

THESE

TH - RB-7

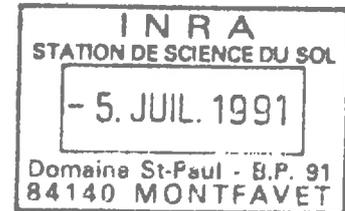
a ravin

FCM

présentée à
L'INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE
PARIS-GRIGNON

pour obtenir le titre de
DOCTEUR INGENIEUR

"Géologie appliquée"



LOCALISATION ET CARACTERISATION
DE LA MATIERE ORGANIQUE
DES SOLS. DEFINITION
D'UN MODELE D'EVOLUTION.

par

Cheikh AKROUME

Ingénieur Agronome de l'I.N.A. d'ALGER

Soutenue le 15 Mai 1985 devant la commission d'examen :

J. BOULAINÉ,	Président
R. BARDIN,	Rapporteur
R. CALVET,	(
G. DE BEAUCORPS,) Examineurs
P. CHASSIN,)

AVANT-PROPOS

Je tiens à remercier Monsieur J. BOULAINÉ pour m'avoir accepté dans son Département et pour m'avoir trouvé un Laboratoire d'accueil : la Station de Science du Sol de VERSAILLES ; Messieurs R. BARDIN, R. CALVET, G. DE BEAUCORPS, pour avoir bien voulu faire partie du Jury, et Monsieur P. CHASSIN, pour l'aide constante qu'il m'a apportée dans la réalisation de ce travail.

L'occasion m'est également donnée de remercier ici tous ceux qui, durant cette période, m'ont apporté conseils, encouragements et aide ; en particulier : J. BALESSENT, Z. DJABRI, J. DUCARROIR dit "HADJ", C. JOUANY, R. PROST et N. WOLFF.

Enfin, je remercie Mesdames A. LE BARS et C. NOUGAREDE, pour la dactylographie du document.

SOMMAIRE

CHAPITRE I

INTRODUCTION GENERALE DU TRAVAIL

CHAPITRE II

SITUATION ET JUSTIFICATION DU TRAVAIL ENTREPRIS

2.1 - INTRODUCTION	P. 11
2.2 - ASPECT BIBLIOGRAPHIQUES	P. 11
2.2.1. Rôle de la matière organique sur les propriétés des sols	
2.2.2. Modèles d'évolution de la matière organique des sols	
2.3 - INTERET DU TRAVAIL REALISE	P. 25
2.4 - CONCLUSION	P. 28

CHAPITRE III

ETUDE DE LA DISTRIBUTION DE LA MATIERE ORGANIQUE

3.1 - INTRODUCTION.....	p. 33
3.2 - CARACTERISTIQUES DU SOL ETUDIE - EFFET DES TRAITEMENTS	p. 34
3.2.1. Caractérisation du sol	
3.2.2. Caractérisation de la matière organique	
3.3 - DISTRIBUTION DE LA MATIERE ORGANIQUE DANS LES AGREGATS.....	p. 43
3.3.1. Situation du problème	
3.3.2. Méthodologie	
3.3.3. Résultats	
3.3.4. Discussion	
3.4 - DISTRIBUTION DE LA MATIERE ORGANIQUE DANS LES DIFFERENTES FRACTIONS GRANULOMETRIQUES EXTRAITES	P. 55
3.4.1. Analyse du problème	
3.4.2. Méthodologie	
3.4.3. Résultats du fractionnement	
3.4.4. Répartition granulométrique de la matière organique	
3.4.5. Discussion des résultats	
3.4.6. Conclusions	
3.5 - CONCLUSIONS DU CHAPITRE III	p. 91

CHAPITRE IV

CARACTERISATION DE LA MATIERE ORGANIQUE RECUEILLIE
DANS LES DIFFERENTES FRACTIONS GRANULOMETRIQUES EXTRAITES

4.1 - INTRODUCTION	p. 97
4.2 - EXTRACTIBILITE DE LA MATIERE ORGANIQUE	p. 98
4.2.1. Représentation des résultats	
4.2.2. Discussion des résultats	
4.2.3. Conclusions	
4.3 - STABILITE A L'HYDROLYSE ACIDE	p. 105
4.3.1. Représentation des résultats	
4.3.2. Discussion des résultats	
4.3.3. Conclusions	
4.4 - CAPACITES D'ECHANGE CATIONIQUE	p. 113
4.4.1. Analyse du problème	
4.4.2. Résultats	
4.4.3. Conclusions	
4.5 - ANALYSE THERMIQUE	P. 122
4.5.1. Analyse thermique pondérale	
4.5.2. Analyse thermique différentielle	
4.5.3. Analyse thermique différentielle sous azote	
4.5.4. Conclusions	
4.6 - MICROSCOPIE ELECTRONIQUE	P. 131
4.7 - SPECTROSCOPIE INFRAROUGE	P. 138
4.7.1. Attribution des bandes d'absorption	
4.7.2. Principes des mesures	
4.7.3. Résultats	
4.7.4. Conclusions	
4.8 - CONCLUSION GENERALE DU CHAPITRE IV.....	P. 147

CHAPITRE V

DISCUSSION GENERALE - CONSEQUENCES

5.1 - DISCUSSION GENERALE P. 151

 5.1.1. Synthèse des résultats

 5.1.2. Vérification du modèle proposé

5.2 - CONSEQUENCES P. 157

 5.2.1. Conséquences théoriques

 5.2.2. Conséquences pratiques

5.3 - CONCLUSION DU CHAPITRE V P. 162

CHAPITRE VI - CONCLUSIONS GENERALES

BIBLIOGRAPHIE p. 171

ANNEXE P.

INTRODUCTION

Les matières organiques et les associations organo-minérales confèrent des propriétés particulières aux sols. L'étude des mécanismes d'action des matières organiques sur ces propriétés revêt un intérêt particulier, notamment pour répondre aux questions suivantes :

- Peut-on exporter les résidus des récoltes sans mettre en péril les potentialités des sols agricoles ?
- Peut-on mettre en place de nouvelles techniques culturales (moindre travail du sol) qui modifient la répartition des produits organiques dans les sols sans modifier leurs propriétés ou induire des conditions défavorables de production ?
- Quel est le rôle de la matière organique sur la dynamique de l'azote, considéré soit comme fertilisant soit comme polluant ?
- Peut-on prévoir, en fonction du temps, du type de sol et de la nature et de la quantité des résidus organiques incorporés, l'évolution de la teneur en matières organiques des sols ?
- Peut-on associer un mode de fonctionnement à des caractéristiques qualitatives et quantitatives de la matière organique ?

Vouloir répondre à toutes ces questions nécessite :

- d'affiner les divers modèles utilisés pour le calcul des bilans humiques.
- de mettre en relation ces modèles avec les différentes approches utilisées actuellement dans l'étude des matières organiques de sol.
- d'utiliser les dispositifs expérimentaux de longue durée appropriés et conçus pour ce type d'étude.

Depuis les travaux de HENIN-DUPUIS (1945) et HENIN et al. (1959), deux grands modèles d'évolution de la matière organique ont été développés ces dernières années (cf. chapitre II) par JENKINSON (1977) et VAN VEEN et PAUL (1981).

Les différents compartiments conceptuels introduits par ajustement mathématique dans les modèles d'évolution de la matière organique sont définis par des données telles que quantités et flux de carbone, âge moyen apparent, et cinétique de minéralisation des composés organiques qui les constituent. Dans cette approche, il n'est donc pas possible d'obtenir d'information sur la nature, la localisation et les mécanismes de formation de ces différents compartiments.

Par ailleurs, sous l'impulsion de certains auteurs (FLAIG, SCHNITZER, DUCHAUFOR ...) des études analytiques ont connu un développement considérable. A partir de celles-ci, de nombreuses connaissances ont été accumulées. Dans ce type de recherches, les différents auteurs ont caractérisé la matière organique des sols par des méthodes physiques, physico-chimiques et chimiques. Les principales conclusions se situent dans une meilleure connaissance tant du point de vue des propriétés que de la genèse des molécules qui apparaissent au cours de la transformation des résidus de récolte.

C'est ainsi qu'une littérature abondante existe sur la nature et les propriétés des différentes macromolécules organiques rencontrées dans les sols (AH, AF, polysaccharides, protéines, lipides ...).

Pour répondre aux différentes questions posées précédemment, il est intéressant de se demander si on ne pourrait pas définir et associer une localisation particulière et une nature chimique donnée à un compartiment de la matière organique (cf. chapitre II). Ceci permettrait d'établir sur des bases expérimentales une relation entre l'approche analytique et l'approche agronomique.

Il est raisonnable de penser qu'un des moyens d'apporter une réponse à la question précédente est d'étudier d'une façon approfondie, les caractéristiques de la matière organique dans les matériaux terreux provenant du dispositif expérimental des 42 parcelles.

En effet les traitements réalisés maintenant depuis plus de 50 ans sur des parcelles sans culture et sans apport d'amendement organique ont conduit d'une façon certaine à la diminution voire la disparition des compartiments labiles ; alors que les compartiments stables, tels que les compartiments "matières organiques chimiquement stabilisées" introduits par JENKINSON n'ont pas été affectées.

Inversement, dans les parcelles sans culture avec apport de fumier en grande quantité, l'augmentation de la teneur en carbone doit être associée à une accumulation de composés organiques dans les compartiments labiles.

Dans le même ordre d'idée, des études équivalentes sur des sols sous pelouses à Versailles permettront d'analyser un sol en équilibre où les apports sont principalement racinaires, qui sera considéré comme référence.

CHAPITRE II

SITUATION ET JUSTIFICATION DU TRAVAIL ENTREPRIS

2.1 - INTRODUCTION	p. 11
2.2 - ASPECT BIBLIOGRAPHIQUES	p. 11
2.2.1. Rôle de la matière organique sur les propriétés des sols	
2.2.2. Modèles d'évolution de la matière organique des sols	
2.3 - INTERET DU TRAVAIL REALISE	p. 25
2.4 - CONCLUSION	p. 28

2.1 - INTRODUCTION

Dans ce chapitre qui a pour objectif de montrer l'intérêt du travail entrepris, nous présenterons successivement les principaux résultats publiés concernant :

- le rôle de la matière organique sur les propriétés des sols
- les modèles d'évolution de la matière organique des sols.

Dans un deuxième temps, nous montrerons comment on peut tenter de relier les différentes démarches rencontrées classiquement dans l'étude des matières organiques des sols. Pour cela, nous prendrons comme exemple la stabilité structurale et la capacité d'échange cationique.

2.2 - ASPECTS BIBLIOGRAPHIQUES

2.2.1. Rôle de la matière organique sur les propriétés des sols

La matière organique intervient à toutes les articulations du système sol-plante-technique-climat. BOIFFIN (1982).

Elle peut avoir des :

- Effets favorables : ce sont tous les facteurs susceptibles d'améliorer la production végétale, de faciliter les interventions techniques et d'accroître leur efficacité.
- Effets défavorables : ce sont tous les facteurs qui diminueront la production végétale.

a) Effets favorables

Ces effets peuvent être directs (effets d'engrais) ou indirects (modifications des propriétés des sols).

- Effet direct ou "effet d'engrais"

Les matières organiques apportées ou présentes dans le sol contiennent des éléments chimiques indispensables aux plantes qui pourront être, soit libérés lors de la minéralisation, soit immobilisés lors de l'organisation.

Les principaux éléments concernés par les processus de minéralisation et d'organisation de la matière organique sont l'azote et le phosphore.

Dans l'étude de ces phénomènes différents auteurs (REMY, 1971 ; COOKE, 1967 ; FLAIG, 1965 ; LIBOIS, 1966 ; BLACK et CORNING, 1953 ; ALLISON, 1970 ; DEMOLON, 1955 ; CHAMINADE, 1958 ; BARBIER et CHABANNES, 1961 ; MOREL, 1981, 1982) se sont attachés à définir des rapports critiques C/N ou C/P pour lesquels les phénomènes d'immobilisation et de libération se compensent. Dans ces travaux des concepts comme "matière organique labile" et "matière organique stable" sont introduits. Malheureusement, aucune méthode n'est proposée pour différencier et quantifier ces 2 types de matières organiques.

La matière organique intervient également dans la dynamique des éléments minéraux nécessaires aux plantes, en particulier sur :

- l'équilibre entre les diverses formes solubles ou/et échangeables.
- la solubilisation des phosphates par production de CO_2 lors de l'oxydation (STANFORD et PIERRE, 1953).
- la formation des complexes phospho-humiques mobiles et assimilables par les plantes.
- la dynamique du phosphore, en diminuant l'intensité des phénomènes de fixation par la phase minérale (CHAMINADE, 1946).
- l'assimilation de certains oligo-éléments (Fe, Mo, B, Cu ...) TROCME, 1966 ; ALLISON, 1973.
- Effets indirects de la matière organique sur les propriétés des sols :

Il est couramment admis que la matière organique modifie les propriétés physiques, physico-chimiques et biologiques des sols.

De nombreux travaux ont été publiés sur les relations matière organique - propriétés physiques des sols. L'essentiel des recherches a été consacré à l'étude des mécanismes d'action de la matière organique sur la stabilité de la structure (HENIN et al. 1969 ; MONNIER, 1965 ; GUCKERT, 1973 ; TISDALL et OADES, 1982 ; EDWARDS et BREMNER, 1967 ; GREENLAND, 1965 a et b ; 1971 ...). On doit également signaler l'existence de travaux traitant de l'influence de la matière organique sur la structure (ALLISON, 1973 ; BAVER, L.D, 1930) MONNIER et HENIN, (MONNIER, 1965) et les propriétés mécaniques (GUERIF, 1980 ; 1982 ; 1983) ...

Les principales conclusions que l'on peut retenir à partir des études sur la stabilité de la structure sont :

- Plus la quantité de CO_2 dégagé est grande et plus la stabilité de la structure est élevée. Comme on peut admettre que le CO_2 dégagé est un indicateur de la quantité du carbone organique métabolisé, on dit que la stabilité de la structure

est liée à la vitesse instantanée de minéralisation de la matière organique.

- Pour une vitesse de dégradation donnée, c'est-à-dire pour une activité biologique équivalente, la stabilité de la structure est indépendante de la nature du composé ou de l'amendement organique introduit.

- Pour une même quantité de carbone apporté, la stabilité de la structure est toujours plus grande si les produits sont formés sur place. De cette observation, on déduit que la localisation de la matière organique joue un rôle considérable. Ceci est confirmé par l'effet stabilisant ou non du krylium selon qu'il est apporté sur un matériau agrégé ou pulvérulent (HENIN et al., 1969).

- Le rapport matière organique sur argile (MO/A) est le meilleur descripteur possible. Ces deux dernières observations traduisent l'importance du complexe argilo-humique dans la stabilisation de la structure.

- L'Activité des produits apportés décroît au cours du temps de telle sorte que le nombre d'agrégats stables tend toujours vers une valeur limite caractéristique du sol étudié.

- L'Activité de l'ensemble des produits organiques n'a une action sensible qu'à partir d'un seuil donné. En d'autres termes, la stabilité de la structure n'est changée d'une façon significative que si le sol est le siège d'une activité biologique minimum.
le seuil pas en rapport.

Un des principaux mécanismes de stabilisation de la structure par les matières organiques est une diminution de la mouillabilité des agrégats. Ce phénomène est, à ce niveau, contradictoire avec celui mis en évidence par GUKERT (1973) qui admet que l'augmentation de la stabilité de la structure est due à une plus grande cohésion par suite de l'accumulation de polysaccharides. Cette dernière observation est d'ailleurs assez générale, (GREENLAND, 1965 a, b) (OADES, 1965, THENG, 1979) et

soit possible de les interpréter avec rigueur
faute d'indication absolument spécifique
soit 2 surtout avec un

n'est absolument pas contradictoire avec les observations 1 et 2 qui laissent sous-entendre un rôle important des êtres vivants.

En ce qui concerne l'influence de la matière organique sur les propriétés physico-chimiques des sols, des travaux sur l'hydratation, la capacité d'échange cationique, la fixation des molécules herbicides ..., ont été publiés.

Nous ne développerons ici que les effets de la matière organique sur la capacité d'échange cationique des sols. En effet nous avons procédé à la détermination de cette grandeur pour essayer de différencier les différents types de matière organique présents dans les matériaux terreux étudiés dans ce travail.

Par leur caractère polyanionique, les composés organiques fixent 4 à 5 fois plus de cations que les composés argileux. Leur capacité d'échange varie de 100 à 400 meq/100 g (SCHNITZER et KHAN, 1978 ; FLAIG, 1975) et augmente avec le degré d'humification (GAUCHER, 1968). Dans le sol les composés humiques s'adsorbent aux argiles pour former le complexe argilo-humique. La capacité d'échange du complexe serait inférieure à la capacité d'échange des constituants pris séparément (interaction négative). Cette diminution serait due au blocage de certaines charges négatives de l'argile par la matière organique (MEYERS, 1937 ; RUELLAN et DELETANG, 1967 ; SYERS et al. 1970) .

