



**HAL**  
open science

## Taux net annuel de minéralisation de la matière organique des sols de grande culture de Beauce, conséquences pour l'azote

Jean-Claude Fardeau, Jean Thiery, Gérard Guiraud, Christian Morel, B Boucher

### ► To cite this version:

Jean-Claude Fardeau, Jean Thiery, Gérard Guiraud, Christian Morel, B Boucher. Taux net annuel de minéralisation de la matière organique des sols de grande culture de Beauce, conséquences pour l'azote. Comptes Rendus des Séances de l'Académie d'Agriculture de France, 1988, 74 (8), pp.61-70. hal-02727682

**HAL Id: hal-02727682**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02727682>**

Submitted on 2 Jun 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## TAUX NET ANNUEL DE MINÉRALISATION DE LA MATIÈRE ORGANIQUE DES SOLS DE GRANDE CULTURE DE BEAUCE. CONSÉQUENCE POUR L'AZOTE.

### ANNUAL NET RATE OF ORGANIC MATTER MINERALIZATION IN BEAUCE AGRICULTURAL SOILS : CONSEQUENCE FOR NITROGEN.

par **Jean-Claude Fardeau (\*)**, **Gérard Guiraud (\*)** **Jean Thiery (\*)**,  
**Christian Morel (\*\*)** et **Bernard Boucher (\*\*\*)**

(note présentée par **Jacques Quéméner**)

#### RÉSUMÉ

Dans une exploitation agricole beauceronne représentative de la région, les analyses successives des sols des 9 principales parcelles ont révélé une baisse moyenne de la teneur en matière organique de 4 % à 2 % entre 1971 et 1987. Les analyses statistiques entreprises ne permettent pas de prévoir avec certitude à quelle date l'équilibre sera atteint compte tenu des récentes pratiques culturales utilisées. La conséquence principale en est une libération d'azote minéral dont une partie a certainement rejoint la nappe phréatique. La conclusion majeure serait que ces transferts d'azote dans la nappe ne pourront être réellement limités que le jour où l'on disposera d'une bonne connaissance des périodes et conditions de minéralisation de la matière organique en relation avec les apports d'engrais azotés. Les pratiques culturales affinant le sol pour les lits de semences et l'irrigation.

#### SUMMARY

Kinetics of organic matter contents for the 9 major fields of a large farm situated in Beauce county are analyzed. Since 1971 organic matter content decreased from 4 % to 2 %. Statistical analysts did not permit to estimate if, now, equilibrium state for organic matter content is reached. The decrease in organic matter content, simultaneously, induced a mineral nitrogen mineralization near 180 kgN. ha<sup>-1</sup>. year<sup>-1</sup>. This recent large decrease in organic matter content could be due to some agricultural practices of the present day as irrigation and/or soil refinement for seedling stage.

#### INTRODUCTION

En raison du rôle qu'elle joue sur la structure du sol (8,16) et sur la nutrition azotée des cultures (7,25), la matière organique fait l'objet d'études continues. Du fait de la lenteur de son évolution quantitative, seuls des dispositifs expérimentaux de longue durée permettaient par le passé de déterminer les modifications des teneurs avec une bonne précision. Les travaux de Hénin (8), puis ceux de Morel (17) dans d'autres dispositifs, ont abouti, il y a une vingtaine d'années, à observer des taux nets annuels de dégradation de la matière organique voisins de 1,5 % du stock total de l'horizon travaillé. Le développement régulier des analyses

(\*) DB/SRA; CEN Cadarache. 13108, Saint-Paul-Lez-Durance. F.  
(\*\*) Service agronomique, COFAZ, BP 133, 92202 Neuilly Cedex. F.  
(\*\*\*) Ussaune. Dambron. Cidex 0708. 28140 Orgères. F.  
C.R. Acad. Agric. Fr., 1988, 74, n° 8, pp. 61-70, Séance du 14 décembre 1988.

de sols chez les agriculteurs permet d'envisager la détermination du taux net de dégradation directement dans le milieu agricole, certains agriculteurs cultivant de très longue date les mêmes terres pour lesquelles ils ont régulièrement fait faire des analyses de terre. Une telle approche permet de comparer les données «milieu agricole» à celles des parcelles expérimentales et de préciser la part possible de la minéralisation nette de la matière organique comme source des nitrates transférés dans les nappes phréatiques (15).

## MATÉRIEL ET MÉTHODES

### A - Site d'observation.

Il est situé dans une zone de grande culture à une trentaine de kilomètres d'Orléans. On a choisi de présenter l'évolution des teneurs en matière organique des principales parcelles d'une exploitation agricole beauceronne particulièrement bien suivie par son exploitant plutôt que de faire appel aux moyennes des teneurs observées annuellement au cours d'analyses de sols réalisées sur des parcelles distinctes de la région comme cela est parfois réalisé (5). Les rotations pratiquées sont celles de la région : betteraves sucrières-céréales-céréales. Les rendements en betteraves sont de l'ordre de 60 t, ha<sup>-1</sup>. Les résidus de récolte sont, chez cet agriculteur, systématiquement restitués avant même l'époque des premières analyses de sol prises en compte dans cette étude. Les apports d'engrais P et K, compte tenu des restitutions de résidus de récolte, ont couvert, pour les 17 dernières années, 2 fois les exportations ; ceux d'azote ne les ont couverts que 1,3 fois. Les pesticides sont apparus vers 1974. L'irrigation, depuis 1976, apporte environ 40 mm d'eau annuellement sur 35 % de la SAU.

