C$$
$$\text{d'où } C = \left( C_0 - \frac{k_1 m}{k_2} \right) e^{-k_2 t} + \frac{k_1 m}{k_2} \quad (2)$$

Plus l'intervalle d'intégration est grand, plus la variabilité intra-annuelle peut être négligée, donnant ainsi à k<sub>1</sub> et k<sub>2</sub> un sens de coefficients moyens annuels.

Tableau 4

ESSAI TRAVAIL DU SOL

I.T.C.F. - BOIGNEVILLE

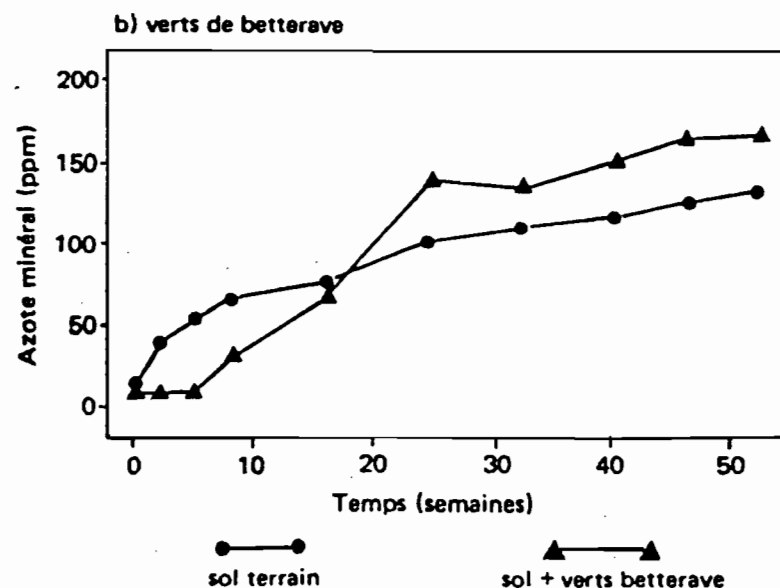
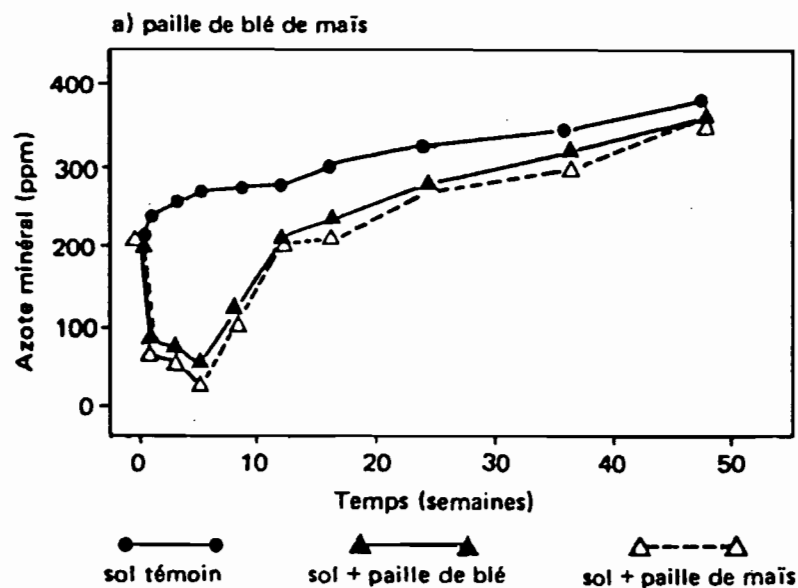


CONSEQUENCES PROBABLES DE L'EXPORTATION DES PAILLES

En tonnes de Carbone/ha	Années	L <sub>0</sub>	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>
		1980	34.96	37.44
avec restitution	1990	34.44	38.82	46.04
	2000	33.98	40.00	49.66
sans restitution	1990	31.47	34.31	39.22
	2000	28.47	31.62	36.96