Par ailleurs il existe une relation linéaire entre capacité d'échange cationique et teneur en matière organique (SEQUI, 1975). Toutefois cette linéarité disparaîtrait pour des plus faibles teneurs en matière organique. Cette déviation par rapport à la linéarité, est expliquée par des interactions entre la phase minérale et la phase organique (cf. paragraphe précédent). Nous verrons que cette observation peut s'expliquer par la présence de deux types de matière organique ayant des capacités d'échange cationique différentes.

Enfin, en ce qui concerne l'influence de la matière

organique sur les propriétés biologiques du sol, nous n'envisagerons que l'étude des modèles d'évolution de la matière organique des sols (cf. paragraphe suivant). C'est volontairement que nous ne traiterons pas l'effet des produits organiques sur la biomasse ou la libération des substances dites "physiologiquement actives".

b) Effets défavorables

Bien que les potentialités d'action de la matière organique s'avèrent principalement positives : les conditions du milieu (tassement - excès d'eau ...) risquent de provoquer des effets défavorables.

1) Le mode d'enfouissement et la lenteur de décomposition des produits organiques peuvent créer des obstacles et limiter le développement des racines, gêner la circulation de l'eau et engendrer des irrégularités dans le semis. Des effets dépressifs tel que le blocage de l'azote, peuvent se manifester au premier stade de l'humification.

+ Fonctionne puis O₂

2) Des substances organiques toxiques peuvent être libérées quand les conditions sont réductrices ou l'activité microbienne est faible ; par exemple acide cyanhydrique et aldéhyde benzoïque, SAUNIER, BONNET, 1970).

3) Dans ce type de milieu réducteur humide, les matières organiques contribuent à la dispersion du complexe argilo-humique.

(Ref?)

4) Dans les sols ayant une structure fragile, la matière organique provoque la formation des pseudogleys qui limitent l'enracinement des végétaux et entraînent l'asphyxie et la nécrose des racines. La conjugaison de ces deux phénomènes induit des diminutions de rendements qui peuvent aller jusqu'à 40 %. Dans le cas des plantes pérennes ces phénomènes peuvent entraîner la disparition totale de la culture.

5) Enfin, il a été observé que l'activité des herbicides

diminue quand la teneur en matière organique augmente (SEBILLOTE, 1969).

N'y a. le pas de refaune plus perdurée (1ère tranche)

2.2.2. Modèles d'évolution de la matière organique des sols

Dans les sols agricoles, la matière organique provient essentiellement des débris végétaux laissés par les différentes récoltes ou les divers amendements organiques apportés par l'homme.

Ces produits apportés sont susceptibles d'une évolution rapide quand les conditions du milieu et leur constitution biochimique (C/N bas) sont favorables.

Dès le premier stade de l'évolution de ces produits, il est possible de les séparer de la phase organo-minérale des sols par flottaison densimétrique ou tamisage. On parle alors de matière organique libre.

Sous l'action continue de la biomasse du sol les débris végétaux subissent des transformations de plus en plus poussées. Les produits obtenus appelés substances humiques se fixent et se lient d'une façon intense au sol pour former le complexe argilo-humique. On parle alors de matière organique liée.

La recherche d'une loi d'évolution des stocks de matière organique contenue dans le sol en fonction du temps et des quantités de résidus organiques enfouies annuellement, a fait l'objet de plusieurs travaux.

Dans les modèles d'évolution de la matière organique, il est généralement admis que la décomposition de la matière organique peut être décrite par des cinétiques de 1er ordre :

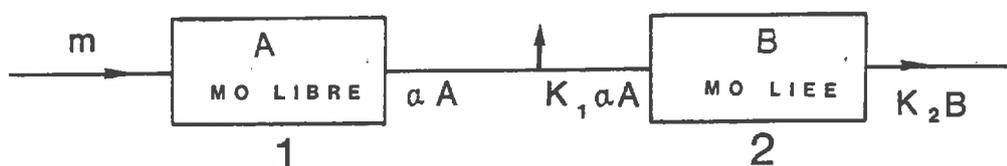
$$dC/dt = k.C$$

MODELE DE HENIN-DUPUIS 1945



- m = apport annuel de résidu de récolte
- k_1 = coefficient isohumique défini comme étant le rapport entre l'augmentation de la quantité de matière organique du sol et la quantité de matière organique apportée
- k_2 = coefficient de minéralisation de la matière organique.

MODELE de HENIN-MONNIER-TURC 1959



- α = coefficient de dégradation de la matière libre
- k_1 = coefficient isohumique
- k_2 = coefficient de minéralisation de la matière liée
- m = apport annuel de récolte.

Figures II.1 et II.2

JENKINSON et RAYNER (1977), RUSSEL (1964), STANFORD et SMITH (1974), HUNT (1977), GILMOUR et al. (1977), SINHA et SINHA (1977). il a été toutefois signalé que les quantités de carbone minéralisées sur une période courte peuvent ne pas suivre une cinétique du premier ordre (PAL et BROADBENT, 1975).

1) Modèle HENIN-DUPUIS (1945)

C'est un modèle à un seul compartiment où n'intervient que la quantité de carbone total (Fig. 1). L'établissement de la relation "quantité de carbone en fonction du temps" nécessite de faire le bilan des entrées-sorties sur un pas de temps donné. Dans ce cas simple on aboutit à la relation :

$$C = (C_0 - m.k_1/k_2) e^{-k_2 t} + m.k_1/k_2$$

m = apport annuel de résidu de récolte

k_1 = coefficient isohumique défini comme étant le rapport entre l'augmentation de la quantité de matière organique du sol et la quantité de matière organique apportée

k_2 = coefficient de minéralisation de la matière organique.

Cette formule n'est plus valable quand les apports de résidus organiques ne sont pas constants.

Une méthode d'intégration + rigoureuse a alors été et proposée par

Une relation plus rigoureuse a été établie par CHADOEUF (1982).

uu

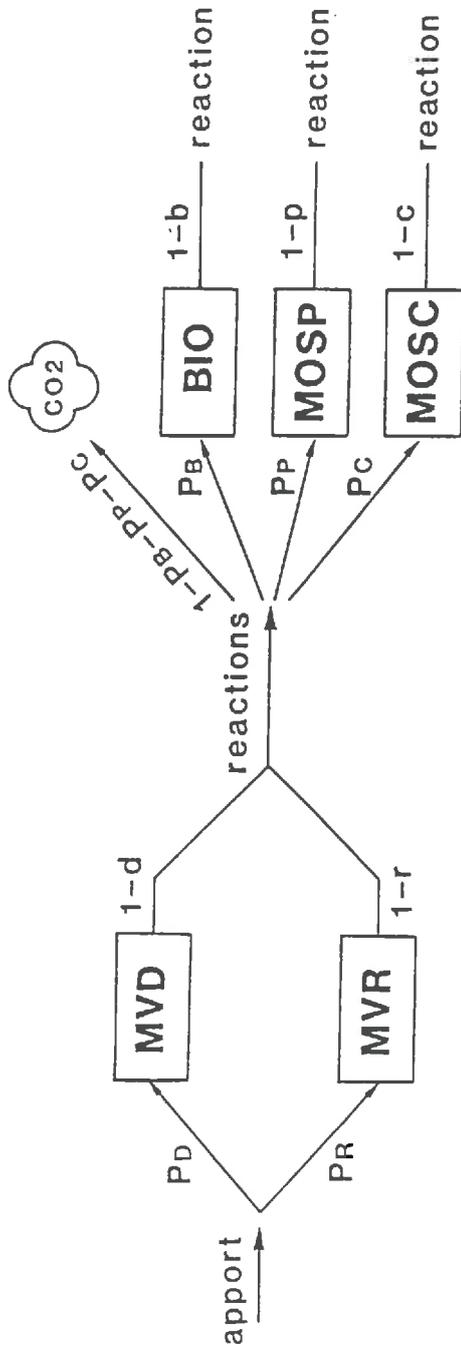
2) Modèle de HENIN-MONNIER-TURC (1959)

Dans ce modèle, les auteurs distinguent deux compartiments (cf. Fig. 2).

- Fraction labile ou facilement décomposable correspondant à la matière organique fraîche ou libre et persistant au plus quelques années dans le sol.

- Fraction stable correspondant à la matière organique

MODELE DE JENKINSON et RAYNER 1977



M.V.D. = matériel végétal décomposable

M.V.R. = matériel végétal résistant

BIO = biomasse

M O S P = matière organique stabilisée
physiquement

M O S C = matière organique stabilisée
chimiquement.

Figure II.3

liée dont la dégradation nécessite plusieurs décennies, voire plusieurs siècles.

Dans ce cas, on arrive à la relation :

$$A = (A_0 - m/d) e^{-\alpha t} + \frac{m}{\alpha}$$

$$B = (B_0 - m k_1/k_2) e^{-k_2 t} + k_1 (A_0 - \frac{m}{\alpha}) \left[\frac{\alpha}{\alpha - k_2} (e^{-k_2 t} - e^{-\alpha t}) \right] + \frac{m k_1}{k_2}$$

où

- α = coefficient de dégradation de la matière libre
- k_1 = coefficient isohumique
- k_2 = coefficient de minéralisation de la matière liée
- m = apport annuel de récolte.

$(1 - k_1) \alpha A$

Il est supposé que seul le compartiment matière organique libre (1) reçoit les apports organiques. Les produits perdus par ce compartiment (αA) subissent soit une minéralisation $[(1 - k_1) - \alpha A]$, soit un transfert et une transformation dans le compartiment matière organique liée (2).

Dans le cas d'un sol cultivé ou sous prairie, le compartiment (1) comprend aussi la masse racinaire. Ce même compartiment (1) demeure en évolution permanente et rapide du fait d'une vie microbienne très active dont les conséquences sont :

- Décomposition et minéralisation rapide des substrats labiles.
- Renouvellement permanent d'une partie de la fraction labile ou facilement décomposable après la mort des microorganismes.
- Elaboration des substances humiques stables du compartiment (2).

3) Modèle de JENKINSON et RAYNER (1977)

La conception générale de ce modèle est appuyée sur des expériences de marquage, de mesures de biomasse par

fumigation et de mesures d'activité ^{14}C . Ils présentent un modèle à 5 compartiments de labilité différente (cf. Fig. 3) :

- (1) = Résidus de récolte facilement décomposables, surtout celluloses et hémicelluloses, ayant des temps de demi-vie de quelques semaines.
- (2) = Résidus de récolte difficilement décomposables constitués surtout de lignine, dont le temps de demi-vie est estimé à quelques années
- (3) = matière organique physiquement protégée dont le temps de demi-vie est estimé à quelques dizaines d'années
- (4) = matière organique chimiquement stabilisée dont le temps de demi-vie est de quelques centaines d'années
- (5) = ces différents compartiments sont reliés entre eux par la biomasse qui constitue le 5ème compartiment. Le temps de demi-vie estimé de ce compartiment est de 2 ans.

Les deux premiers compartiments introduits ici sont assimilables au compartiment "matière organique libre" du modèle précédent.

Ce modèle a été appliqué au système expérimental de ROTHAMSTED. Les temps de demi-vie pour chaque compartiment sont de :

- 0,165 an pour les résidus de récolte facilement décomposables
- 2,3 ans pour les résidus de récolte difficilement décomposables
- 1,7 an pour le compartiment biomasse
- 50 ans pour le compartiment matière organique physiquement protégée
- 2000 ans pour le compartiment matière organique chimiquement stabilisée

Dans un calcul théorique et en utilisant les caractéristiques précédentes, JENKINSON et RAYNER ont estimé les

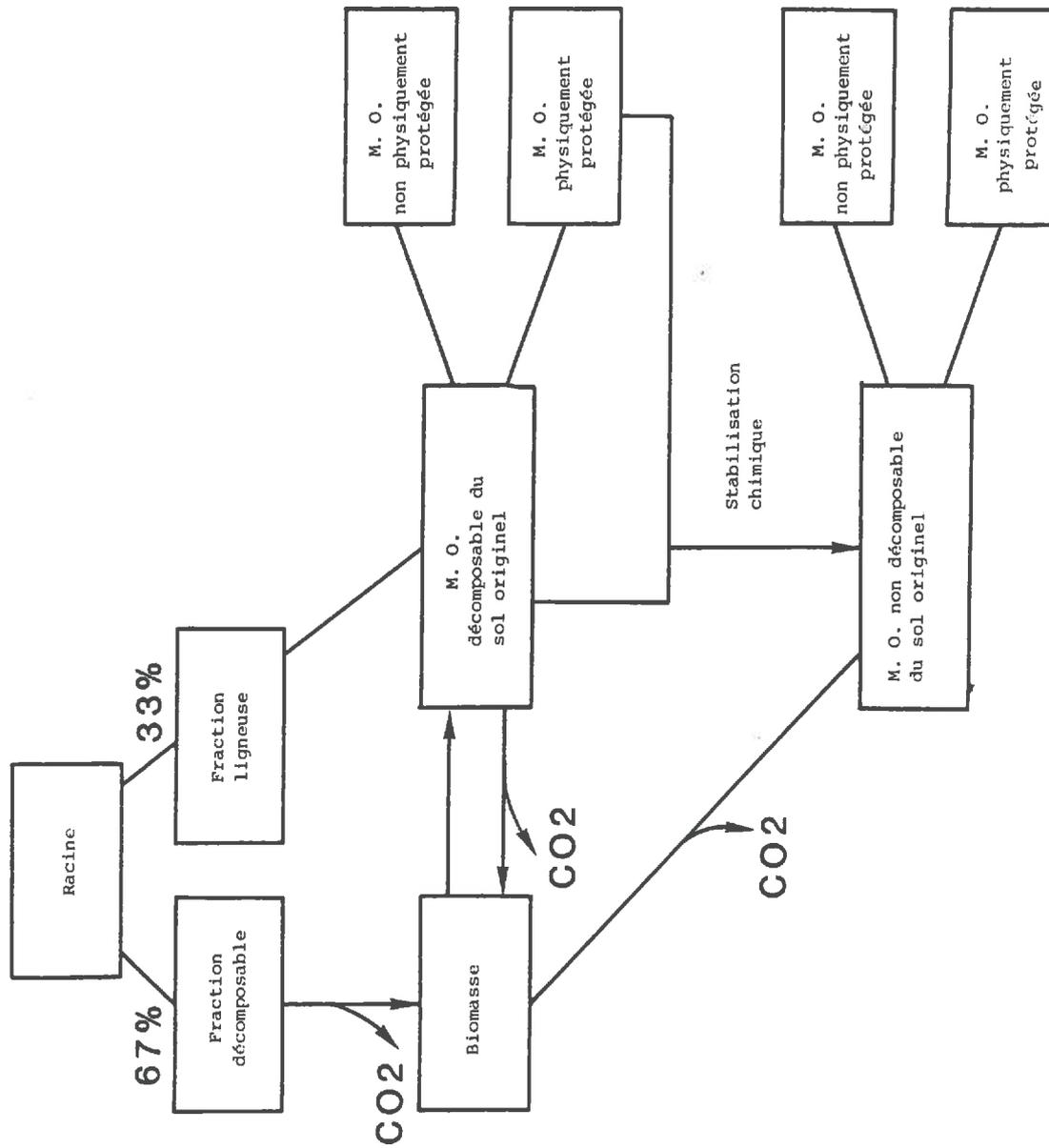


Figure II.4

teneurs en matière organique des différents compartiments quand le système est en équilibre et reçoit annuellement 1000 kg de carbone par hectare.

C'est ainsi qu'ils estiment que les quantités de matière organique chimiquement stabilisée et physiquement protégée sont respectivement de 12,2 t et 11,3 t par hectare (exprimées en carbone et pour l'horizon superficiel de 23 cm).

4) Modèle de VAN-VEEN et PAUL (1981)

Ces auteurs donnent une revue des différents types de cinétiques proposées et présentent pour un sol sous prairie (SASKATCHEWAN) un modèle à 8 compartiments régis par des cinétiques du 1er ordre (Fig. 4). La conception de ce modèle est très proche du précédent mais diffère par le nombre de compartiments introduits au niveau de la matière organique liée. Ces auteurs distinguent :

- Une matière organique chimiquement stabilisée qui peut être ou non physiquement protégée.
- Une matière organique non chimiquement stabilisée qui comme la précédente peut être ou non physiquement protégée.