### B - Les sols.

Leurs caractéristiques principales, en 1987, sont présentées au tableau I. La moitié, environ, de l'exploitation est constituée de sols de limons de Beauce et l'autre moitié de sols argilo-calcaires du Stampien. Au dire des conseillers agricoles de la région, ces sols sont représentatifs de l'ensemble de la région.

### C - Estimation de la matière organique.

Les données analytiques disponibles couvrent la période 1925-1987. Les analyses de sols proviennent de nombreux laboratoires choisis au gré des conseillers agricoles et/ou des distributeurs d'engrais. N'ont été retenues dans les résultats que nous présentons, que les analyses originaires de laboratoires pouvant actuellement préciser comment étaient antérieurement réalisés les dosages de matière organique. C'est la raison pour laquelle ne sont utilisables que les mesures des 17 dernières années. La quantité de carbone mesurée est, selon les laboratoires, multipliée par un facteur compris entre 1,72 et 1,76. Cette variation de

2,5 % du facteur multiplicatif est inférieure à la variabilité liée à la prise d'échantillons de sol en milieu agricole.

Tableau I : Analyse physico-chimique actuelle des diverses parcelles.

Sols Nature	Granulométrie %					Ca CO <sub>3</sub> %	pH eau	"Ass" P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ppm	"Ass" K <sub>2</sub> O ppm	C %	N %	C/N
	A	LP	L	SF	SG							
2 AC	26	26	33	3	7	2,5	7,4	310	440	1,13	0,14	8,1
3 L	26	24	38	3	7	0,2	7,2	460	440	1,31	0,13	10,1
4 L	22	35	28	3	9	0	6,9	240 D	270	0,99	0,12	8,3
5 L	33	28	24	3	9	1,0	7,4	380	510	1,1	0,13	8,5
6 L	26	26	37	3	6	0,3	7,6	420 D	430	1,26	0,15	8,4
7 L	32	27	27	3	8	1,5	7,7	250	500	1,07	0,15	7,1
8 AC	27	24	32	3	7	4,9	7,8	280	560	1,41	0,17	8,3
9 AC	36	16	21	9,8	13,2	10,3	7,6	440	850	1,13	0,16	7,1
11 AC	25	24	25	5	16	24,0	7,8	540	1 100	1,58	0,16	9,8

## RÉSULTATS

L'évolution des teneurs en matière organique dans les parcelles de l'exploitation, présentée au tableau II, fait apparaître une diminution systématique dans l'horizon cultivé. Les résultats des analyses granulométriques étant, pour chaque parcelle examinée, restés constants d'une année sur l'autre, les diminutions ne peuvent être imputées à des erreurs systématiques de prélèvement.

## DISCUSSION

A - Modélisation de l'évolution des teneurs en matière organique.

1 - Démarche classique.

Elle consiste à traiter chaque parcelle comme un individu isolé possédant sa propre évolution.

La figure 1 illustre en coordonnées semi-logarithmiques la première équation utilisée pour simuler l'évolution des teneurs en matière organique (21). Elle est de la forme  $C = C_0 \cdot e^{-kt}$ . Les points expérimentaux correspondent aux parcelles 3 et 5 pour lesquelles les données sont les plus nombreuses ; les coefficients de corrélation,  $r$ , sont respectivement de 0,93 et 0,96. Une telle équation simule donc en première analyse l'évolution des teneurs en matière organique dans les sols de cet agriculteur. La formulation précédente permet de déduire des divers  $k$  les plus probables

des demi-vies apparentes de la matière organique et des taux annuels de dégradation apparent, c'est-à-dire le pourcentage du carbone de la matière organique qui, chaque année, quitte la couche labourée. Les valeurs calculées pour les diverses parcelles sont présentées tableau III. L'équation utilisée est représentative d'un modèle où, au regard du processus annuel de dégradation nette, le carbone de la matière organique est un compartiment unique ouvert sur un milieu infini.

Tableau II : Evolution de la teneur (%) en matière organique des différentes parcelles.

Sols	Années	1971	1972	1974	1979	1982	1985	1986	1987
2		4,7			2,5		2,3		2,0
3		4,4		3,2	2,6			2,4	2,3
4		3,6		2,4					1,7
5		4,6		3,2	2,9	2,1			1,9
6		3,1					2,0		2,2
7		3,5							1,8
8					3,3			2,6	2,4
9			2,8						2,0
11				4,1					2,7