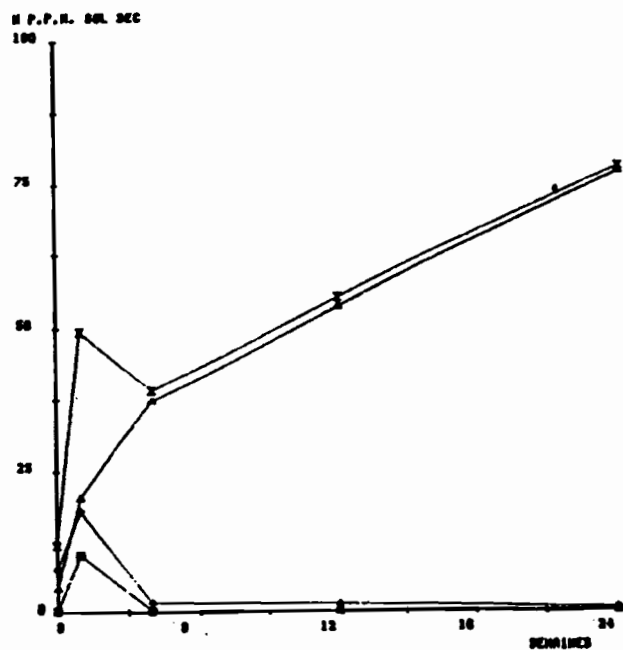
- Fig. 1 -

FIGURE 5 : Evolution de l'azote minéral après apport de résidus de récolte  
(température d'incubation : 25°C) (Muller et Mary 1981)