5) Conclusion

Les différents modèles proposés sont tous complémentaires. On peut retenir qu'il existe 3 types de matière organiques à temps de demi-vie très différents. Il s'agit :

- Des matières organiques à temps de demi-vie de l'ordre de l'année (résidus de récoltes)
- De matières organiques liées à temps de demi-vie de l'ordre d'une dizaine d'années (matières organiques dites physiquement protégées)
- Des matières organiques liées à temps de demi-vie de l'ordre de plusieurs centaines d'années (matières organiques dites chimiquement stabilisées).

2.3 - INTERET DU TRAVAIL REALISE

Dans l'étude des relations matière organique - propriétés des sols ; nous avons signalé que les différents auteurs décrivaient les mécanismes d'action des composés organiques en faisant appel à leur :

- localisation : c'est ainsi que QUIRCK et WILLIAMS (1974) ont parlé de position stratégique
- vitesse de minéralisation (MONNIER, 1965)
- composition ou structure chimique : polysaccharides et stabilité de la structure (GUCKERT, 1973 ; GREENLAND, 1965 b) ; lipides et mouillabilité (HENIN et al., 1971 ; JAMBU et al., 1978).

Dans les études de turn-over de la matière organique, différents auteurs ont également trouvé des relations entre âge moyen apparent et structure chimique (SCHARPENSEEL, 1966) ou taux de renouvellement et structure chimique (PIERRE, 1979 ; MARIOTTI, 1982).

Dans ce travail, on se propose de vérifier si les différentes liaisons évoquées précédemment sont très générales et si, en particulier, les différents compartiments définis dans les modèles d'évolution de la matière organique (cf. paragraphe précédent) ont une localisation et une nature chimique données.

Cette démarche s'avère intéressante car il sera alors possible de relier l'acquis considérable sur la structure des substances humiques et les processus de l'humification à des observations plus globales telles que le turn-over de la matière organique, les relations matière organique - propriétés des

sols, voire même, l'évolution du comportement des matériaux terreux dans le temps et l'espace.

Pour illustrer notre démonstration, nous présenterons les modèles proposés par CHASSIN (1979) et TISDALL et OADES (1981).

Dans un travail antérieur, CHASSIN (1979) émet l'hypothèse que le complexe argilo-humique est différencié. C'est ainsi qu'il distingue :

- Une couche interne ayant un caractère aliphatique prononcé et insoluble dans les solvants alcalins. Cette fraction est donc assimilée à de l'humine.
- Une zone intermédiaire composée de molécules ayant un caractère aromatique marqué et classées comme acides humiques. Cette zone de complexe argilo-humique correspondrait à environ 2 ou 3 couches monomoléculaires.
- Une zone externe formée par une ou deux couches de molécules ayant un caractère aliphatique prononcé et correspondant aux acides fulviques.

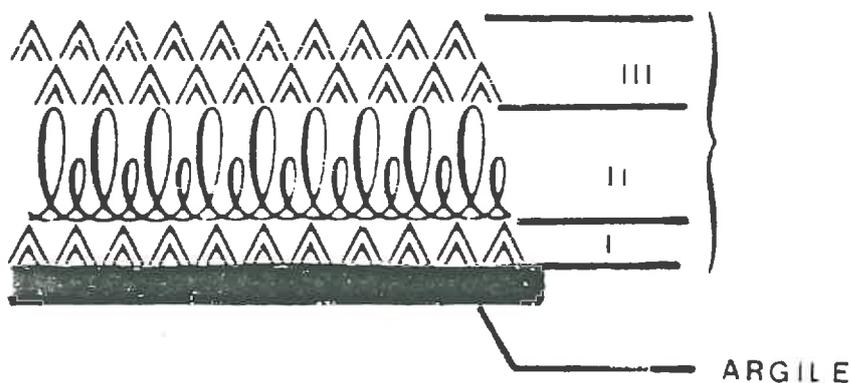


Figure II.5. : Représentation schématique du complexe argilo-humique (I et III: molécules ayant un caractère aliphatique prononcé ; II : molécules ayant un caractère aromatique prononcé).

In Science du Sol. CHASSIN ; 1979.

Par ^{référence} analogie aux modèles précédents les substances organiques constituant les couches les plus externes subiraient un turn-over rapide (grande accessibilité physique et structures chimiques facilement biodégradables). Par contre, les couches internes subiraient peu de transformations par suite de leur localisation et de leur structure chimique (caractère aromatique et teneur en cations polyvalents élevés).

A partir de ce modèle qui admet une relation étroite entre nature chimique et localisation, l'auteur décrit les mécanismes d'action de la matière organique sur les propriétés des sols en termes de structures macromoléculaires (CHASSIN, 1979).

Dans une récente publication TISDALL et OADES (1981) proposent que la stabilisation de la structure se ferait à plusieurs niveaux :

- niveau nanométrique : à cette échelle, les ciments mis en cause sont les acides humiques et les oxyhydroxydes de fer
- niveau micrométrique : ici les agents qui assurent la stabilité seraient essentiellement les polysaccharides
- niveau millimétrique : comme l'avait déjà signalé MONNIER (1965) les êtres vivants (racines, mycéliums) jouent un rôle essentiel.

Dans ce modèle, il y a des liaisons explicites entre nature-localisation et fonction de la matière organique.

C'est en s'appuyant sur ces deux modèles que CHASSIN (1983) analyse les conséquences des exportations des pailles sur la stabilité structurale. On peut prévoir que la structure se dégradera :

- à l'échelle millimétrique car la non restitution de résidus de récolte, cellulose et hémicellulose surtout, entraînera une diminution de la biomasse, donc des

éléments de stabilisation de la structure à l'échelle millimétrique.

- à l'échelle micrométrique car l'activité biologique, sans régénération des couches externes du complexe argilo-humique, entraînera une disparition rapide des molécules ayant un caractère aliphatique prononcé, d'où une diminution de la stabilité structurale.

Dans les sols ayant une stabilité structurale faible, l'exportation des pailles se traduira par une dégradation importante de la structure. On devra donc instaurer des pratiques agricoles qui favoriseront :

- le développement racinaire pour stabiliser la structure aux échelles millimétriques (emballage) et micrométriques (accumulation des polysaccharides).
- l'accumulation de corps microbiens et mycéliens en enfouissant des amendements organiques fermentescibles, engrais verts notamment.

2.4 - CONCLUSION

rechercher
Dans ce travail, il s'agit de démontrer s'il existe des relations directes entre localisation, fonction, structure et turn-over de la matière organique des sols. C'est cet aspect que nous avons symbolisé sur la figure II.6.

Il s'agit avant tout d'une contribution théorique qui doit permettre de mieux analyser et expliquer les mécanismes d'action de la matière organique sur les propriétés physiques et physico-chimiques des sols.

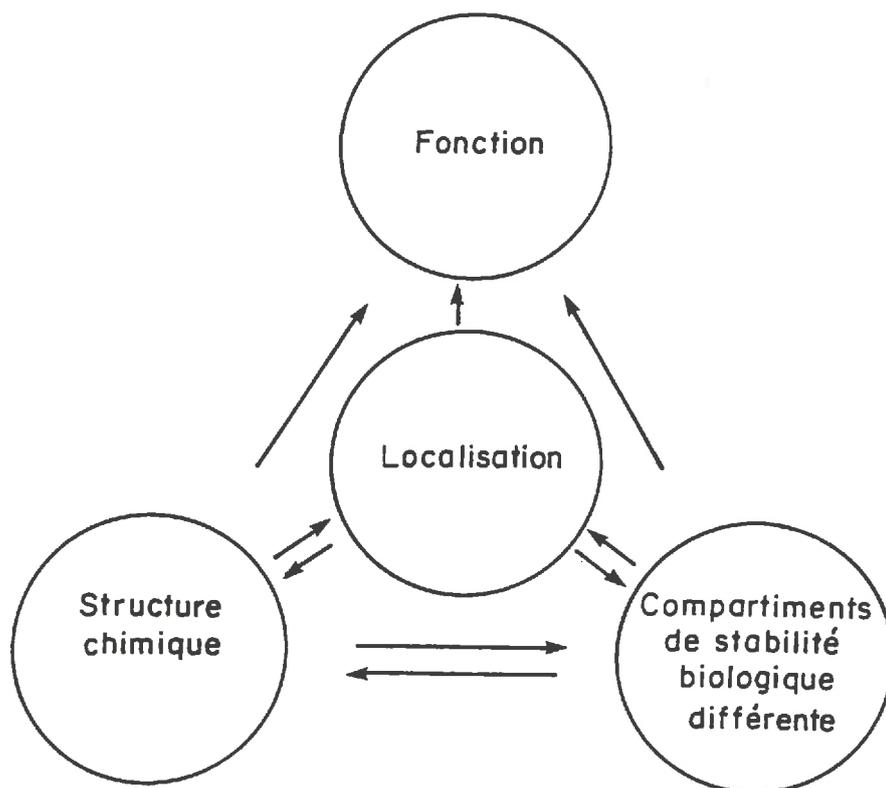


Figure II. 6. : Représentation schématique de l'objet de travail.

En particulier, la définition de procédures permettant de caractériser qualitativement et quantitativement les compartiments de la matière organique sera très utile pour simuler l'évolution du statut organique des sols.

Pour atteindre ces objectifs, il s'avère très intéressant de caractériser la localisation et la structure des matières organiques présentes dans le système expérimental dit des "42 parcelles". En effet, la réalisation des différents traitements depuis plus de cinquante ans aura induit des modifications quantitatives importantes de certains compartiments ; en particulier dans les parcelles "témoin" et celles recevant du fumier. C'est ainsi que :

- les compartiments labiles auront soit augmenté (cas des parcelles recevant du fumier) soit diminué (cas des parcelles témoins ne recevant aucun amendement organique)
- les compartiments stables ayant des temps de demi-vie élevés n'auront pas évolué d'une façon significative.

Enfin, nous comparerons les résultats avec ceux obtenus sur des parcelles voisines sous pelouse.

CHAPITRE III

ETUDE DE LA DISTRIBUTION
DE LA MATIERE ORGANIQUE

3.1 - INTRODUCTION.....	p. 33
3.2 - CARACTERISTIQUES DU SOL ETUDIE - EFFET DES TRAITEMENTS	p. 34
3.2.1. Caractérisation du sol	
3.2.2. Caractérisation de la matière organique	
3.3 - DISTRIBUTION DE LA MATIERE ORGANIQUE DANS LES AGREGATS.....	p. 43
3.3.1. Situation du problème	
3.3.2. Méthodologie	
3.3.3. Résultats	
3.3.4. Discussion	
3.4 - DISTRIBUTION DE LA MATIERE ORGANIQUE DANS LES DIFFERENTES FRACTIONS GRANULOMETRIQUES EXTRAITES	p. 55
3.4.1. Analyse du problème	
3.4.2. Méthodologie	
3.4.3. Résultats du fractionnement	
3.4.4. Répartition granulométrique de la matière organique	
3.4.5. Discussion des résultats	
3.4.6. Conclusions	
3.5 - CONCLUSIONS DU CHAPITRE III	p. 91

3.1 - INTRODUCTION

Dans le paragraphe précédent, nous avons montré l'intérêt d'étudier s'il y a une relation entre localisation, nature chimique et propriétés de la matière organique des sols. Nous avons également vu les raisons pour lesquelles il était intéressant de réaliser ce travail sur des matériaux terreux issus du dispositif expérimental des 42 parcelles.

Dans ce chapitre, nous allons nous attacher à montrer si les modes de gestion du sol ont induit des transformations suffisamment importantes pour que l'on puisse déceler des différences significatives attribuables aux compartiments introduits dans les modèles d'évolution de la matière organique.

C'est pour cette raison que nous étudierons successivement les caractéristiques globales du sol et de la matière organique ainsi que la distribution de la matière organique dans les agrégats et les différentes fractions granulométriques. Dans chaque partie, et si cela s'avère nécessaire, des précisions sur la méthode expérimentale seront données.

3.2 - CARACTERISTIQUES DU SOL ETUDIE - EFFETS DES TRAITEMENTS

3.2.1. Caractérisation du sol

de carbonatation

Le sol sur lequel l'essai a été implanté est constitué par le classique limon des plateaux. Il provient de la décalcification de l'Ergeron sur une profondeur d'un mètre environ, et représente, du point de vue pédologique un sol légèrement lessivé. Au plan agronomique c'est la terre à blé et à betterave par excellence (HENIN, 1939). *Bof!*

Sa composition, au moment de l'installation du dispositif expérimental, était :

- Argiles (0 - 2 μm)	15,3 %
- Limons (2 - 20 μm)	15,3 %
- Sables fins (20 - 200 μm)	61,3 %
- Sables grossiers (200 - 2000 μm)	2,6 %
- Calcaire	0
- Matière organique	3,9 %
- Capacité d'échange cationique	0,152 eq/kg
- Teneur en azote	0,19 %
- Rapport C/N	11,9

De quand date-t-elle l'analyse?

l'analyse de la p. 36 est surestimée

→ peut au feu?

a) Résultats

Dans le tableau III.1, on a reporté les caractéristiques des matériaux terreux issus des traitements "témoin", "Pelouse" et "Fumier".

- La granulométrie des matériaux terreux issus des trois traitements est identique. On remarque une variation de teneurs en matière organique dans une phase minérale constante.

- Les teneurs en fraction fines (argiles et limons) des matériaux terreux issus des trois traitements sont supérieures à celle trouvée initialement par HENIN. Cette différence doit être attribuée aux méthodes d'analyses et, vraisemblablement, à une mauvaise dispersion.

- Les teneurs en matière organique et en azote n'ont que faiblement augmenté dans la parcelle "fumier" malgré les quantités importantes d'amendements organiques apportés.

- Le non apport d'amendement organique et l'absence des racines a provoqué une forte diminution de la teneur en matière organique dans la parcelle "témoin" car on passe de 3,9 % à 1,18 %, soit une diminution de près de 70 %.

- Les rapports C/N varient assez peu sauf peut être pour la parcelle témoin ou le rapport est voisin de 9.

b) Discussion des résultats

Dans les trois traitements choisis, on observe bien une variation des teneurs en matière organique à partir de l'état initial alors que la composition granulométrique n'a pas varié. On se trouve bien dans le cadre de l'application des modèles décrits précédemment avec toutefois quelques variantes selon les traitements (cf. paragraphe précédent).

3.2.2. Caractérisation de la matière organique

a) Extractibilité du carbone

Pour savoir si les traitements ont induit des

= 2C ?
= 1.93C ?

→ + argileux /
qui au départ

Traitements	M.O. (%)	N (%)	C.E.C. (meq/100g)	Argile	Limons	Sables fins	Sables grossiers
				0 - 2 μm %	2 - 20 μm (%)	20-50 μm (%)	50-2000 μm %
Témoin	1,18	0,076	10,3	18,6	22,5	36,4	22,5
Fumier	4,81	0,277	14,1	18,6	22,5	36,4	22,5
Pelouse	2,34	0,131	10,9	18,7	21	37,4	23

TABLEAU III.1 - Caractéristique des matériaux terreux issus des traitements "Témoin", "Fumier", "Pelouse".

$\sigma_0 = 1.72C ?$

Traitements	C %	en mg par gramme de sol			en g pour 100 g de carbone		
		C. extractible		C non extractible	C. extractible		C non extractible
		pyro	soude		pyro	soude	
Témoin	7,1	1,63	1,10	5,0	23	15,5	70,4
Fumier	29	9,47	4,80	14,1	32,7	16,5	48,6
Pelouse	13,6	5,30	1,70	6,18	39	12,5	45,4

TABLEAU III.2 - Extractibilité de la matière organique.

différences sur l'extractibilité de la matière organique, les quantités de carbone solubilisées par le pyrophosphate et la soude ont été mesurées. De même, la quantité de carbone non extractible a été déterminée par oxydation bichromique (tableau III.2).

. l'extractibilité du carbone par les réactifs alcalins est de 30 % dans la parcelle témoin alors qu'elle est de 45 % pour le sol sous pelouse et de 50 % dans la parcelle recevant du fumier. Comme le carbone extractible représente les fractions acides fulviques - acides humiques, on peut conclure que la perte de carbone s'accompagne par une diminution de ces composés.

. la fraction non extractible, dénommée habituellement humine, est la plus abondante. Elle représente 70 % du carbone total dans la parcelle témoin, 49 et 45 % pour les parcelles recevant du fumier ou sous pelouse.

Il est évident qu'à la vue de ces résultats on est amené à faire un parallèle entre extractibilité et stabilité biologique de la matière organique. En effet, on note que l'extractibilité décroît quand la quantité de carbone moyennement stable diminue.

d'où sort cette donnée ?