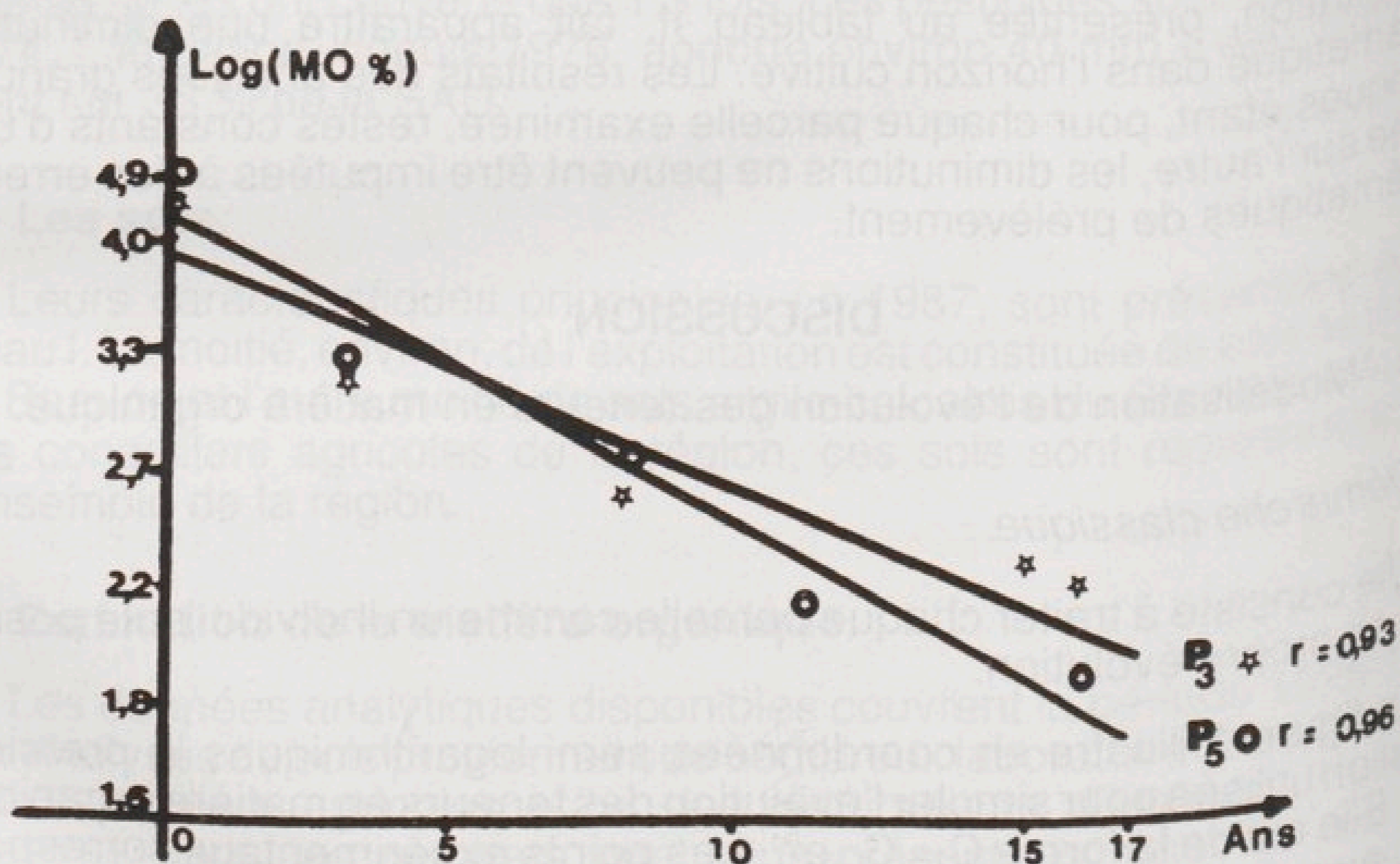


Figure 1 : Représentation semi-logarithmique de l'évolution des teneurs en matière organique.

En fait sous culture il existe des restitutions annuelles systématiques de matière organique sous forme racinaire et dans le cas de la ferme

étudiée sous forme de résidus de cultures. Diverses équations ont été proposées pour aborder ce problème et, parmi elles, on se doit de citer celles de Jenny (13) Hénin-Dupuis (9), Bartholomew et Kirkham (1) et de Russel (20). D'autres, plus complexes, font appel à l'existence de plusieurs compartiments au sein de la matière organique totale du sol et en particulier de la biomasse (3, 11, 12) ; la biomasse étant inconnue dans les déterminations antérieures, il n'est pas possible de faire appel à ces modèles.

Plutôt que de donner directement les résultats finals obtenus avec les modèles utilisables (1, 9, 13), nous avons choisi d'explicitier la méthode de calcul retenue en prenant comme exemple la parcelle 2 ; la première hypothèse est que les échantillons de sols ont été prélevés immédiatement avant l'enfouissement des résidus de récolte. La connaissance effective des rendements culturaux sur toute la période concernée (17 ans) permet d'estimer l'apport annuel moyen à 4,4 t de matière organique par hectare sous forme de parties aériennes ; leur enfouissement réalisé, pour les pailles, par deux passages croisés de cover-crop, apporte au sol 1,77 t de carbone auquel il faut ajouter environ 10 % correspondant à la masse racinaire. L'apport total annuel est donc estimé à 1,95 t de carbone. Les travaux effectués avec des résidus de récolte marqués au  $^{14}\text{C}$  (14, 19, 22) montrent que durant l'année qui suit l'enfouissement 70 % du carbone des résidus végétaux sont transformés en  $\text{CO}_2$  : les 30 % restant représentent 0,59 t de C. La seconde hypothèse, retenue d'ailleurs par tous les auteurs (1, 9, 13, 20), est que ces 0,59 t de carbone deviennent partie intégrante de la matière organique de sol et suivent alors son destin.