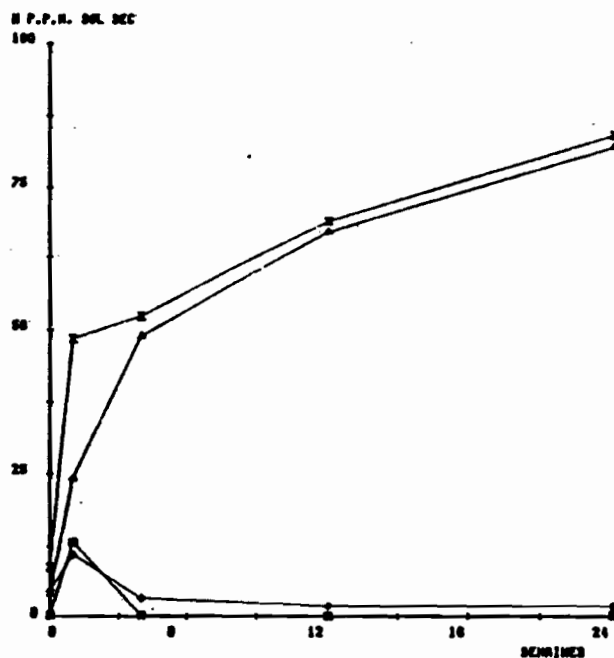


- Fig 2 -

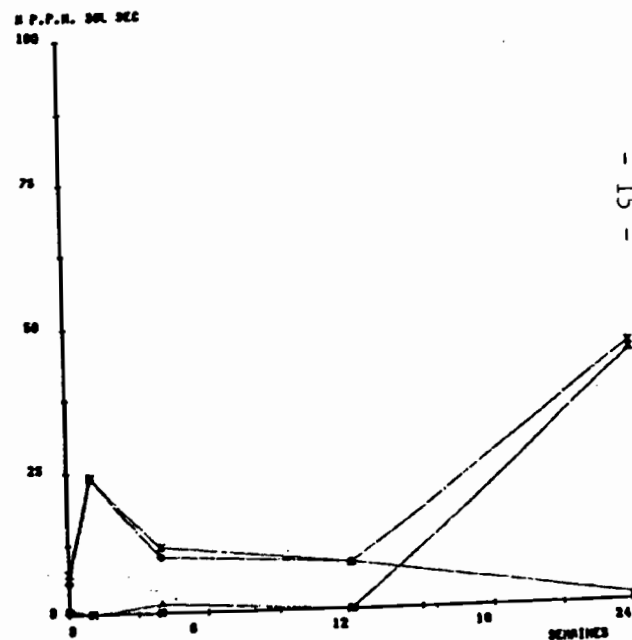
Sol + racine  
N-MIN LIMON MAIS RACINE



Sol  
N-MIN LIMON TENDIN



Sol + paille  
N-MIN LIMON MAIS PAILLE



X N-MIN  
▲ N-NO3  
◆ N-NO2  
■ N-NH4

Fig. 2. Cinétique de minéralisation de l'azote organique. Exemple du limon

- Fig - 3  
MODELE COMPTABLE DE NDAEL

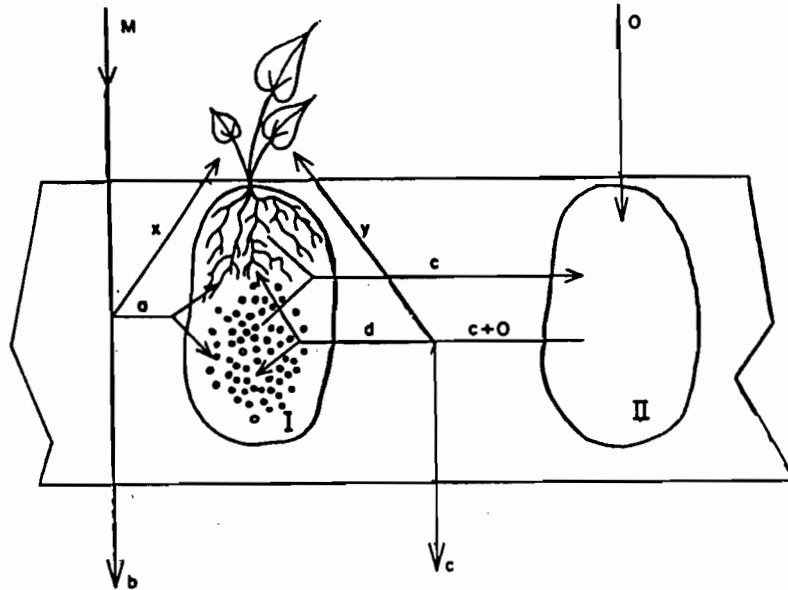


FIG. 1.

$a$  : fraction de  $M$  organisée par les racines et les micro-organismes ;  $b$  : fraction de  $M$  perdue (drainage, dénitrification) ;  $c$  : azote des racines et des micro-organismes morts ;  $d$  : fraction de l'azote minéralisé ( $C + O$ ) réorganisée par les racines et les micro-organismes ;  $e$  : fraction de l'azote minéralisé perdue (drainage, dénitrification).

$M$  = apports d'azote minéral du sol

$O$  = " " " " organique "

$N$  = quantité d'azote organique de la fraction non vivante du sol

- taux réel annuel de minéralisation  $\alpha = \frac{c+O}{N}$

- taux annuel de réorganisation  $\beta = \frac{d}{N}$

- taux net annuel de minéralisation  $\gamma = \alpha - \beta$

- proportion d'azote minéral qui se réorganise dans les racines et les microorganismes  $\omega = \frac{\beta}{\alpha}$

- Fig-4 -

MODELE DE:

D. S. JENKINSON AND J. H. RAYNER

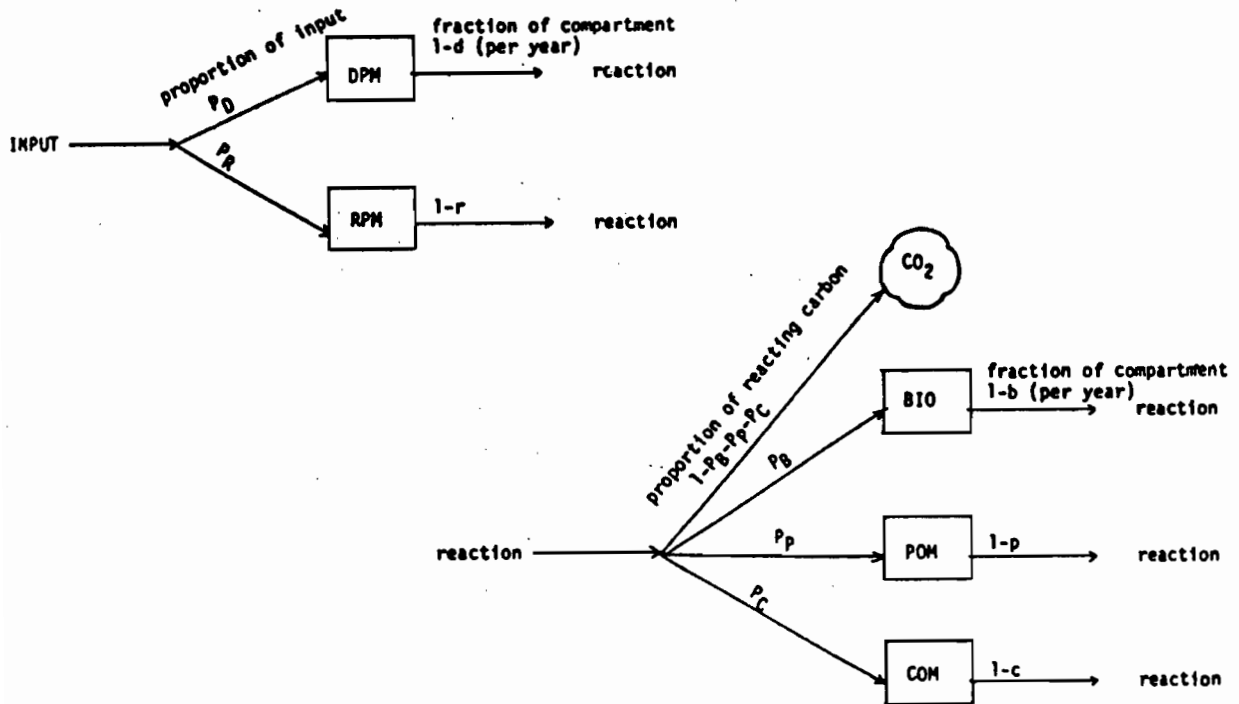
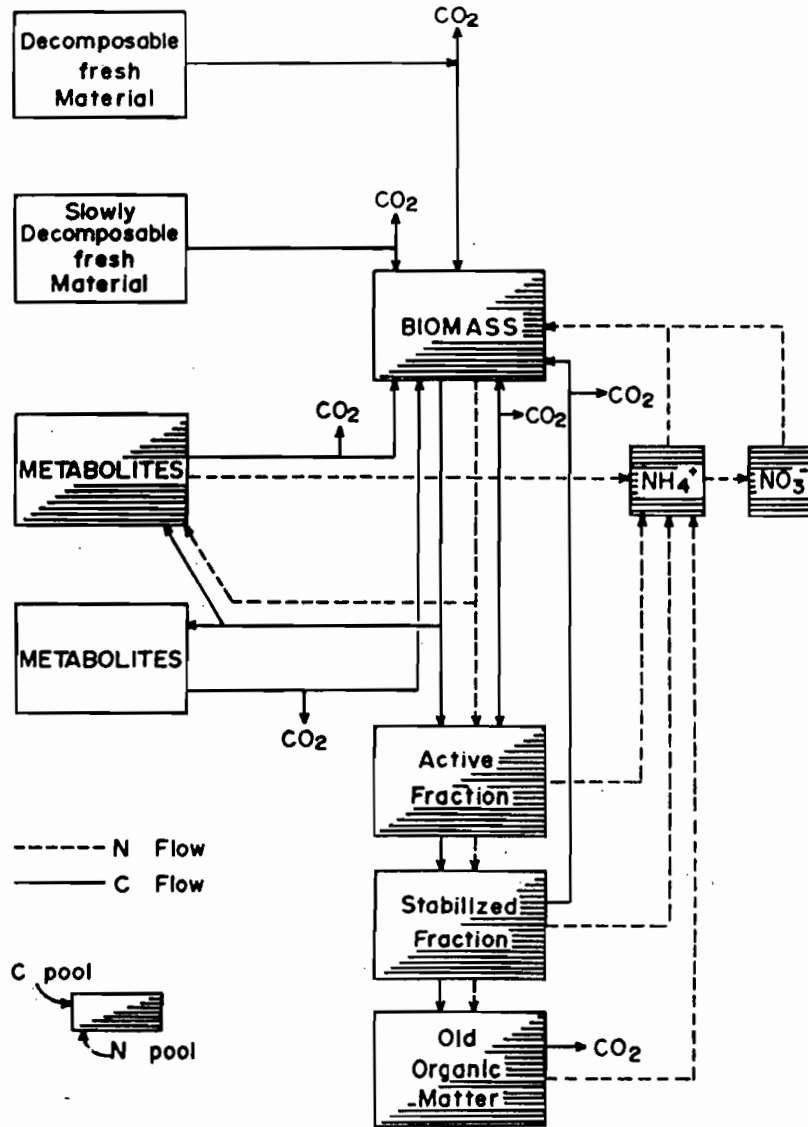


FIG. 6. Flow of C through model from unitary input of plant C into the 0-23 cm layer of soil.