Cette observation est assez proche d'autres réalisées sur divers écosystèmes et qui ont amené les auteurs à émettre des hypothèses de relations entre nature chimique et stabilité biologique ; à savoir que (DUCHAUFOR, 1976 ; 1979) :

- la fraction labile serait associée aux résidus végétaux, insolubles dans les réactifs alcalins et abondants sous couvert végétal.

- la fraction moyennement stable comprendrait essentiellement les acides fulviques qui résultent soit de l'insolubilisation des "précurseurs solubles" au contact de la phase minérale, soit de la minéralisation de composés plus polymérisés (acides humiques, humine). Dans cette fraction, on trouverait également une partie des acides humiques.

- la fraction stable correspond aux acides humiques les plus polymérisés et aux composés insolubles regroupés sous le terme générique d'humine. Dans ce dernier cas, il a été démontré que c'est la forme la plus condensée qui s'accumule alors que les formes les moins condensées proches de la matière organique libre, sont biodégradables.

Mou
Dans notre étude, les résultats analytiques montrent que la quantité d'humine a diminué (en valeur absolue dans la parcelle "témoin"). Toutefois, on note que cette fraction est relativement importante, ce qui confirme que l'accumulation relative de composés peu solubles est concomitante d'un enrichissement en produits biologiquement stables.

alors qu'il aurait perdu 70%? équilibre final?

b) Hydrolyse acide de l'azote

soyez fairs l'hypothèse que l'azote est stable et les autres

Dans les sols, 95 % de l'azote se trouve sous forme organique. Cet azote est incorporé dans des complexes amino-phénoliques, humo-protéiques et argilo-protéiques dont l'importance et le degré de liaison varie selon l'état de la matière organique et le type pédogénétique du sol. Peu de molécules azotées simples se rencontrent à l'état libre et les différentes formes chimiques : (amino-acides, hexosamine et autres) sont intégrées dans des structures plus complexes.

Comme pour le carbone, une correspondance entre stabilité à l'hydrolyse acide et stabilité biologique a été proposée (PAUL, 1964) ; à savoir :

- fraction labile et azote aminé contenu dans la matière organique libre et la matière organique fraîche.

- fraction moyennement stable et azote aminé associés aux chaînes latérales polypeptidiques fixées aux noyaux aromatiques, voire à des polypeptides adsorbés sur les acides humiques. Ces composés sont intégrés dans des structures peu polycondensées et sont rapidement biodégradés par la biomasse.

- fraction stable et azote non hydrolysable : ce pool d'azote est sans doute le plus hétérogène. Il correspond aux

polycondensats aromatiques des acides humiques et de l'humine. CARBALLAS et al., (1972) ; JOCTEUR - MONROSIER et al., (1977) considèrent que les composés les plus résistants sont ceux qui libèrent le moins d'azote hydrolysable.

Pour estimer les différentes formes d'azote, nous avons utilisé la méthode d'hydrolyse acide par reflux avec HCl 6N pendant 12 heures (BREMNER, 1965).

Sur les trois échantillons, nous avons estimé les quantités d'azote non hydrolysable et hydrolysable. Pour cette dernière, on prend en compte l'azote ammoniacal, l'azote amidé, les amino-sucres et l'azote non identifié. Pour ce dernier (ANDREUX, 1981) a montré qu'il peut se produire des artéfacts aux cours de l'hydrolyse pendant un temps prolongé (12 heures) par recombinaison d'acide aminés avec des produits d'hydrolyse et des hydrates de carbone.

Dans le tableau III.3, on a reporté les quantités d'azote appartenant aux différentes formes exprimées soit en mg/gramme de sol, soit en g pour 100 g d'azote.

Les résultats montrent qu'avec les taux de matières organiques varient les proportions relatives des formes d'azote. De même, le système de culture et l'effet racinaire agissent sur la répartition et les teneurs de ces formes. Ainsi, on trouve 85 % d'azote hydrolysable et 15 % d'azote non hydrolysable dans le sol sous pelouse, alors que le témoin (sol nu) contient 75 % d'azote hydrolysable et 25 % d'azote non hydrolysable. Pour ce dernier, la maturation des matières organiques a entraîné une diminution des formes hydrolysables et une augmentation de l'azote amide et ammoniacal par rapport à l'aminé.

Là encore et comme pour le carbone, on est amené à faire un parallèle entre quantité d'azote hydrolysé et stabilité de la matière organique. En effet, on observe que l'accumulation de produits stables dans la parcelle témoin s'accompagne d'une diminution des formes hydrolysables. Si l'on se réfère aux travaux de HETIER et al., (1975), l'azote incorporé dans les

Traitements	N _t (%)	Azote (mg/g de sol)			Azote (g/100 g d'azote)		
		N. hydrolysable		N non hydrolysable	N. hydrolysable		N non hydrolysable
		N. NH ₂	N amide + NH ₄		N. NH ₂	N amide + NH ₄	
Témoin	0,76	0,32	0,24	0,17	42,1	31,6	22,4
Fumier	2,77	1,26	0,73	0,65	45,5	26,4	23,5
Pelouse	1,31	0,70	0,35	0,18	53,4	26,7	13,7

TABLEAU III.3 - Caractéristiques de l'azote organique.

Traitements	Poly- saccharides en mg/100 g de sol	Poly- saccharides en G/100 g de M.O.
Témoin	25,7	2,1
Fumier	63,78	1,28
Pelouse	40,20	2,2

TABLEAU III.4 - Quantités de polysaccharides en fonction des traitements.

*ekouvi C
ou oua
(plufof C)
Polysacch.*

matières organiques stables serait non hydrolysable dont une partie est formée d'acides aminés stables fortement fixés sur le noyau polycyclique.

b) Etude des polysaccharides

D'une façon générale, les polysaccharides représentent des polymères de poids moléculaires élevés formés à partir de sucres simples (monosaccharides), de sucres aminés et d'acides uroniques (HORTEN et WOLFROM, 1963). Ces composés sont très hétérogènes et se trouvent à des teneurs variables dans les sols.

Selon MAHTA et al. (1963), les polysaccharides peuvent représenter 5 à 20 % de la matière organique totale. Bien que leurs structures, leurs propriétés et leurs fonctions demeurent encore obscures et hypothétiques. Ces composés trouvent leur origine essentiellement dans le matériel végétal et accessoirement dans les corps microbiens.

Dans notre cas nous avons utilisé la méthode proposée par BRINK et al., (1960) et modifiée par GUKERT (1973). Avec cette méthode, on détermine le pouvoir réducteur de sucres de types hexoses, méthylhexoses et 6-désoxyhexoses libérés lors de l'hydrolyse acide.

Dans le tableau III.4, on a reporté les quantités de polysaccharides (exprimées en mg pour 100 g de sol, et en grammes pour 100 g de matières organiques) pour les différents traitements.

L'examen des résultats suggère que la quantité de polysaccharides croît avec la teneur en matière organique, à savoir :

CT%
7.1 - 26 mg pour 100 g de sol "témoin"
13.6 - 40 mg pour 100 g de sol sous pelouse
29.0 - 64 mg pour 100 g de sol recevant du fumier.

ou avec les
apports annuels
de N et P.
org. fraction
↓
activité bio.

Par contre, ce classement est modifié quand on compare les teneurs de la matière organique en polysaccharides, à savoir :

- 2,2 g pour 100 g de matière organique dans le sol sous pelouse
- 2,1 g pour 100 g de matière organique dans le sol témoin
- 1,28 g pour 100 g de matière organique dans le sol recevant du fumier.

Il est vraisemblable que la richesse de la matière organique en polysaccharides dépende du type d'occupation des sols (pelouse) et de la nature de la matière organique. Par contre, il n'y aurait pas de relation directe entre teneur totale en matière organique et richesse en polysaccharides.

Pour les sols sous pelouse, la richesse en polysaccharides est à relier au matériel végétal, aux exudats racinaires et à l'activité biologique sous prairie. Corrélativement à cette richesse en polysaccharides, la stabilité structurale est grande.

*(résultats) ? (attente ?
vérifier ici)*

Dans ces écosystèmes, les sucres représentent une quantité importante de métabolites formés lors de biodégradation des tissus végétaux provenant des racines. Cette richesse en polysaccharides est également à rapprocher de la forte proportion d'acide fulviques extraits du sol sous pelouse.

Les teneurs élevées en polysaccharides dans la matière organique trouvée dans la parcelle témoin sont a priori plus surprenantes. Cette observation est toutefois en accord avec celles de MAYAUDON et SIMONART (1965) qui suggèrent que les polysaccharides peuvent être stabilisés après adsorption.

Dans son travail, GUKERT (1973) montre que les polysaccharides s'accumulent dans les fractions non extractibles par les produits alcalins. Cette observation est d'ailleurs conforme à celle de DOORMAR (1967).

Dans notre cas, on observe bien les mêmes phénomènes, à savoir accumulation de polysaccharides dans la parcelle témoin qui contient les 3/4 de sa matière organique sous forme d'humine (cf. tableau III.2).

ce qui ne veut pas dire que

à priori les polysaccharides sont dans cette fraction.

3.3 - DISTRIBUTION DE LA MATIERE ORGANIQUE DANS LES AGREGATS

3.3.1. Situation du problème

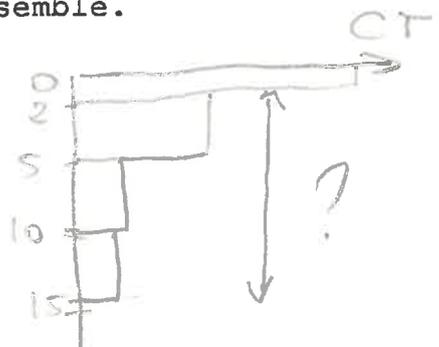
Dans le paragraphe précédent, nous avons pu suggérer qu'il existait vraisemblablement un parallélisme entre extractibilité du carbone, hydrolysabilité de l'azote et stabilité biologique. Cette conclusion, obtenue sur le sol entier, ne permet pas de savoir s'il y a une relation entre propriétés chimiques de la matière organique et la localisation dans le milieu poreux.

Dans cette partie, il s'agit de voir si la matière organique est répartie de façon homogène dans le milieu poreux de telle sorte que le fractionnement granulométrique puisse être réalisé sur le matériau terreux pris dans son ensemble.

3.3.2. Méthodologie

a) Echantillonnage

très marquée à la pelouse



Pour chaque traitement, huit carottes de 4 cm de diamètre et de 15 cm de longueur ont été prélevées, mélangées et séchées à 25°C. Dans le cas du sol sous pelouse, on a éliminé, avant chaque carottage, une partie de l'horizon supérieur où s'accumule les débris végétaux.

Sur chaque échantillon les opérations suivantes ont été réalisées :

- broyage d'une aliquote (environ 100 g) sur laquelle on détermine la teneur en carbone total.
- tamisage en trois familles d'agrégats ayant des tailles de 1 à 2 mm, de 0,5 à 1 mm et inférieure à 0,5 mm.
- sur chaque famille d'agrégats, broyage d'une aliquote (environ 20 g) sur laquelle on déterminera le carbone total.
- prélèvement, en 5 fois, d'environ 100 agrégats dont le diamètre est compris entre 1 et 2 mm. Sur chaque agrégat, on détermine la teneur en carbone total.

b) Dosage du carbone

Après détermination de la teneur en eau des différents échantillons, chaque prélèvement ou agrégat est chauffé à 1500°C, pendant 10 minutes, dans un courant d'oxygène. Le dosage du CO₂ obtenu par combustion de la matière organique est réalisé dans une cellule associée à un ensemble électronique de coulométrie.

- Principe de la méthode : la cellule de mesure contient une solution aqueuse de perchlorate de baryum maintenu à pH constant, voisin de 10, par électrolyse. L'introduction de gaz carbonique provoque une diminution du pH immédiatement compensée par électrolyse. La quantité d'électricité utilisée pour retourner au pH d'équilibre, proportionnelle à la quantité de gaz carbonique introduite, est mesurée par le coulomètre.

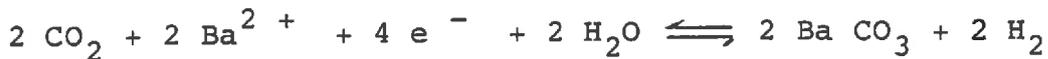
- Description de la cellule de titrage : la cellule de titrage se compose d'un compartiment référence, d'un compartiment anodique et d'un compartiment cathodique séparés par des diaphragmes de porcelaine poreuse. Dans le compartiment cathodique où est injecté le gaz carbonique, on trouve une électrode de verre et une électrode platine permettant l'électrolyse de la solution de perchlorate de baryum. Dans le

compartiment anodique contenant l'électrode platine, on trouve une solution de perchlorate de Baryum à 15 % saturée en carbonate de baryum. Enfin dans la cellule dite de référence, on trouve une électrode Ag/Ag Cl (référence de l'électrode de verre) plongée dans une solution saturée en chlorure de sodium.

- Réactions observées : Dans le compartiment cathodique



soit globalement (1) + (2) :



Dans le compartiment anodique :



Les diffusions étant empêchées par la présence des diaphragmes en porcelaine, il convient de considérer ces deux réactions comme indépendantes. La connaissance des réactions électrochimiques mises en jeu et la possibilité de mesurer exactement la quantité d'électricité consommée, font de cette méthode, une méthode absolue. Par ailleurs, la connaissance des réactions permet facilement de relier à une quantité d'électricité une quantité de carbone (1 coulomb \Rightarrow 6 g. de carbone). Enfin, la grande sensibilité du coulomètre fait que ce matériel peut-être utilisé pour des microdosages (500 μg de C) où des macrodosages en mettant entre le four et la cellule de dosage une pompe diviseuse de gaz.

3.3.3. Résultats

a) Effet de la taille des agrégats

Pour chaque traitement, nous avons déterminé la teneur en carbone d'une aliquote avant et après tamisage. Ces déterminations, moyenne de 20 mesures pour chaque traitement, montrent que le tamisage du sol n'a pas d'effet sur la répartition du carbone, c'est-à-dire que les teneurs en carbone sont identiques sur l'échantillon global et dans chaque fraction.

résultats ?

Ces mesures ont également permis de tester la reproductibilité de la méthode. C'est ainsi que nous avons pu vérifier que la variabilité des mesures ($\pm 0,4 \%$) était conforme à la précision annoncée pour la méthode ($\pm 0,5 \%$).

b) Répartition du carbone dans les sols sous-pelouse et sans culture ne recevant pas d'amendements organiques

Dans ces deux cas précis, *pré individuellement* les teneurs en carbone déterminées sur environ 100 agrégats se répartissent autour de la valeur moyenne de telle sorte que l'on peut admettre que tous les agrégats ont la même teneur en matière organique, c'est-à-dire qu'ils appartiennent tous à une même population.

Dans le cas du sol témoin des 42 parcelles (sol nu sans apport d'amendements organiques), la population des agrégats dont la taille est comprise entre 1 et 2 mm a les caractéristiques suivantes :

$$c_1 = 10,1 \% \quad s_1 = 1 \%$$

7,1 (tableau p. 36)

Dans le cas du sol sous pelouse, les caractéristiques

de la population sont :

$$c_2 = 20,7 \%$$

$$s_2 = 1,5 \%$$

B.6 tabl - p.36.

(où C est la teneur en carbone exprimée en % de la masse de l'échantillon et S l'écart type).

Il est également probable que la variance des mesures ne soit pas uniquement due à la précision de la méthode.

c'est certain (cf. précision sur dosage par agrégat)

c) Répartition du carbone dans le sol sans-culture recevant 100 tonnes/ha/an de fumier

Dans ce cas, la distribution des teneurs en matière organique des agrégats n'est plus du tout du même type (cf. figure III 1). En effet, on observe quatre populations ayant les caractéristiques du tableau M 5.