En 1971, dans les 4000 t.  $\text{ha}^{-1}$  de terre travaillée, la parcelle 2 contenait 106 t de carbone dont le taux annuel apparent moyen de dégradation est de 4%. L'année 1972 il ne restait plus dans le sol que 101,76 t de carbone ; mais sur ce total 0,59 t ont pour origine les résidus enfouis en 1971 qui se sont dégradés à raison de 70 %. Il en résulte que la quantité réelle de carbone, ayant pour origine le carbone humifié, est de  $101,76 - 0,59 = 101,17$  de carbone. Cette dernière valeur permet de calculer le taux réel de dégradation du carbone qui s'établit à 4,7 %. L'ensemble de cette analyse est illustré par la figure 2.

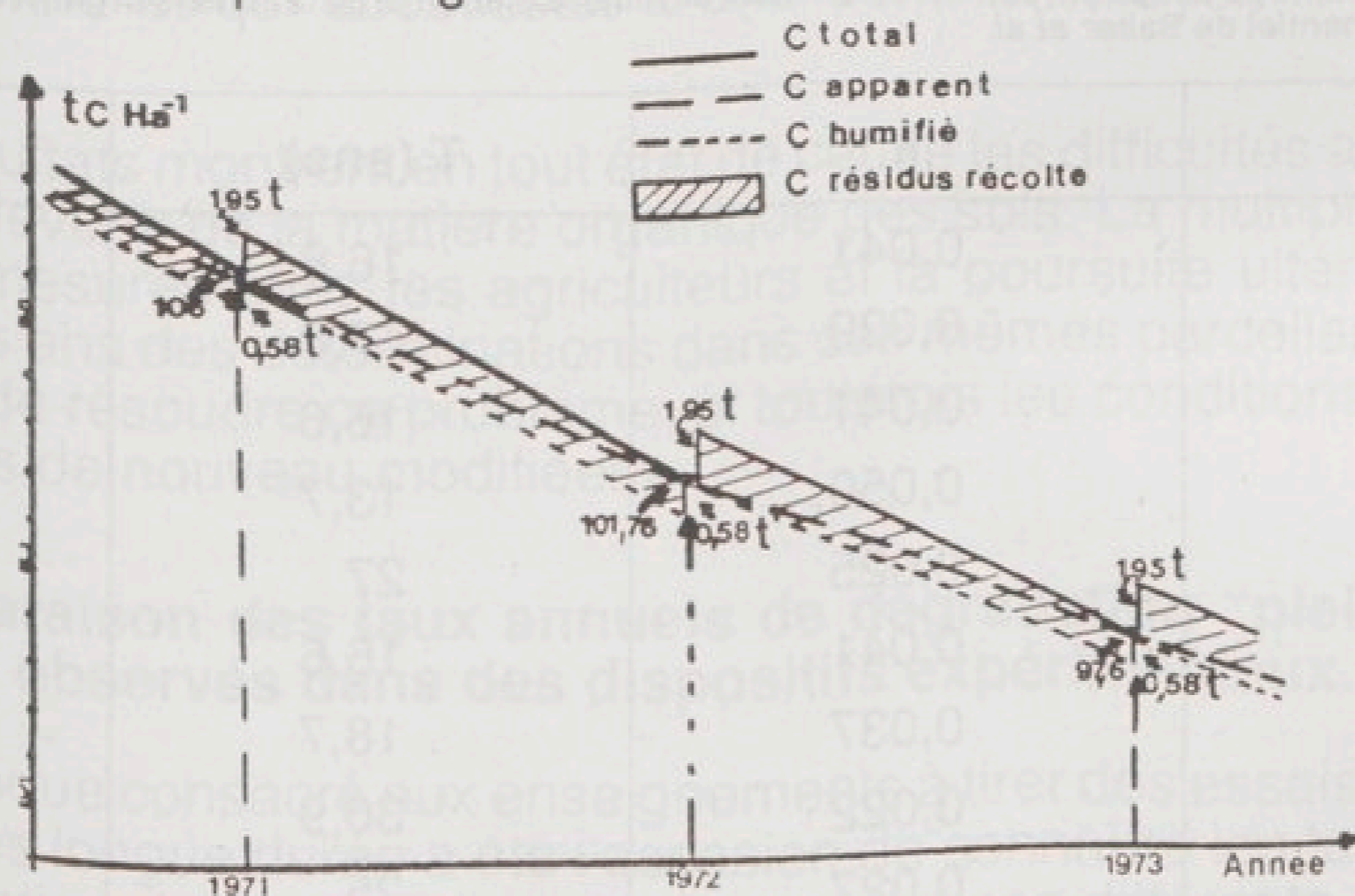


Figure 2 : Evolution réelle des teneurs en matière organique en prenant en compte les résidus de récolte.