- Fig. 5 -



MODELE DE PAUL ET VAN VEEN. 1978

JUMANG & PAUL, E.A. 1980



- FIG. 5 -

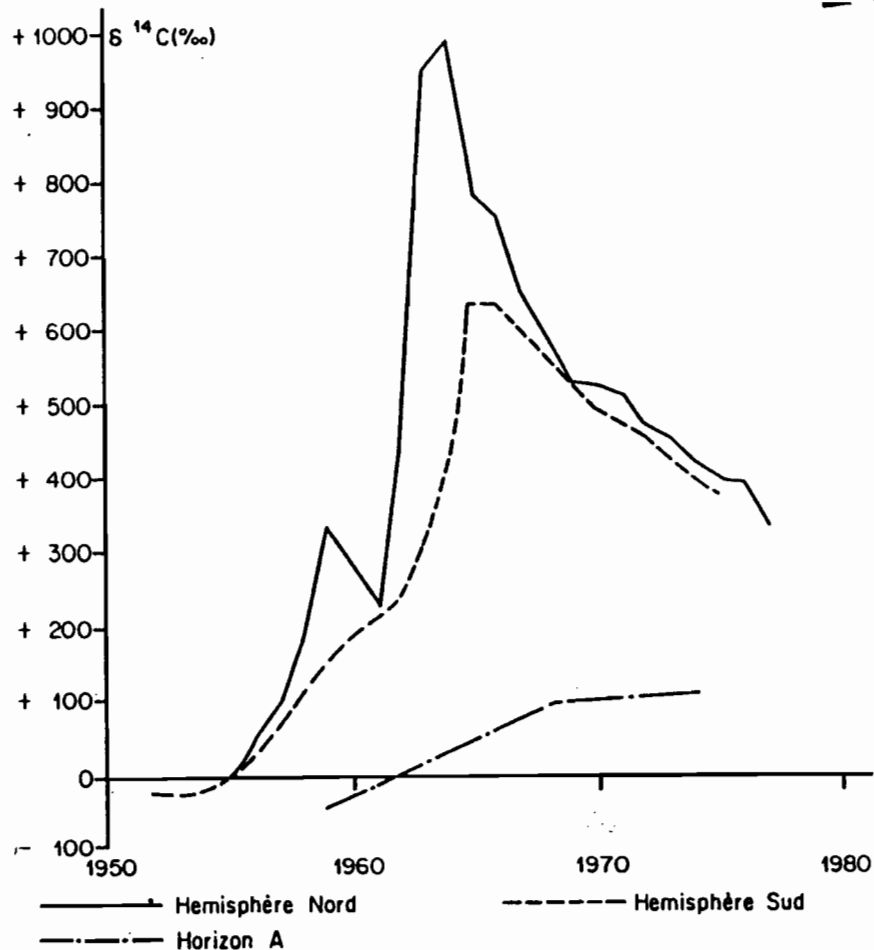


FIGURE I. — Activité  $^{14}\text{C}$  du  $\text{CO}_2$  atmosphérique depuis 1950, dans l'hémisphère Nord (d'après PAUL et VAN VEEN, 1978) et Sud (d'après O'BRIEN et STOUT, 1978)

Variations since 1950 of the atmospheric  $^{14}\text{C}$  concentration in the northern hemisphere (after PAUL and VAN VEEN, 1978), of the atmospheric and soil A, horizons  $^{14}\text{C}$  concentration in the southern hemisphere (after O'BRIEN and STOUT, 1978)