Pour tester s'il s'agit de populations différentes, nous avons supposé que les populations les plus proches étaient issues d'une même famille d'agrégats. Dans ces conditions, la moyenne et l'écart type de la différence des moyennes X_i et X_{i+1} est donnée par (SPIEGEL, 1982) :

$$\mu_{\bar{x}_i - \bar{x}_{i+1}} = 0$$
$$\sigma_{\bar{x}_i - \bar{x}_{i+1}} = \sqrt{\sigma_i^2 / N_i + \sigma_{i+1}^2 / N_{i+1}}$$

où l'on a considéré que les écarts types d'échantillonnage étaient des estimations de σ_i et σ_{i+1} . Par suite :

$$z_i = (x_i - x_{i+1}) / \sigma_{\bar{x}_i - \bar{x}_{i+1}}$$

$$\text{soit } z_1 = (27,0 - 28,8) / (1,1/41 + 0,45/22)^{1/2} = - 8,28$$
$$z_2 = (28,8 - 30,8) / (0,45/22 + 0,45/21)^{1/2} = - 9,77$$
$$z_3 = (30,8 - 35,2) / (0,45/21 + 1,1/23)^{1/2} = - 16,72$$

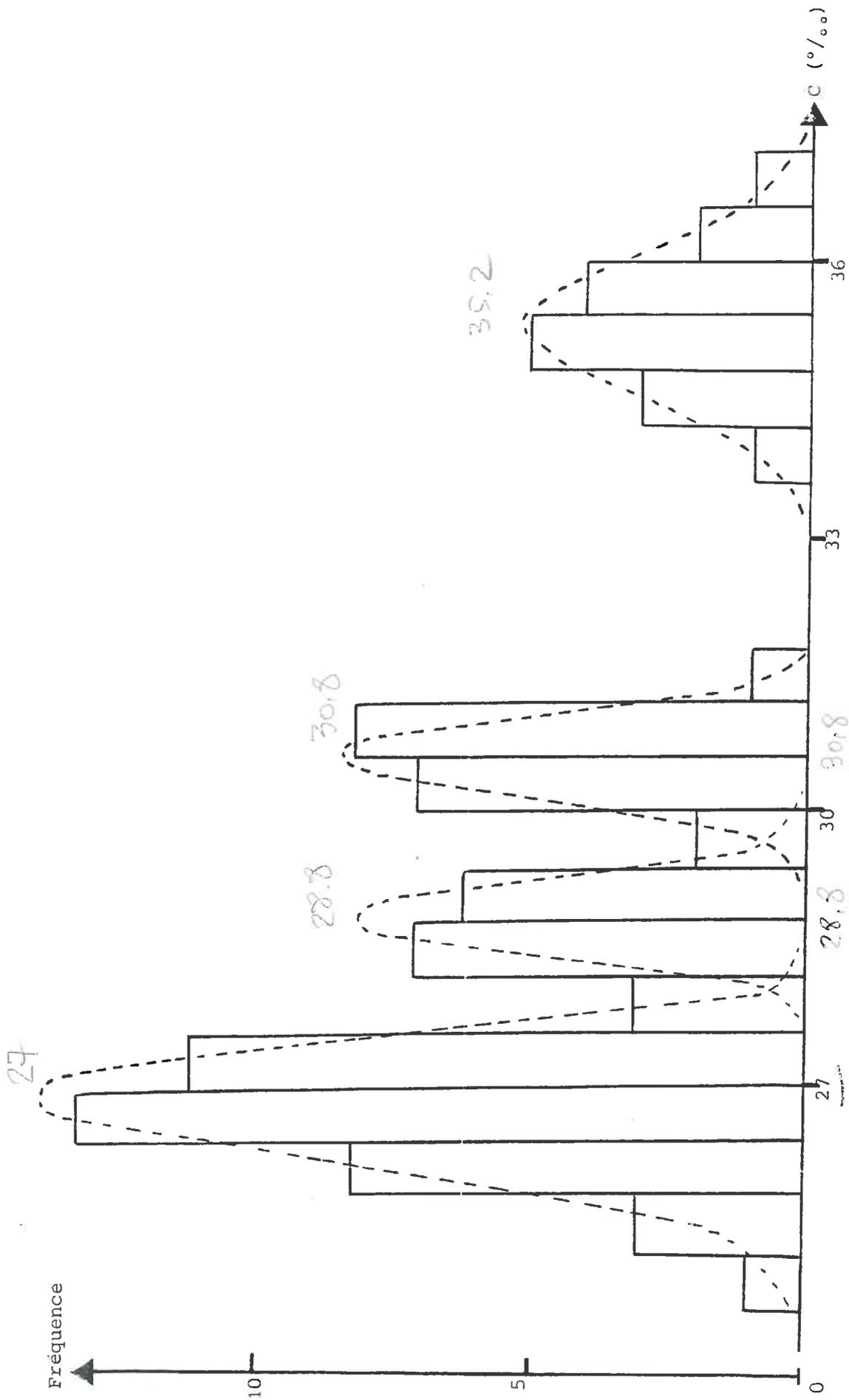


Figure III.1.1. : Distribution de la teneur en Carbone dans les agrégats (1 mm < d < 2 mm) provenant d'un sol nu recevant du fumier.

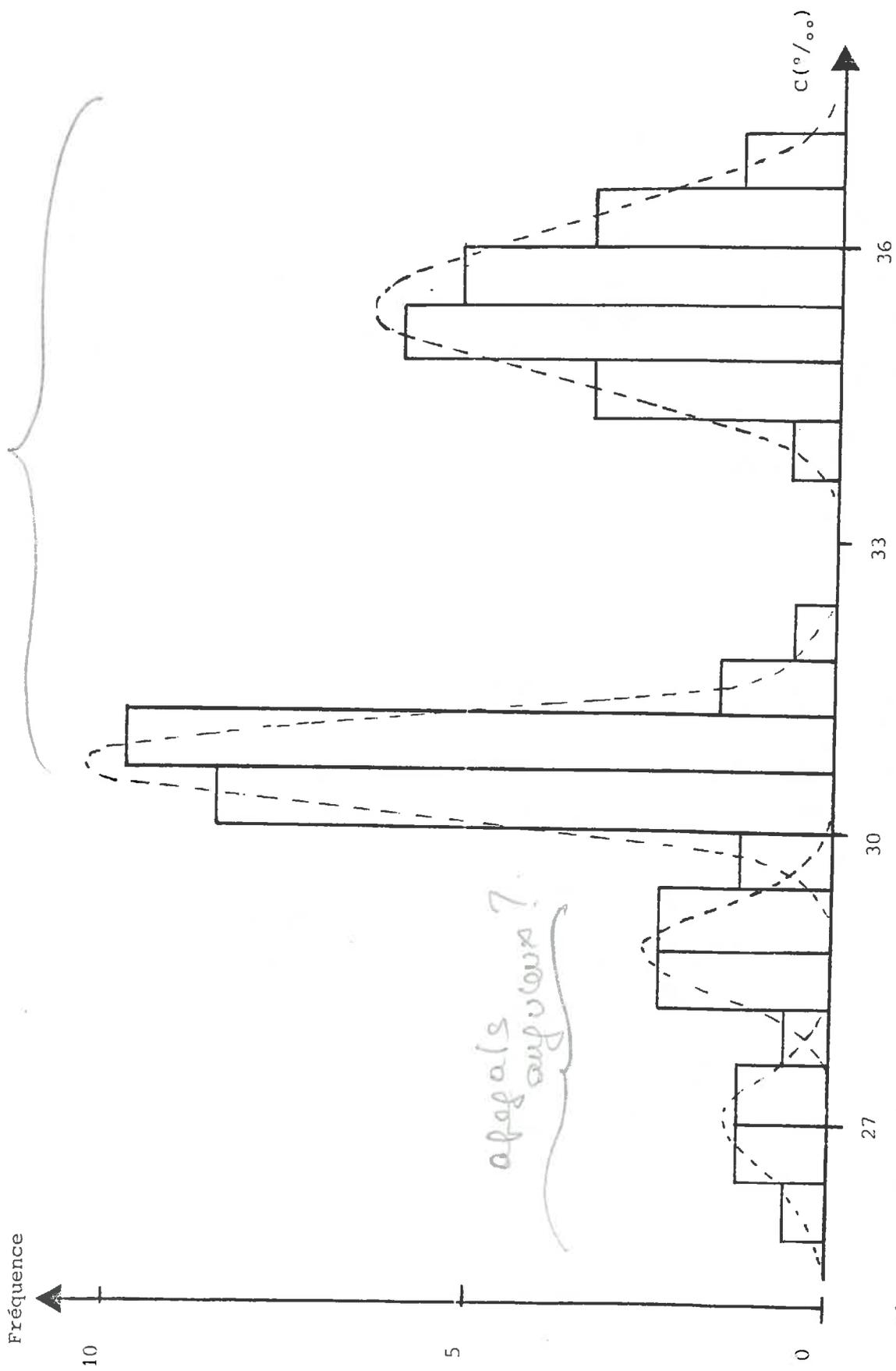
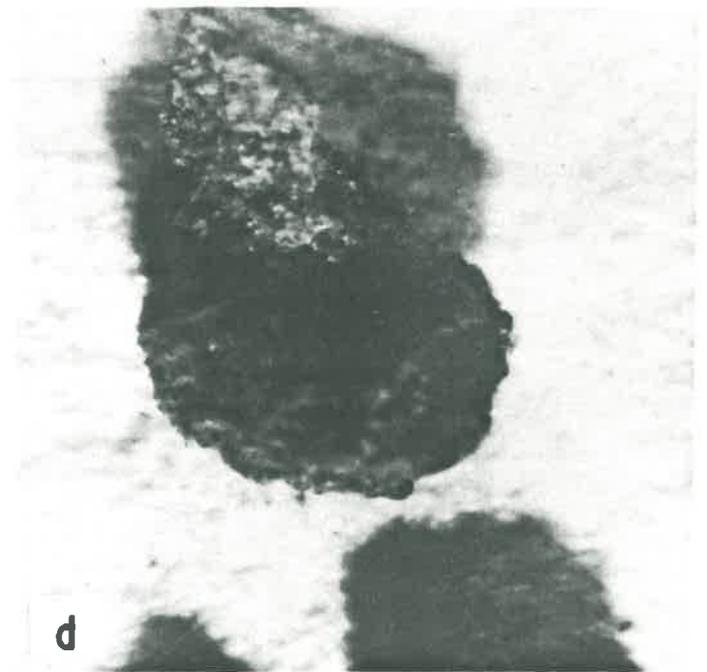
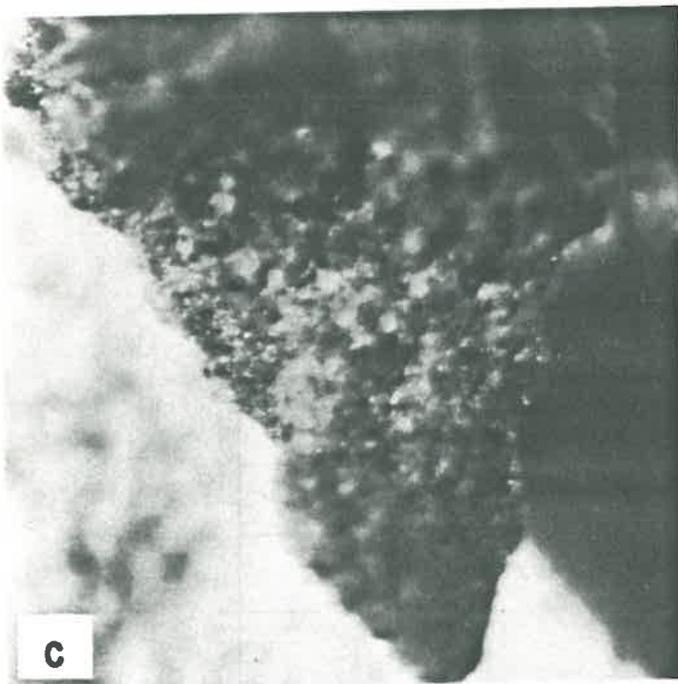
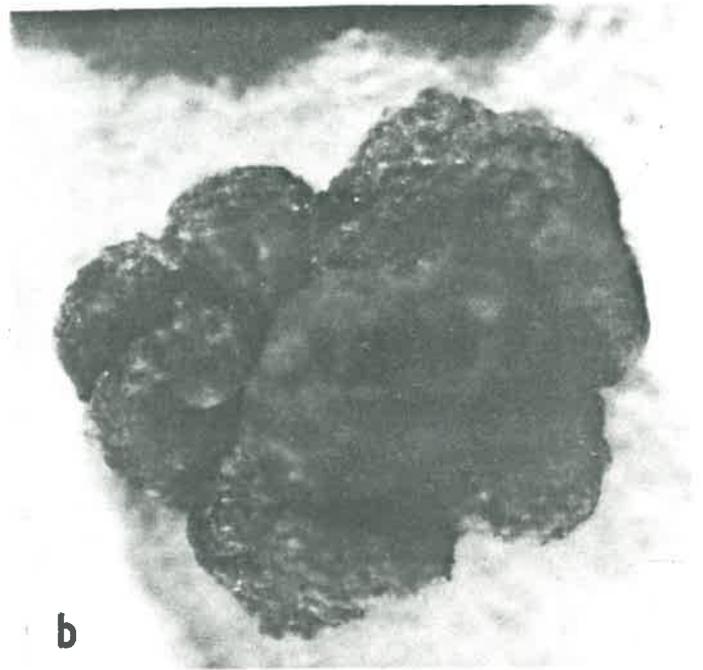
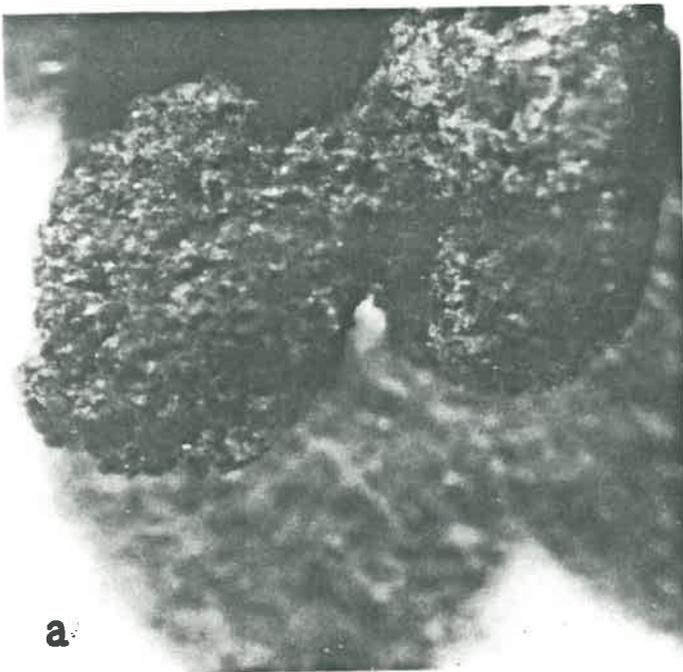


Figure III.2. : Distribution de la teneur en carbone des agrégats triés provenant d'un sol nu recevant du fumier.

PLANCHE A



Differences entre a) b) c) d)
Sipaul. / (1) et (2) p. 51

Bien que le nombre d'individus soit un peu faible dans les trois dernières familles, on peut admettre que les familles d'agrégats mises en évidence sont bien différentes car, au seuil 0,01, Z a pour valeur - 2,58.

d) Observations morphoscopiques

L'examen à la loupe binoculaire révèle des agrégats ayant des formes assez différentes (planches a à d) :

- (1) - les uns, arrondis, se présentent comme un conglomérat de sous-unités ayant des contours réguliers. Les formes observées rappellent les turricules des vers-de-terre qui sont très nombreux dans cette parcelle.
- (2) - les autres, au contraire, présentent des faces anguleuses polies qui rappellent des plans de fracture avec glissement.

Après avoir trié environ 200 agrégats en 2 familles, nous avons dosé, comme précédemment, le carbone total dans chaque agrégat. Sur la figure III 2 nous avons représenté la distribution des teneurs en carbone total de la famille d'agrégat rappelant les turricules de vers-de-terre. On s'aperçoit immédiatement que le tri a permis d'éliminer presque systématiquement les deux familles d'agrégats les moins riches en matière organique. Réciproquement, les résultats obtenus sur les agrégats à facette anguleuses qui représentent environ 60 % des agrégats totaux ont des teneurs en carbone centrées sur 27 et 28,8 % avec quelques individus sortant vers 31 et 35 % .

On est donc amené à conclure que les agrégats les plus riches en matière organique sont des formes issues de l'activité biologique des vers-de-terre qui ont assuré un mélange sol-fumier. Les résultats obtenus indiqueraient donc que les différentes populations mises en évidence seraient des mélanges sol-fumier des années précédentes. Cette conclusion est assez facile à tester car en connaissant les dates d'enfouissement, les quantités de carbone apportées ainsi que le coefficient de minéralisation k_1 du fumier (0,5), il est possible de recalculer

Teneur moyenne en carbone	Variance	Nombre d'agrégats trouvés
27 %	1,10 ‰	41
28,8 %	0,45 ‰	22
30,8 %	0,45 ‰	21
35,2 %	1,10 ‰	23

TABLEAU III.5 - Caractéristiques des populations d'agrégats isolées dans le matériau terreux recevant du fumier.