Les équations utilisées reviennent à considérer que la matière organique totale du sol est constituée de deux compartiments dont l'un, composé de la matière organique humifiée, se dégrade à raison de 4,7 % l'an et l'autre, constitué des résidus de récolte de première année, se dégrade à raison de 70 % la première année et alimente le premier. L'ensemble est schématisé figure 3.

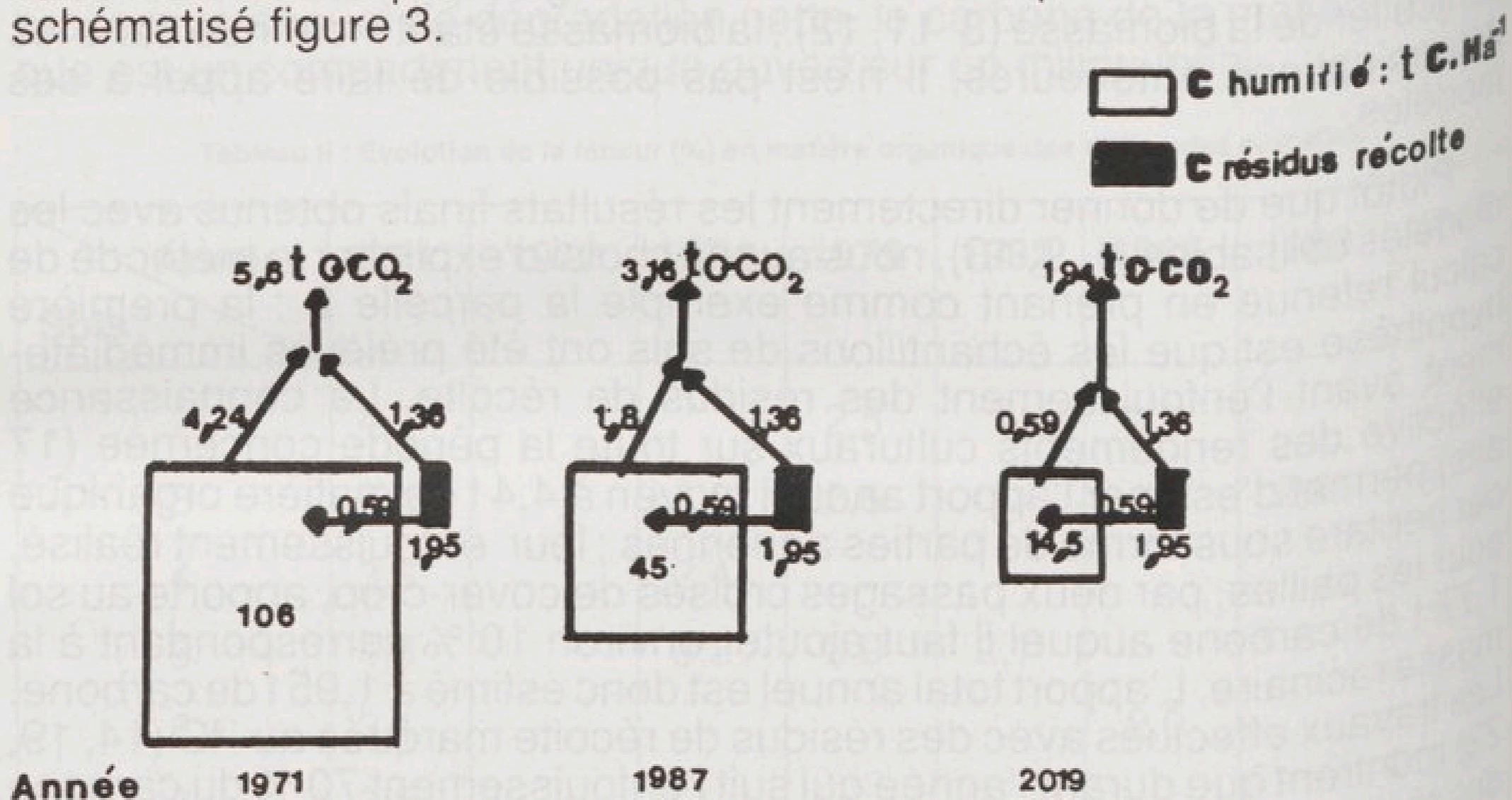


Figure 3 : Schématisation de l'évolution probable des quantités de matière organique dans un sol.

Un tel examen prenant en compte les résidus de récolte, étendu à toutes les parcelles de l'exploitation, montre que les taux apparents du tableau III doivent être augmentés de 0,5 % en moyenne, ce qui leur donne des valeurs situées entre 2,7 % et 5,5 %. Enfin ce schéma permettrait également de prévoir que, sans modifications nouvelles des pratiques culturales actuelles, l'équilibre du système pourrait être atteint vers l'an 2020 pour une quantité de carbone humifié de l'ordre de 14,5 t de carbone dans les 4000 t de terre travaillée. L'application de la formule de Dupuis-Hénin conduit à 14,4 t, valeur non significativement différente de celle obtenue pas-à-pas.