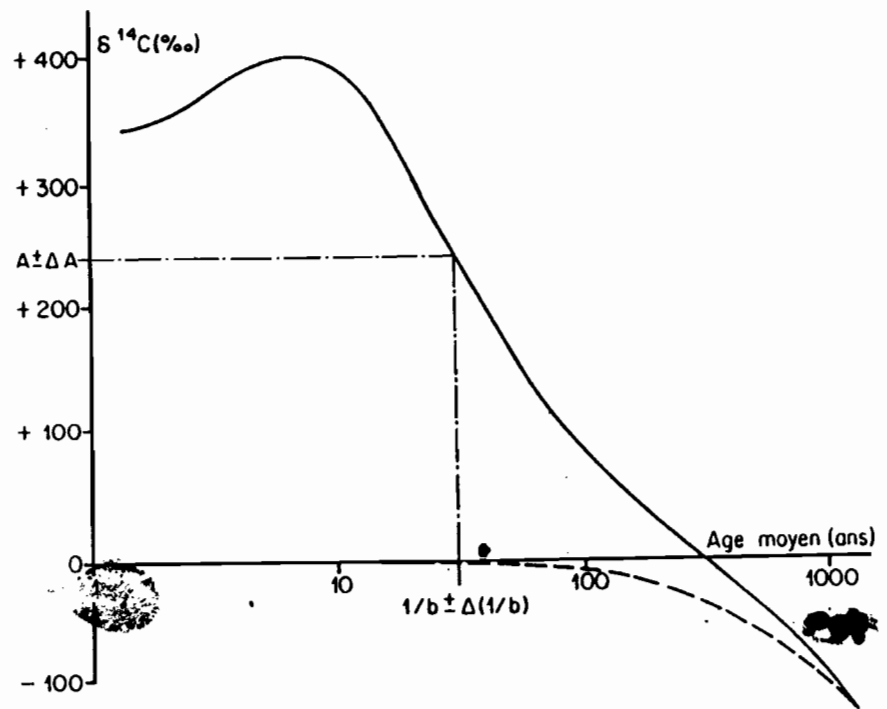


FIGURE IV. — Courbe de correspondance entre l'activité  $^{14}\text{C}$  et l'âge moyen de compartiments fonctionnant suivant l'hypothèse du mélange parfait, pour 1980, dans l'hémisphère Nord

En pointillés, correspondance avant les essais thermonucléaires  
Relationship between  $^{14}\text{C}$  concentration and mean age of «well mixed» compartments (calculated for 1980, in the northern hemisphere). The dotted line represents relationship before nuclear tests