Le k_i du fumier est + proche de 0,30

↳ 5,9% de C

si le fumier est + humide →

les teneurs en carbone de ces différentes familles. Dans ce calcul, on suppose que :

- tout le fumier est incorporé dans 20 % des agrégats et qu'il constitue une matière organique libre.
- les agrégats ainsi formés vont minéraliser indépendamment du reste, c'est-à-dire qu'il n'y aura pas de nouvel enrichissement avant qu'ils soient revenus dans la famille la moins riche.
- les agrégats les moins riches, caractérisés par une teneur en carbone de 27 %, ne contiennent plus, de façon significative, de fumier.

Dans ces conditions, un apport de fumier de 100 t/ha se traduira par une augmentation de la teneur en carbone des agrégats les plus riches de 29,17 %. Dans ce calcul, on a admis que :

- la teneur en eau du fumier est de 65 %
- la teneur en carbone est de 50 % de la matière sèche.
- la quantité de sol exploré est de 3000 tonnes/ha, c'est-à-dire que les 17,5 tonnes de carbone sont diluées dans 600 tonnes de sol.

Sachant qu'il s'est écoulé 1,85 ; 3 et 4 ans entre les enfouissements et la date du prélèvement des échantillons, les teneurs en carbone seront donc :

$$\begin{aligned}
 Y_1 &= 27 \% + 29,17 (1 - k_1)^{1,85} = 35,1 \% \\
 Y_2 &= 27 \% + 29,17 (1 - k_1)^3 = 30,6 \% \\
 Y_3 &= 27 \% + 29,17 (1 - k_1)^4 = 28,8 \%
 \end{aligned}$$

Bon résultat à partir de données correctes.

avec $k_1 = 0,5$ (cf. modèle HENIN-DUPUIS).

On peut donc conclure que les différentes familles mises en évidence correspondent à des agrégats contenant du fumier apporté les années précédentes, l'enfouissement étant d'autant plus proche que les agrégats sont plus riches.

Le modèle de Henin appliqué au n° 62 p. Fumier depuis 50 ans avec comme C₀ → 2% de C donne 16% de C avec un volume 85 de 9,2% de C soit 15,1% de C avec k₁ = 0,50 et k₂ = 0,02

e) Conclusion

Dans ce paragraphe, nous avons caractérisé la distribution de la matière organique dans le sol en déterminant la quantité de carbone contenue dans une centaine d'agrégats tirés au hasard. Dans cette étude nous avons pu montrer que :

- les teneurs en carbone des agrégats recueillis dans des sols sous pelouse ou ne portant pas de culture et sans amendement organique se répartissent autour d'une valeur moyenne fonction du mode de gestion des sols adoptés.
- dans les sols sans culture mais recevant des amendements organiques (fumier), il y a plusieurs familles d'agrégats caractérisés par des teneurs en carbone et des formes différentes.

Dans ce dernier cas, les agrégats les plus riches seraient le fruit de l'activité des vers de terre qui, dans ce type de parcelles, sont très nombreux et doués d'une grande activité. On a également pu montrer qu'il était possible de trier les agrégats en deux grandes familles et que les teneurs en carbone de chaque famille pouvaient se déduire les unes des autres en utilisant le modèle simple de HENIN et DUPUIS.

Inversement, dans les autres parcelles étudiées (parcelles sous pelouse ; parcelles sans culture ne recevant pas de matières organiques), on n'observe qu'une seule famille d'agrégats. Il est cependant vraisemblable que les raisons pour lesquelles on n'observe qu'une seule famille d'agrégats dans les deux cas sont très différentes, à savoir :

- absence de matières organiques libres dans les sols sans culture et ne recevant pas d'amendements organiques.
- répartition homogène du carbone dans les sols sous pelouse par suite de la grande réticulation des systèmes racinaires.

résultat
surprenant
non courante
par données

**3.4 - DISTRIBUTION DE LA MATIERE ORGANIQUE DANS LES
DIFFERENTES FRACTIONS GRANULOMETRIQUES EXTRAITES**

3.4.1. Analyse du problème

Je ne comprends pas ce raisonnement !
OTO lola

Dans le paragraphe précédent, nous nous sommes assurés que les compartiments de la matière organique non labiles étaient régulièrement répartis dans le sol ; ce qui signifie que le fractionnement granulométrique qui a pour objectif de savoir s'il y a une relation entre stabilité et localisation peut-être réalisé sur le sol pris dans son entier.

Pour réaliser ce fractionnement granulométrique, deux étapes successives sont nécessaires :

- fragmentation des agrégats à l'état particulaire vrai : suite aux travaux de C. VAUGON (1983), nous avons choisi d'utiliser les ultrasons pour réaliser cette fragmentation.
- séparation des particules en fonction de leur taille en combinant tamisage et sédimentation.

Après avoir obtenu ces fractions granulométriques, on envisagera de déterminer les caractéristiques physico-chimiques et chimiques de la matière organique.

methode

3.4.2. Méthodologie adoptée

methodologie =
étape des méthodes

Le protocole expérimental sera précisé après que l'on aura rapporté les résultats obtenus sur la méthode de dispersion des agrégats.

a) Rappels sur les ultrasons

Parmi les méthodes physiques expérimentées pour disperser le sol sans détruire la matière organique, les vibrations ultrasoniques ont été beaucoup employées ces dernières années et dans différents domaines.

C'est ainsi que les sédimentologues et les minéralogistes ont essayé les premiers cette méthode de désagrégation des matériaux (SHUTON et al., 1961 ; SIMMONS, 1965 ; CHAMPLIN, 1966 ; KRAVITZ, 1966). Pour l'application à l'analyse granulométrique des sols, BARKOFF (1960) fait figure de précurseur. Ce sont cependant les études les plus récentes d'EDWARDS et BREMNER (1964), de KANNO et ARIMURA (1967) et de SALY (1967) qui ont permis de faire progresser cette technique et de l'appliquer à des sols.

Cette technique a surtout été appliquée pour :

- l'analyse granulométrique afin d'obtenir une dispersion complète des particules élémentaires sans entraîner de modifications importantes (BOURGET, 1968 ; KOBO et OBA, 1965 ; KANNO et ARIMURA, 1967).

- l'obtention de complexes-organo-minéraux (EDWARDS et BREMNER, 1967 ; WASTON et PARSONS, 1974 ; SHAYMUKHAMETOV, 1968 ; CHABOUIS, 1978 ; VAUGON, 1983).

Malgré ces travaux, peu d'études ont été consacrées à l'étude de l'effet des ultrasons sur la matière organique libre des sols.

b) Mécanismes de dispersion des agrégats par les ultrasons

La dispersion d'une suspension de sol par les vibrations ultrasoniques est attribuable aux dépressions variables provoquées par la diffusion de l'eau dans les pores des agrégats. L'air contenu dans ces derniers est déplacé par la

dans l'eau

*est ce bien
une diffusion*

propagation des ondes ultrasoniques en activant le processus de cavitation et provoquant des impacts hydrauliques jusque dans les zones microscopiques.

Le processus de dispersion commence très certainement pas la destruction des liaisons fragiles dans les agrégats et la séparation entre les particules sableuses et les microagrégats. Ensuite ce processus de dispersion se ralentit alors que des microfissures apparaissent dans les microagrégats. L'eau y pénètre et provoque petit à petit la rupture des liaisons fortes et la séparation des particules primaires argileuses.

Quand la dispersion est terminée, un traitement plus long ne provoque pas d'effets notables (SALY, 1967 ; EDWARDS et BREMNER, 1967).

dans les sols étudiés. Cela voudrait dire que pour vérifier le résultat sur des matériaux + complexes

L'action des ultrasons pour la dispersion des sols se résumerait à 2 effets successifs :

(1) ou Co3O2

ou la séparation se fait par étapes

- séparation entre les agrégats fragiles et les microagrégats denses et plus solides
- séparation entre la partie externe et la partie interne des microagrégats denses (SHAYMUKHAMETOV, 1968).

Cette technique conduit théoriquement à une individualisation totale des particules primaires sans modification de leur taille et de leur composition. Cependant, en pratique, en fonction des sols étudiés et des ciments organo-minéraux, la dispersion est plus ou moins complète et des transformations plus ou moins importantes sont à craindre.

c) Application aux systèmes étudiés

Suite au travail de C. VAUGON (1983) sur "l'action des ultrasons sur la dispersion des agrégats du sol" notre contribution a consisté à définir le temps de sonification nécessaire pour obtenir une bonne dispersion.

Cette étude a été conduite avec un désintégrateur de

cellules BRANSON (modèle B15) sur des échantillons immergés pendant 12 heures dans les conditions suivantes :

- Fréquence fixe : 20 KHz
- Puissance : 90 W
- Sonde : diamètre 3 mm
- Poids de sol 20 g, volume d'eau 80 ml
- Récipient : tube en pyrex de 7 cm de diamètre ayant un fond hémisphérique pour permettre une plus grande homogénéité (VLADIMIROV, 1968).

Le convertisseur (transducteur) qui transforme l'énergie électrique de haute fréquence en énergie mécanique est constitué d'un corps électrostrictif en zircotitanate de plomb. Il vibre dans une direction verticale et transmet ce mouvement à une microsonde immergée dans la suspension à traiter.

L'extrémité de la sonde est placée à 5 mm sous la surface de l'eau et au centre du récipient. Cette position de la sonde a été déterminée par observation directe de façon à obtenir les remous les plus intenses. Dans nos expériences, la sonde est enfouie un peu plus profondément que dans les publications d'EDWARDS et BREMNER (3 mm sous la surface de l'eau).

Pour une bonne reproductibilité des résultats, un entretien régulier de la sonde est nécessaire, en la frottant sur du papier de verre jusqu'à élimination des crevasses que peuvent apparaître après quelques heures de fonctionnement. Dans le même ordre d'idée il faut veiller à ce que la température de la sonde ne varie pas trop (HINDS et LOWE, 1980).

d) Résultats

La mesure de l'efficacité de la sonification est faite en comparant les granulométries obtenues après l'application des ondes ultrasonores et par la méthode de référence.

La suspension obtenue après sonification (20 g de sol

dans 80 ml d'eau) est transvasée dans une allonge à sédimentation. Après prélèvement à la pipette Robinson des aliquotes représentatives des fractions 0 - 2 μm et 0 - 20 μm , le milieu est épuisé en particules dont le diamètre équivalent est égal ou inférieur à 20 μm . Les sables fins et sables grossiers sont obtenus par pesée et tamisage à sec.

L'analyse granulométrique d'une suspension de sol non broyé après une immersion de 12 heures sans agitation montre que la dispersion est très mauvaise car on trouve très peu de limons et d'argile. Cette analyse correspond au temps 0 de toute sonification car l'immersion pendant 12 heures constitue un préalable nécessaire (VAUGON, 1983).

Dans le tableau III.6 nous avons porté les proportions des différentes fractions granulométriques obtenues après de sonification variables. Ces données sont matérialisées sur les figures III.3, III.4 et III.5. L'examen de ces figures indique que :

- entre 0 et 10 minutes les particules supérieures à 50 μm libèrent des particules de plus faibles tailles. C'est ainsi qu'une sonification de 10 minutes a provoqué une dislocation des agrégats ayant une taille supérieure à 50 micromètres.

- entre 10 et 30 minutes, la sonification est pratiquement sans effet sur les proportions des différentes fractions granulométriques qui ont des masses très voisines de celles obtenues par la méthode conventionnelle.

Un examen plus attentif des figures obtenues avec les échantillons "fumier" et "pelouse" indique que la masse de la fraction granulométrique 2 - 20 μm passe par une valeur maximum entre 5 et 10 minutes de sonification. Dans ces conditions, on peut admettre le schéma de destruction suivant :

- entre 0 et 5 minutes de sonification, dislocation rapide des agrégats ayant une taille supérieure à 50 μm et constitués par des micro-agrégats de 2 - 20 μm liés entre

Echantillons	Temps de sonification (en mn)	Proportion des fractions granulométriques			
		0-2 μm	2-20 μm	20-50 μm	50-2000 μm
Témoïn	5	11	16	36	37
	10	14	20	37	30
	15	15	24	34	27
	20	16	20	36	28
	30	16,5	19	39	26,5
Fumier	5	12	24,5	30	33,5
	10	17	22	35	26
	15	17	21	37	25
	20	18	19	40	23
	30	19	21	39	21
Pelouse	5	13	22	33	32
	10	16	23	36	25
	15	16,5	22	38	23
	20	17	21	36	26
	30	18	22	38	22

TABLEAU III.6 - Effet du temps de sonification sur la dispersion du sol.



Figure III.3 : Variation des différentes fractions granulométriques extraites de la parcelle témoin en fonction du temps de sonification.

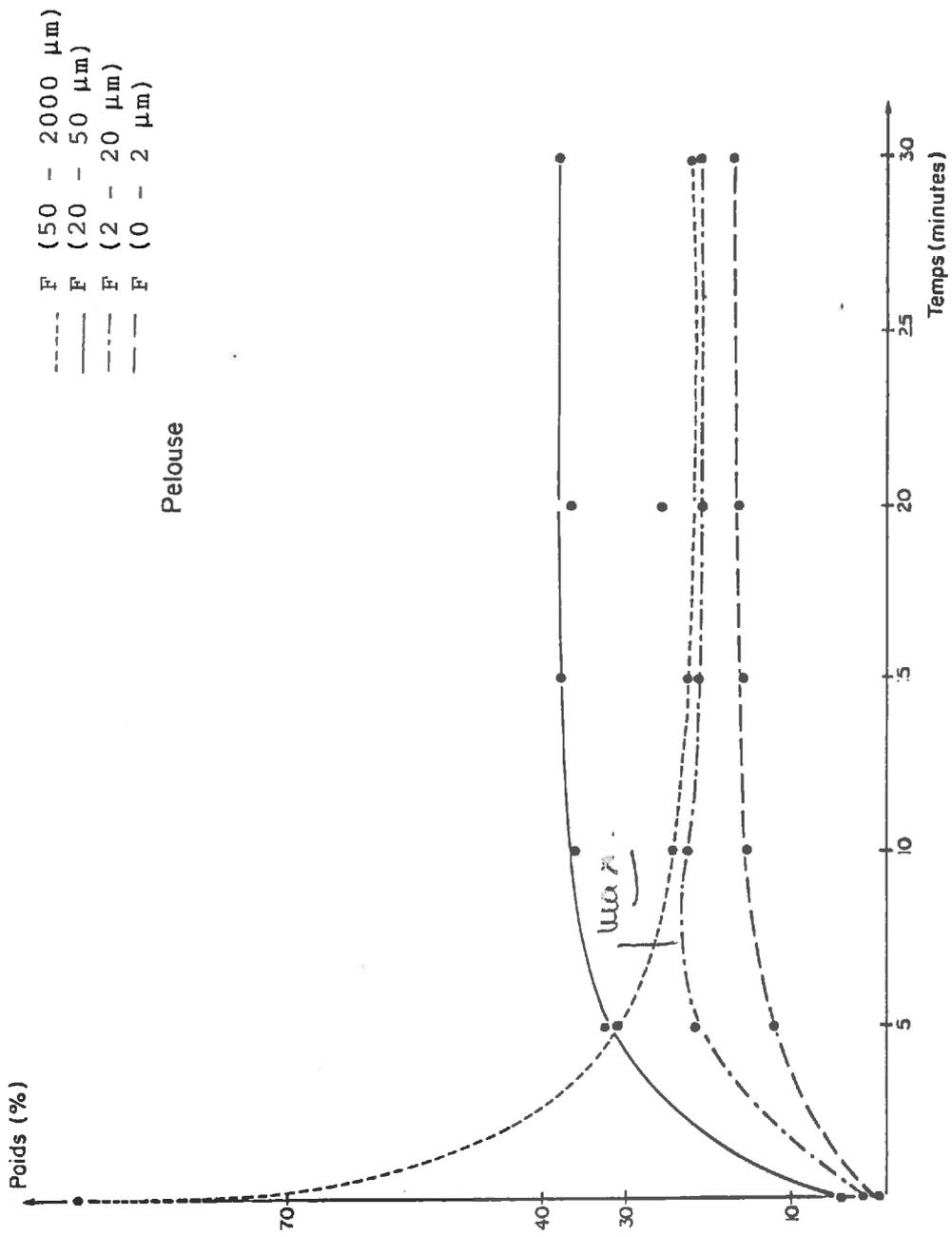


Figure III.4 : Variation des différentes fractions granulométriques extraites de la parcelle "pelouse" en fonction du temps de sonification.