Tableau III : Constante de temps (k), demi-vie (T) et taux de minéralisation (t) de la matière organique dans le modèle exponentiel de Salter *et al.*

Sols	k	T (ans)	t (%)
2	0,041	16,8	4
3	0,039	17,6	3,9
4	0,041	16,6	4
5	0,050	13,7	5
6	0,025	27	2,6
7	0,041	16,6	4
8	0,037	18,7	3,7
9	0,022	30,9	2,2
11	0,027	25	2,7

## 2 - Autre approche statistique.

Elle est voisine de celle utilisée par d'autres auteurs au niveau d'une région entière (5) à partir des données recueillies dans les laboratoires d'analyse de routine. Elle consiste à considérer que tous les points d'une année donnée sont des répétitions d'un processus unique entaché d'erreurs expérimentales. On peut alors calculer, comme dans le traitement précédent, la courbe exponentielle la plus probable. Une telle opération a été réalisée pour les sols de limons ; elle est illustrée par la figure 4. La valeur d'équilibre serait alors presque atteinte et aurait pour valeur 1,88 % et la demi-vie de la matière organique entre 1971 et 1987 aurait été de 4,6 années.

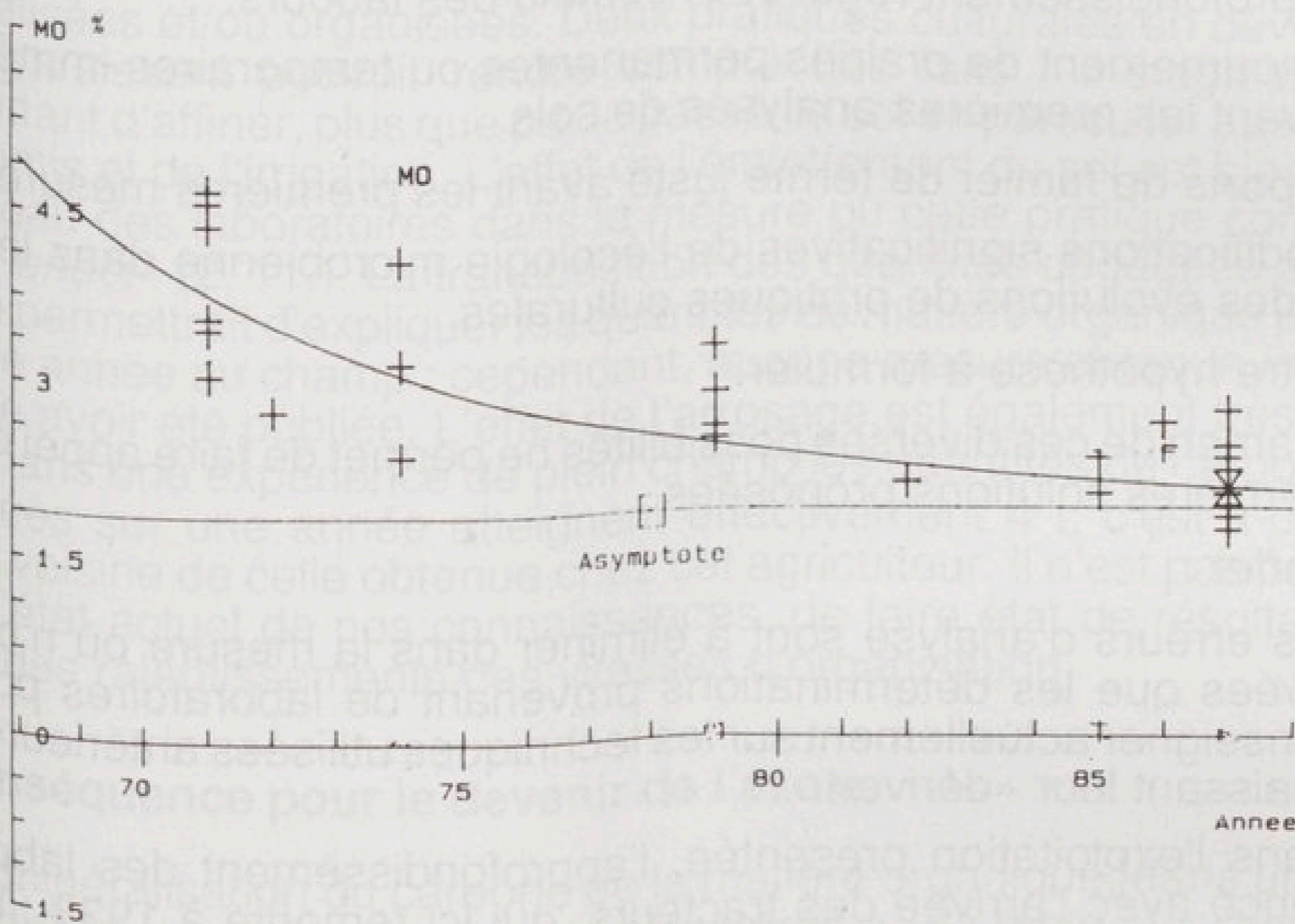


Figure 4 : Cinétique de minéralisation de la matière organique.

Les différents tests statistiques entrepris ne permettent pas, au vu de leurs résultats, de différencier cette dernière approche de celle proposée précédemment et qui aboutissait à une demi-vie moyenne de 16 ans environ.