- Fig. 6 -

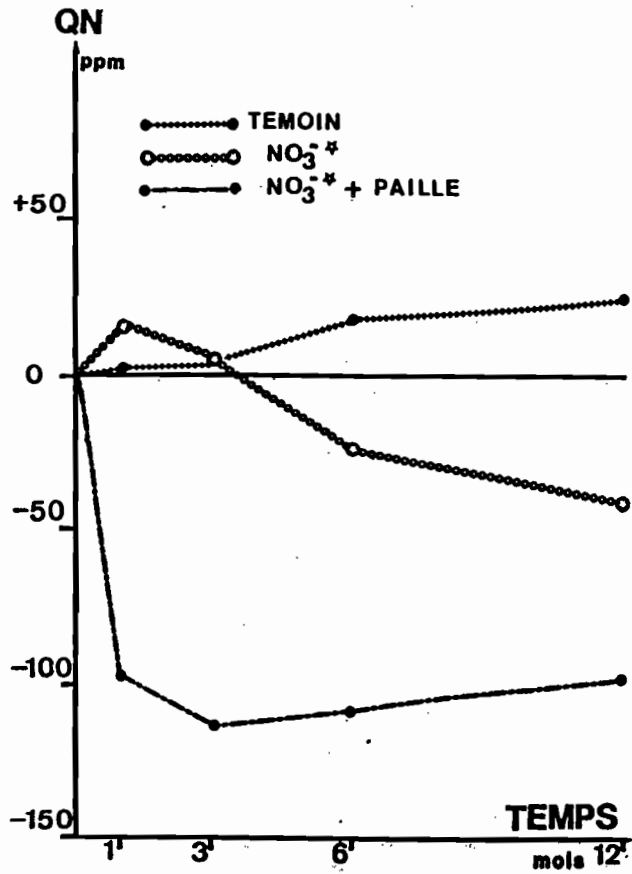


FIGURE I. — Minéralisation nette (en ppm)  
Net mineralization

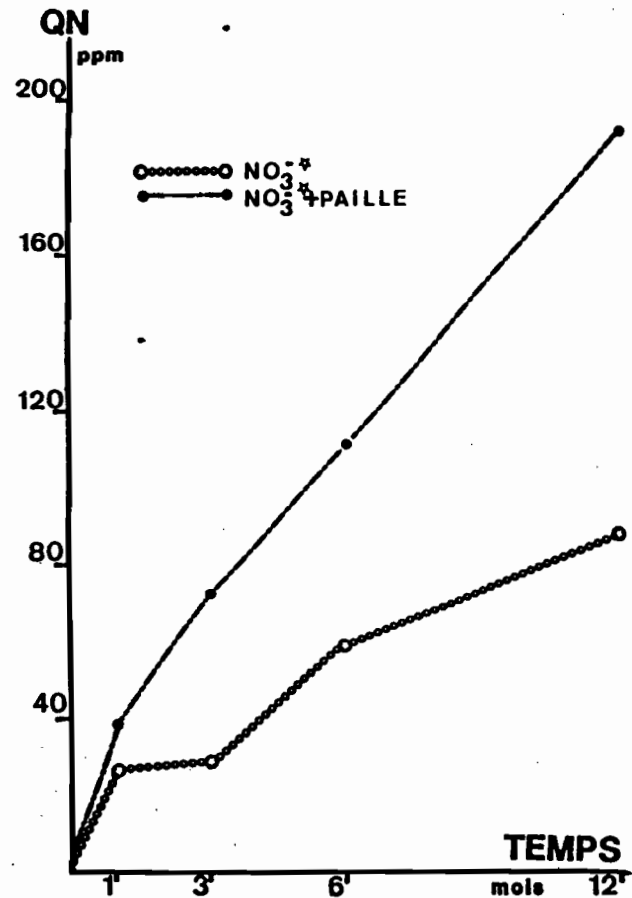


FIGURE II. — Minéralisation brute calculée par la formule de dilution isotopique (en ppm)  
Gross mineralization by isotopic dilution

-Minéralisation nette et brute  
INCUBATION EN PRESENCE DE NITRATE MARQUE (GIRAUD et al. 1982)