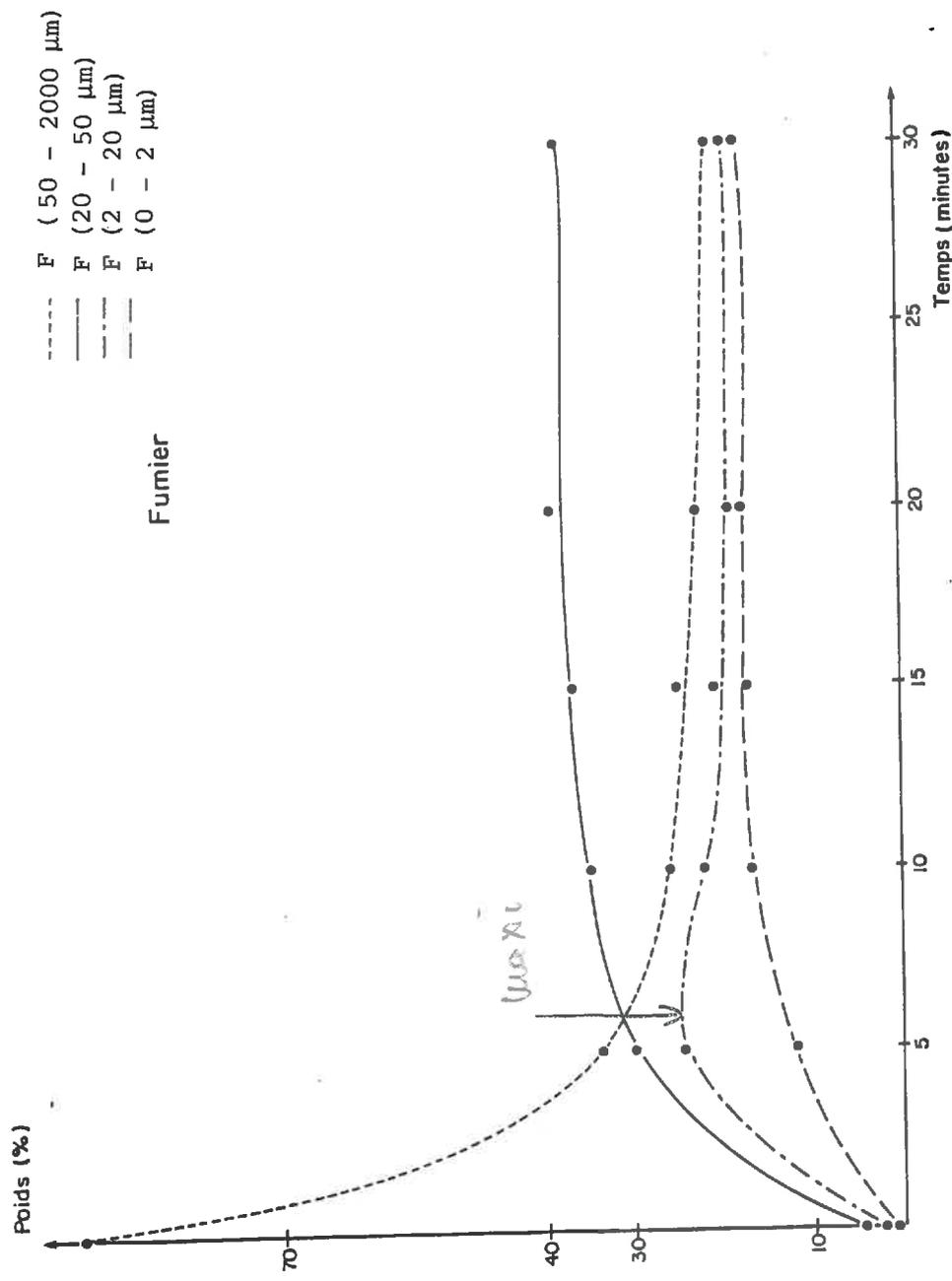


Figure III.5 : Variation des différentes fractions granulométriques extraites de la parcelle "Fumier" en fonction du temps de sonification.

Echantillons	Traitement	Répartition des tailles des particules selon les fractions				Total
		0-2 µm	2-20 µm	20-50 µm	50-200µm	
témoin	Sonification	-5% 13 = 12,35	21	33,5	30	97,5
	Référence	17,8	21,5	38,1	22,6	
Fumier	Sonification	-10% 12,5 = 11,25	20	31	35	98,5
	Référence	18,6	22,5	36,4	22,5	
Pelouse	Sonification	-6% 11 = 10,33	26	38	22	97
	Référence	18,7	21	37	23	

TABLEAU III.7 - Quantités des différentes fractions granulométriques obtenues après sonification de 100 g de matériau terreux ou après destruction des ciments organo-minéraux (méthode de référence pour l'analyse granulométrique).

eux et aux particules limoneuses et sableuses par des liaisons facilement rompues.

- entre 5 et 15 minutes, destruction des micro-agrégats qui donnent naissance aux particules les plus fines.

Dans le cas de la parcelle témoin très appauvrie en ciments organo-minéraux, la dispersion serait encore beaucoup plus rapide.

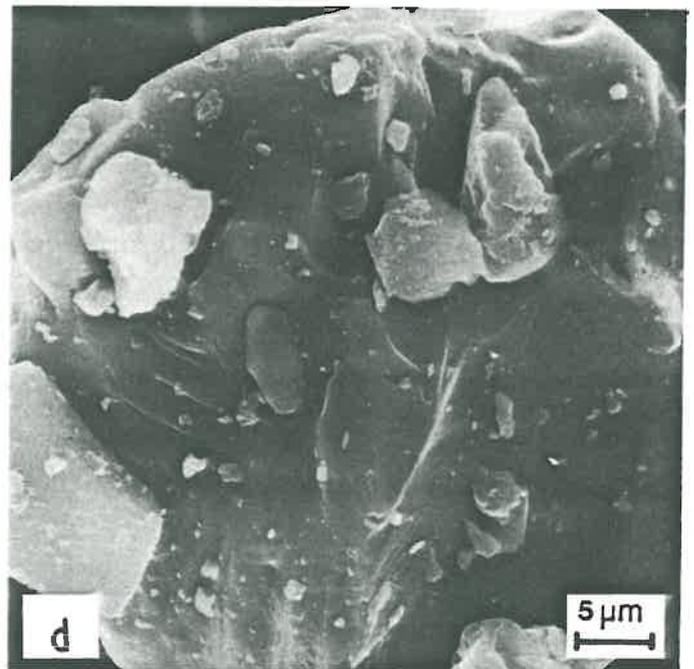
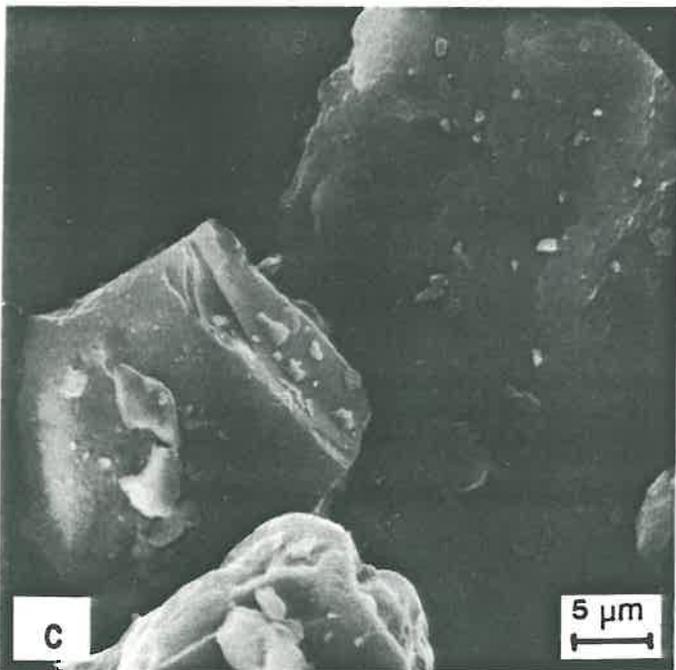
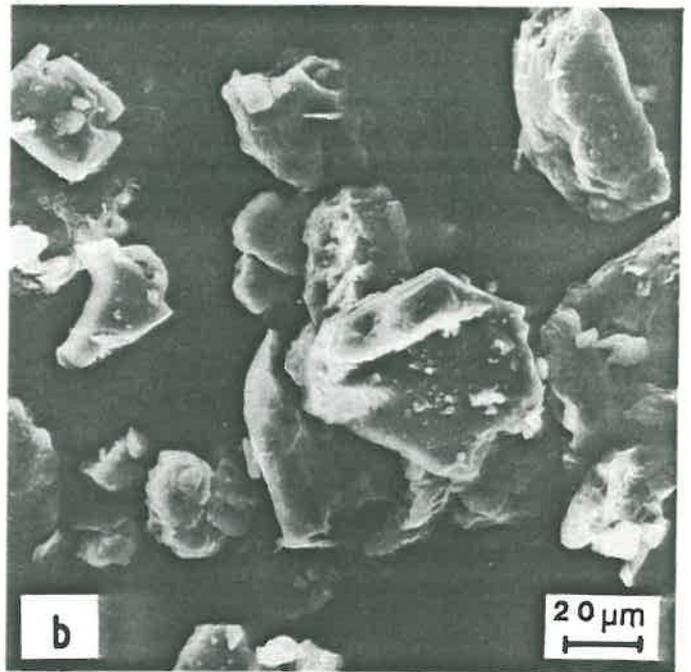
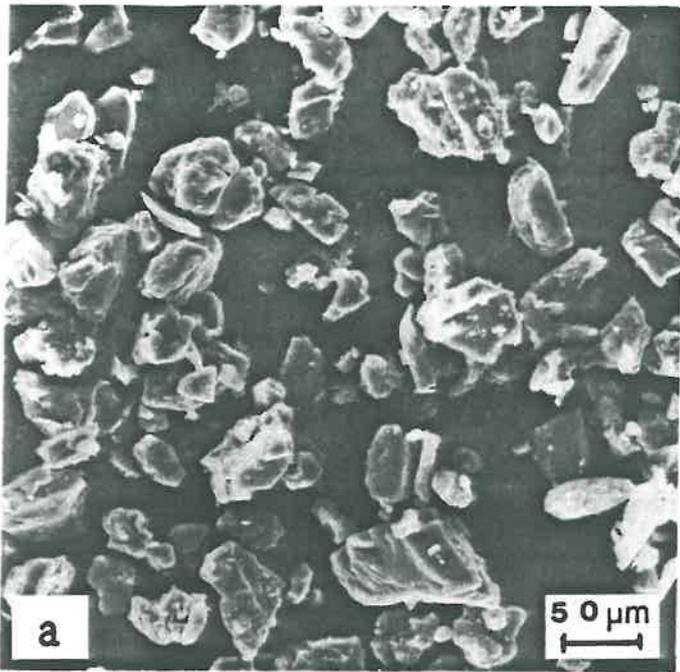
e) Définition du protocole expérimental

- Les matériaux terreux prélevés ont été obtenus par homogénéisation de 8 prélèvements d'environ 100 g chacun. Après séchage à l'air ambiant et passage à travers un tamis de 2 mm, 30 échantillons de 20 g sont constitués.
- Chaque échantillon de 20 g est immergé dans 80 ml d'eau pendant 12 heures et sonifié pendant 10 minutes.
- Les suspensions obtenues sont tamisées sous eau pour obtenir la fraction 50 - 2000 μm .
- Dans une allonge à sédimentation, les suspensions sont épuisées successivement de leurs fractions 0 - 2 μm et 2 - 20 μm par siphonnage à 30 cm après des temps de sédimentation respectifs de 24 heures et 14,4 minutes. La fraction 20 - 50 μm est récupérée au fond de l'allonge.
- Après centrifugation à 40.000 g (fraction 0 - 2 μm) et à 4.000 g (fraction 2 - 20 μm), les fractions sont lyophilisées. Pour les fractions 20 - 50 μm et 50 - 2000 μm , l'eau a été éliminée par étuvage à 40°C.

3.4.3. Résultats du fractionnement granulométrique

Dans le tableau III.7, on a reporté les masses des différentes fractions granulométriques obtenues pour 100 g de matériau terreux. Pour chaque traitement, on a également rapporté les proportions des différentes fractions granulométriques obtenues après destruction de la matière organique (méthode de référence).

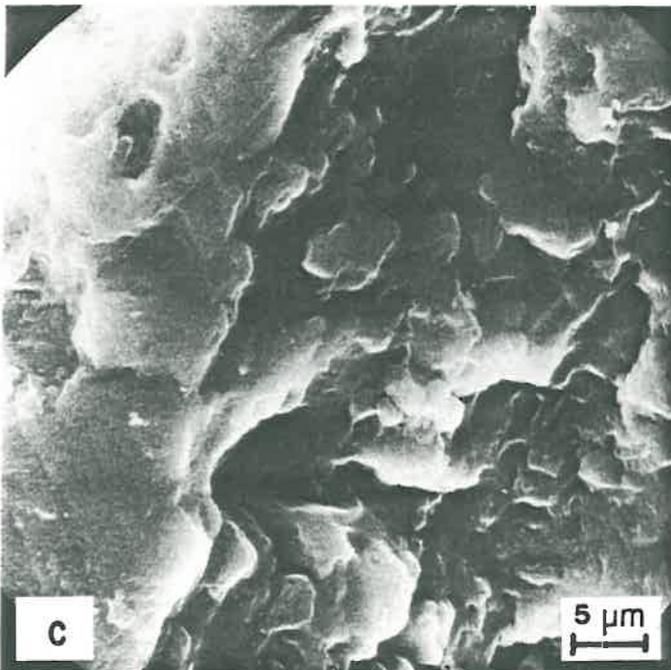
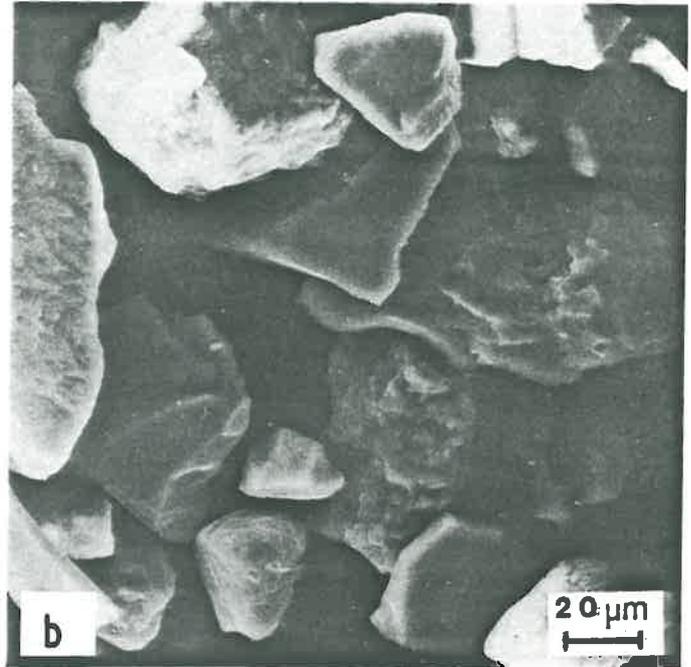
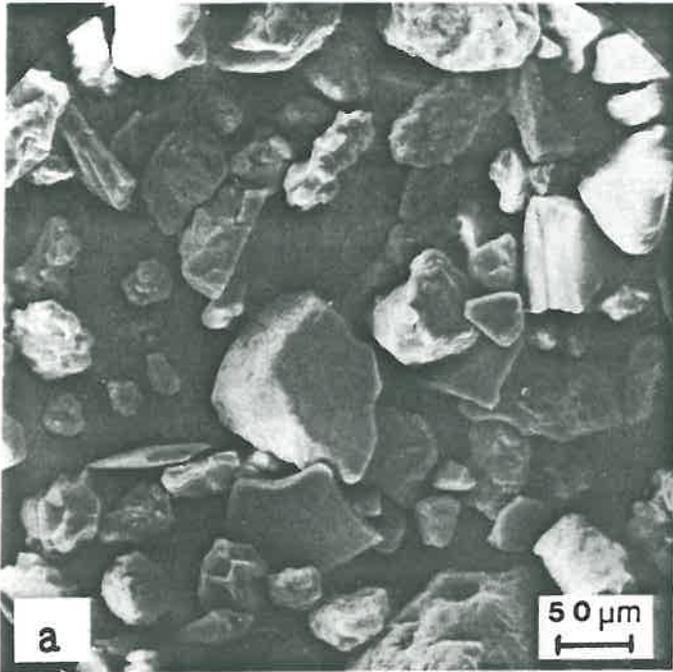
PLANCHE I



Observations au microscope électronique à balayage
de la fraction granulométrique 50-2000 μm extraite
de la parcelle "fumier"