Ces résultats montrent en tout état de cause les difficultés actuelles de prévoir le devenir de la matière organique des sols. La multiplication des points de mesures chez les agriculteurs et la poursuite ultérieure dans deux à trois ans des déterminations dans ces mêmes parcelles devraient permettre de résoudre ce problème, si toutefois les conditions culturales ne sont pas de nouveau modifiées.

## B - Comparaison des taux annuels de dégradation "plein champ" avec ceux observés dans des dispositifs expérimentaux.

Un colloque consacré aux enseignements à tirer des essais agronomiques de très longue durée a été l'occasion de connaître les taux annuels de dégradation de la matière organique dans ces différents essais. On



trouve pour l'Europe : 1,3 % à 1,5 % dans le dispositif Deherain (17), 0 % dans celui de Groningen (6) et de 1 % à 4 % dans celui de Halle (26) ; pour les USA les Morrow Plots conduisent à des valeurs du même ordre de grandeur.

Les taux nets de dégradation de la matière organique plus élevés chez cet agriculteur beauceron que dans les dispositifs expérimentaux des instituts de recherche agronomique peuvent être expliqués par les hypothèses suivantes :

- Différences analytiques glissantes entre les divers laboratoires ayant réalisé les déterminations de matière organique.
- Approfondissement régulier et continu des labours.
- Retournement de prairies permanentes ou temporaires immédiatement avant les premières analyses de sols.
- Apports de fumier de ferme juste avant les premières mesures.
- Modifications significatives de l'écologie microbienne dans les sols liées à des évolutions de pratiques culturales.
- Autre hypothèse à formuler.

L'examen de ces diverses possibilités ne permet de faire appel qu'aux deux dernières solutions proposées.

En effet :

- Les erreurs d'analyse sont à éliminer dans la mesure où n'ont été conservées que les déterminations provenant de laboratoires pouvant nous renseigner actuellement sur les techniques utilisées antérieurement et connaissant leur «dérive».

- Dans l'exploitation présentée, l'approfondissement des labours a commencé avec l'arrivée des tracteurs, qui ici remonte à 1933 ; il s'est poursuivi jusque vers 1950.

- Les derniers apports de fumier ont eu lieu vers 1960 et coïncident avec la disparition des derniers moutons.

- La dernière luzernière a été retournée en 1961, immédiatement après l'arrêt de l'élevage mais 10 ans avant les premières analyses utilisées dans ce mémoire.

Seules les différences d'activité microbienne semblent pouvoir rendre compte de l'existence de taux nets de dégradation de la matière organique plus importante dans les sols étudiés que dans les dispositifs expérimentaux. Trois mécanismes pourraient être invoqués pour expliquer le résultat au champ :

- Destruction partielle répétitive de la biomasse par des intrants nouveaux chez les agriculteurs tels des engrais en quantités importantes ou des pesticides.
- Vitesses supérieures de minéralisation de la matière organique.
- Vitesses inférieures d'organisation de la matière organique.
- Conjonction des deux derniers facteurs.

La quantité de carbone présente sous forme de biomasse estimée par destruction chimique équivalente à des pesticides est toujours très faible par rapport à la quantité de carbone totale (4, 18,24,). De plus les pesticides migrent généralement peu et ne peuvent en aucun cas détruire la totalité des micro-organismes du sol : en témoigne la perpétuation des phénomènes de nitrification dans tous les champs cultivés. Les ajouts d'engrais ne permettent pas non plus d'expliquer le sens de la variation observée : en témoignent, par exemple, les essais de Grignon, où la quantité de matière organique totale restant dans les sols est d'autant plus grande que la quantité d'engrais appliquée a été importante. (17).

Seules semblent donc en cause les quantités de matière organique minéralisées et/ou organisées. Deux pratiques culturales en développement paraissent pouvoir rendre compte des faits ; il s'agit de celle permettant d'affiner, plus que par le passé, le sol en particulier au moment des semis et de l'irrigation. L'effet de l'émiettement du sol est bien connu au niveau des laboratoires dans la mesure où cette pratique conduit au «flush-effect» (2, 11,). La transposition des quantités dégagées au laboratoire permettrait d'expliquer les quantités de matière organique perdues chaque année au champ ; cependant, aucune mesure obtenue *in situ* ne semble avoir été publiée. L'effet de l'arrosage est également très significatif. Dans une expérience de plein champ les quantités de carbone (23) cumulées sur une année atteignent effectivement 4 t, c'est-à-dire une valeur voisine de celle obtenue chez cet agriculteur. Il n'est pas possible, dans l'état actuel de nos connaissances, de faire état de résultats indiquant des ralentissements des vitesses d'organisation.

### C. Conséquence pour le devenir de l'azote.

La minéralisation du carbone de la matière organique, dans un sol de rapport C/N constant et voisin de 10, entraîne, *de facto*, une apparition d'azote minéral. La quantité moyenne annuelle serait voisine de 200 kg N.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>. Les quantités d'azote apportées annuellement par l'agriculteur couvrant largement les exportations des cultures, on peut avoir la certitude qu'une quantité voisine de 200 kg N.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> a quitté l'horizon travaillé. La teneur de la nappe phréatique en nitrate (43 mg.l<sup>-1</sup>) ne permet pas de démentir cette proposition, même s'il paraît logique de penser que l'azote présent dans la nappe chez cet agriculteur ne provient pas directement de chez lui ; une telle valeur confirme plutôt la généralité des phénomènes décrits dans cette zone.