- Fig. 7 -

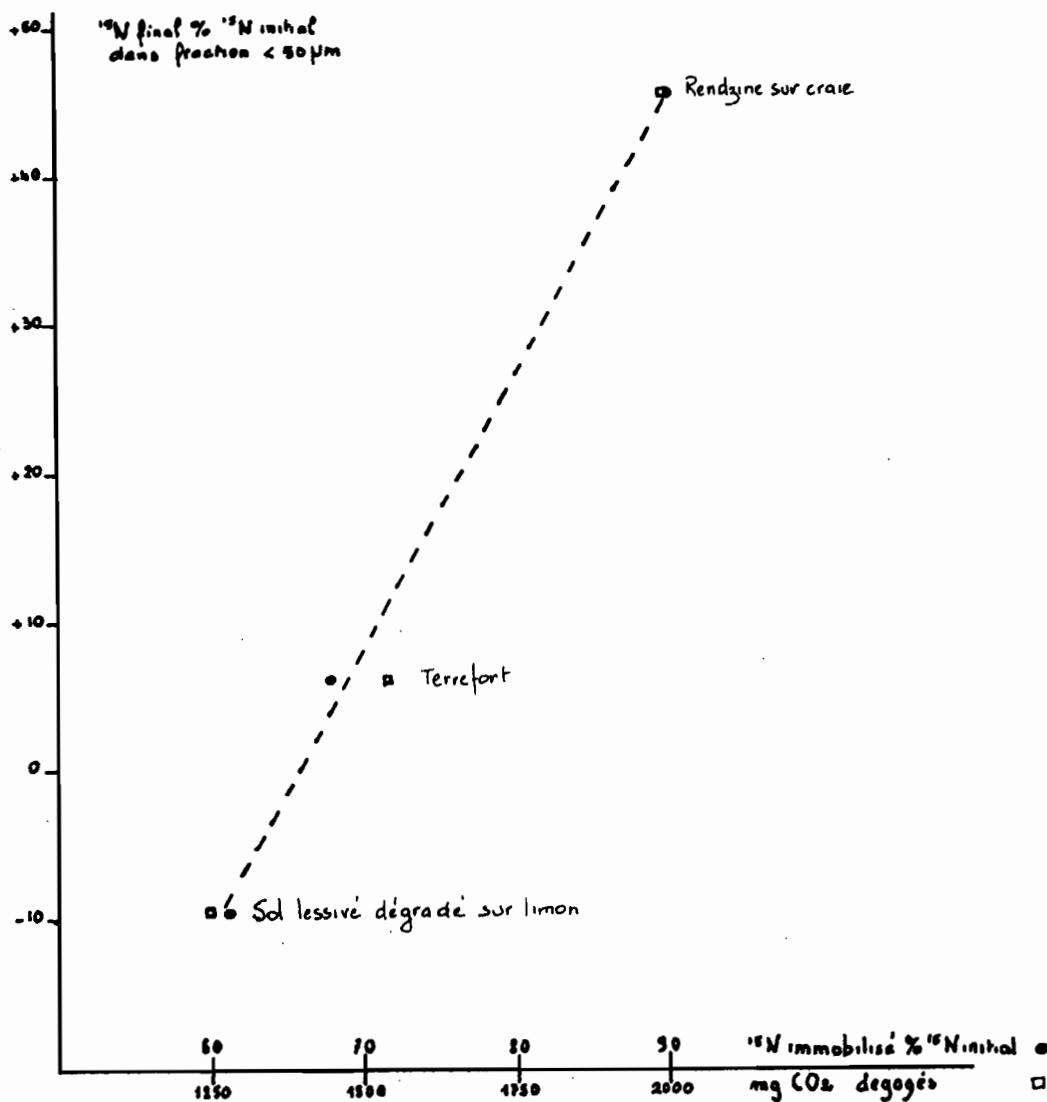
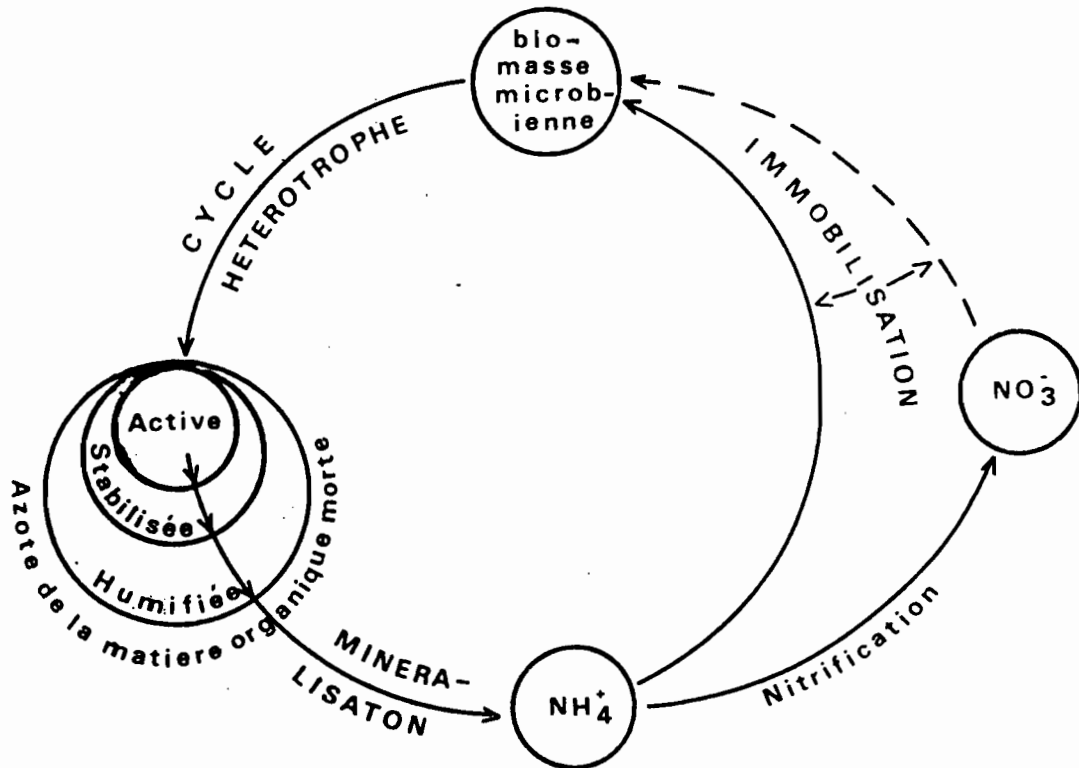


FIGURE 1 : Relation entre les paramètres de l'activité biologique (respiration et réorganisation de l'azote) et l'accumulation de l'azote dans les micro-agrégats inférieurs à 50µ.

- Fig. 8 -



**LES FRACTIONS DE LA MATIÈRE ORGANIQUE MORTE  
DU SOL ET SES RELATIONS AVEC LA  
BIOMASSE MICROBIENNE**

*lutte contre l'excès des nitrates  
stockés dans le sol*