En absence de connaissances des périodes de minéralisation, le raisonnement de la fertilisation azotée ne peut pas être amélioré puisque rien ne prouve, actuellement, que dans cette zone l'azote serait minéralisé à une période correspondant aux besoins en azote des cultures.

### CONCLUSION

Le taux net de minéralisation de la matière organique de la couche labourée des sols d'une exploitation beauceronne est, malgré une restitution de la totalité des résidus de récolte (verts de betteraves et pailles de

céréales) beaucoup plus élevé que celui des dispositifs expérimentaux des instituts de recherche agronomique d'où sont issues les données conduisant aux calculs de la fourniture probable d'azote originaire du sol et susceptible de nourrir les cultures. Les analyses statistiques entreprises à cette occasion ne permettent pas de conclure avec certitude sur la valeur que pourrait atteindre la teneur en matière organique à l'équilibre sans nouvelles modifications des pratiques culturales. Seule la poursuite des mesures et l'augmentation du nombre de cas observés permettra de mieux prévoir les résultats à venir. Si toutes les zones d'agriculture intensive ne semblent pas touchées de la même façon (5), celle présentée le semble en totalité comme le prouvent d'autres analyses trouvées chez d'autres agriculteurs. Cette dégradation a entraîné une libération d'azote minéral qui n'a pu, en aucun cas, être quantitativement consommé en totalité par les cultures, la fertilisation étant excédentaire. Les nitrates ont donc pour partie migré dans la nappe phréatique. La limitation des transferts de nitrates vers les nappes ne pourra donc être sérieusement abordée qu'avec la connaissance des périodes de minéralisation de l'azote du sol en relation avec les apports d'engrais azotés, les pratiques culturales et le contrôle de l'eau.

#### RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- (1) BARTHOLOMEW W.V., KIRKHAM D. 1960, 7th Intern. Congress of Soil Sci. III. 2. 471-477.
- (2) BOTTNER P., LOSSAINT P., CORTEZ J. 1977, AIEA. STI/PUB/438. 263-272.
- (3) CHAUSSOD R., HOUOT S., GUIRAUD G., HETIER J.M. 1987, *Seminar en nitrogen efficiency in agricultural soils and the efficient use of fertilizer nitrogen*. Edinburg. (sous presse).
- (4) CHAUSSOD R., NICOLARDOT B., SOULAS G., JOANNES H. 1986. Rev. Ecol. Biol. Sol. 23 (2) 183-196.
- (5) COLOMB B., CALVET G. 1987, Analyse de l'évolution de quelques critères physico-chimiques de la fertilité des sols de l'Aisne. Publication SCPA, 39 pages.
- (6) DE LA LANDE CREMER L.C.N. 1976. Ann. agron. 27, (5, 6) 791-801.
- (7) GUIRAUD G. Thèse Doctoral d'Etat. 1984. Paris VI.
- (8) HENIN S. 1938. Thèse Paris.
- (9) HENIN S., DUPUIS M. 1954. Ann. agron. 15-17.
- (10) JENKINSON D.S. 1977. *J. Soil Sci.* 28. 424-434.
- (11) JENKINSON D.S., POLWILSON D.S. 1976. *Soil Biol. Biochem.* 8. 209-213.
- (12) JENKINSON D.S., RAYNER J.H. 1977. *Soil Sci.* 123 (5). 298-305.
- (13) JENNY H. Factors of soils formation. Mc GRAWHILL, New-York 1971.
- (14) MALIK K.A., HAIDER K. 1977. AIEA STI/PUB/ 438. 215-225.
- (15) MARIOTTI A. 1982. Apports de la géochimie isotopique à la connaissance du cycle de l'azote. Thèse Université Paris 6. 500 p.
- (16) MONNIER G. 1965. Thèse Science. Paris.
- (17) MOREL R. 1976. Ann. agron. 27 (5, 6) 567-582.
- (18) NICOLARDOT B., GUIRAUD G., CHAUSSOD R., CATROUX G. 1986. *Soil Biol. Biochem.* 18, 3, 263-273.
- (19) PAUL E.A., Mc GILL W.B. 1977. AIEA STI/PUB/ 438, 149-156.
- (20) RUSSEL J.S. 1975, *Soil Science.* 120. 1. 37-44.
- (21) SALTER R.M., GREEN T.C. 1933. *J. Amer. Soc. Agron.* 25. 622-625.
- (22) SAUERBECK D.R., JOHNEN B.G. 1977. AIEA ST/PUB/438? 141-146.
- (23) SHARKOV I.N. 1987. *Pochvovedeniye*. 1. 127-133.
- (24) SOULAS G., *Bio. Biochem.* 16. 5. 497-501.
- (25) STEVENSON F.J. 1986. *Cycles of soil carbon, nitrogen, phosphorus sulfur, micronutrient*. John Wiley & Sons.
- (26) WELTE E., TIMMERNANN. 1976. 27. (5, 6) 721-742. Ann. agron.