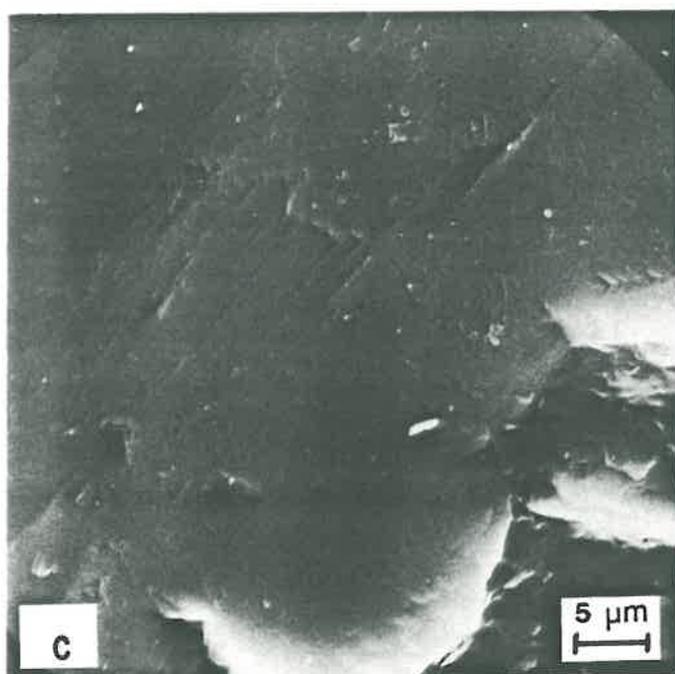
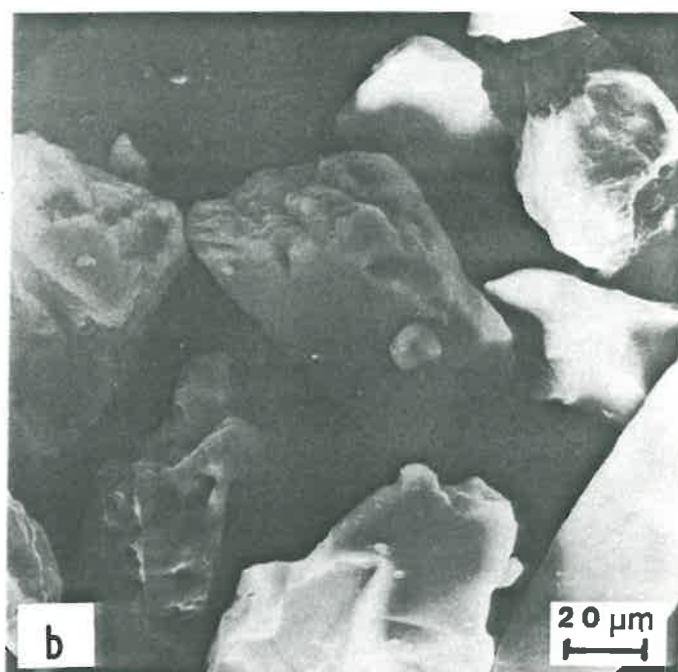
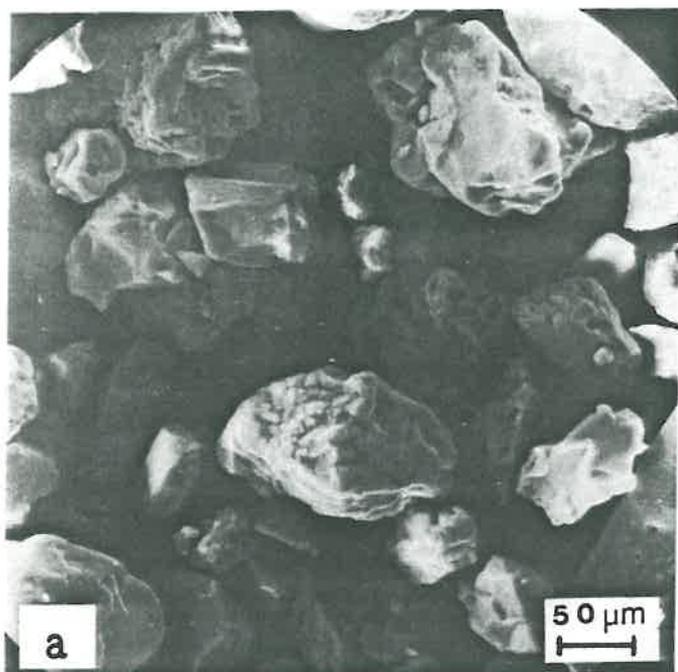
a : x 320 ; b : x 780 ; c : x 3200 ; d : x 3200.

PLANCHE II



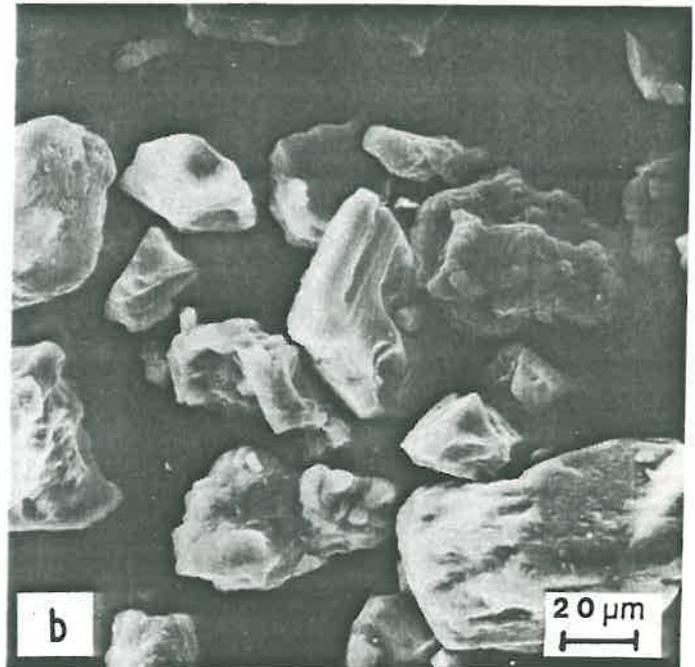
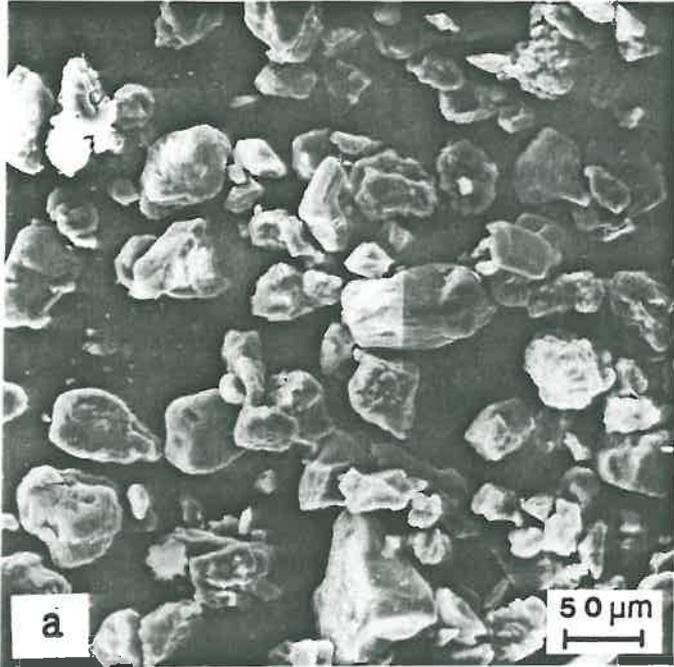
Observations au microscope
électronique à balayage de
la fraction granulométrique
50-2000 μm extraite de la
parcelle "Pelouse"
a : x 320 ; b : x 780 ;
c : x 3200.

PLANCHE III



Observations au microscope
électronique à balayage de
la fraction granulométrique
50-2000 μm extraite de la
parcelle "Témoin"
a : x 320 ; b : x 780 ;
c : x 3200.

PLANCHE IV



Observations au microscope
électronique à balayage de
la fraction granulométrique
20-50 μm extraite de la
parcelle "Fumier"
a : x 320 ; b : x 780 ;
c : x 3200.

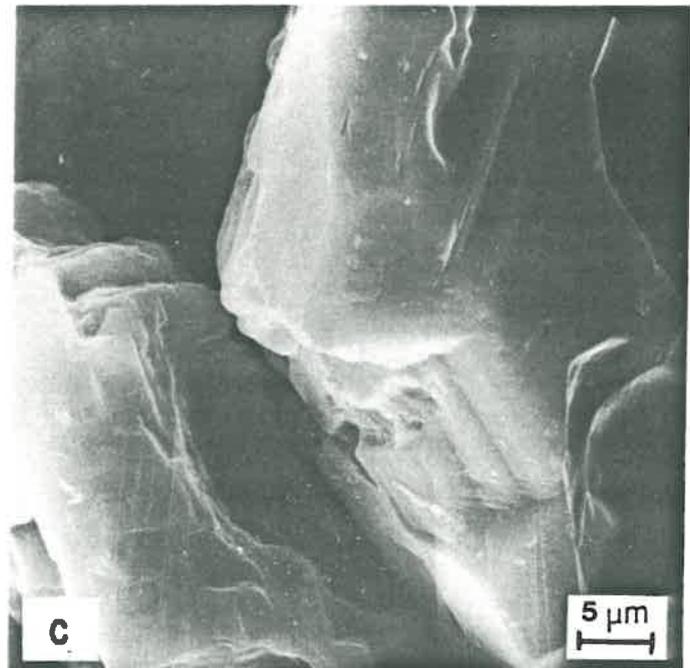
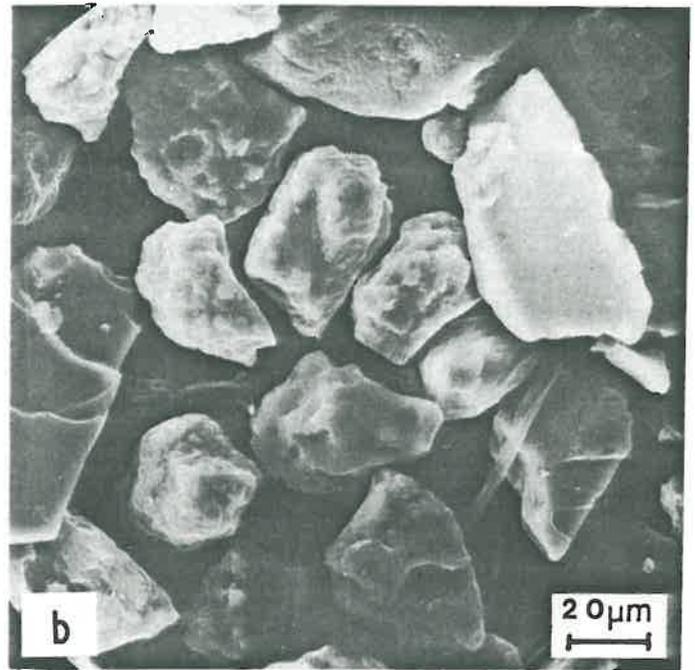
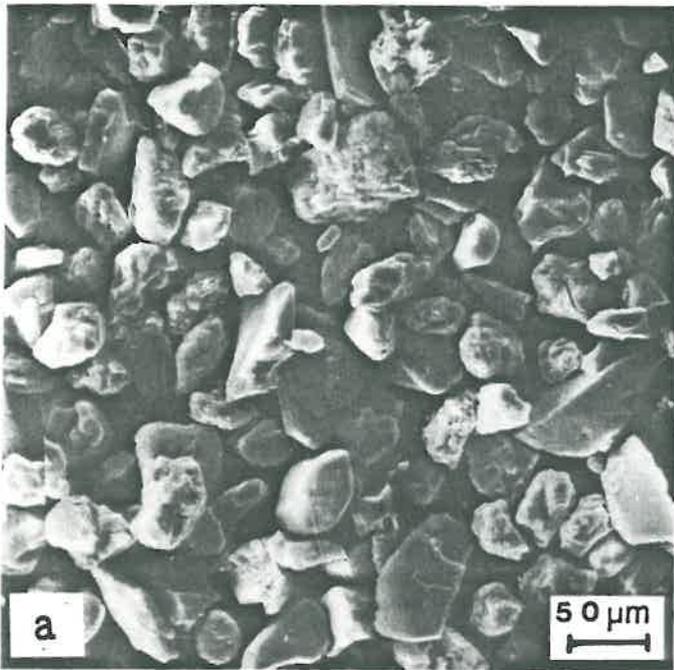
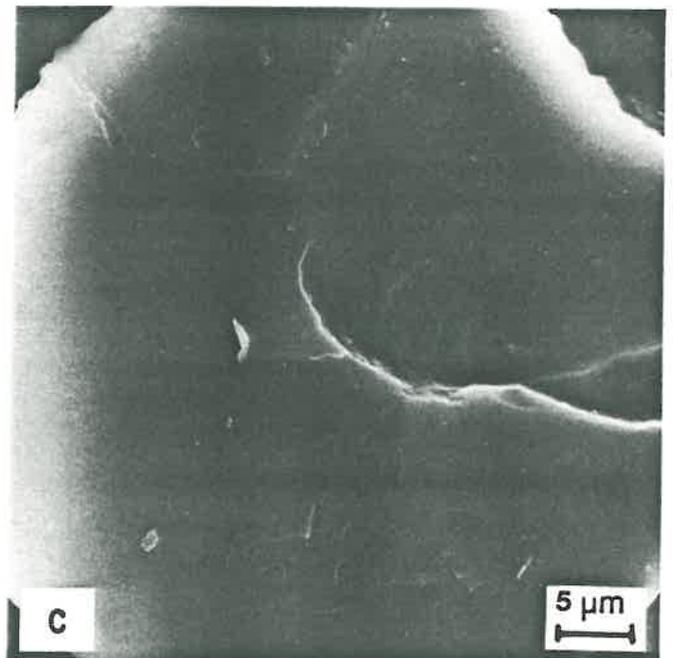


PLANCHE V



Observations au microscope
électronique à balayage de
la fraction granulométrique
20-50 μm extraite de la
parcelle "Pelouse"
a : x 320 ; b : x 780 ;
c : x 3200.



Dans tous les cas on s'aperçoit que les diverses opérations réalisées n'ont pas entraîné de pertes importantes puisque l'on récupère, en moyenne 97,7 g de fractions pour 100 g de matériau terreux.

*30% a été pas
reloué*
pour les
comparables
3
ech.

Par contre on s'aperçoit que le fractionnement granulométrique n'est pas parfait, notamment au niveau de la fraction la plus fine. Outre la raison invoquée précédemment, on peut également suspecter un mauvais épuisement des suspensions, des phénomènes de floculation et une mauvaise dispersion ultrasonique.

Parallèlement à ce manque de fractions fines, on note des excès dans les fractions de tailles supérieures, en particulier dans les fractions 2 - 20 μm pour le matériau terreux provenant du sol sous pelouse et dans les fractions 50 - 2000 μm pour les matériaux issus des parcelles témoin et fumier.

Il est vraisemblable que le fractionnement observé soit dû à une sonification imparfaite des échantillons car on observe :

- la présence de micro-agrégats dans les fractions 2 - 2000 μm de pelouse et 50 - 2000 μm dans les fractions extraites des échantillons "témoin" et "fumier". Sur les planches I à V des clichés réalisées au microscope à balayage confirment ces hypothèses.

*peu
sensibilisé*

3.4.4. Répartition granulométrique de la matière organique

Dans les tableaux III.8, III.9, III.10, on a reporté les quantités de carbone et d'azote (exprimées en mg par gramme de fractions) trouvées dans chaque fraction granulométrique et pour les trois traitements étudiés. On a également reporté le rapport C/N de la matière organique associée aux différentes

Fractions	Carbone total en % <i>et 60 fractions</i>	Azote total en %	Matière organique en %	C/N
0 - 2 μm	22,48	2,71	3,87	8,30
2 - 20 μm	19,19	1,01	1,92	11,07
20 - 50 μm	1,14	0,15	0,19	7,6
50 - 2000 μm	2,30	0,23	0,40	10

TABLEAU III.8 - Caractéristiques analytiques des fractions du sol témoin.

Fractions	Carbone total en %	Azote total en %	Matière organique en %	C/N
0 - 2 µm	51,04	6,52	8,78	7,82
2 - 20 µm	64,73	5,45	11,1	11,88
20 - 50 µm	3,98	0,35	0,68	11,37
50 - 2000 µm	14,54	1,34	2,5	10,85

TABLEAU III.9 - Caractéristiques analytiques des fractions du sol recevant du fumier.

Fractions	Carbone total en %	Azote total en %	Matière organique en %	C/N
0 - 2 μm	30,42	3,28	5,23	9,27
2 - 20 μm	24,89	2,38	4,28	10,46
20 - 50 μm	9,79	0,76	1,68	12,88
50 - 2000 μm	4,87	0,39	0,32	12,5

TABLERAU III.10 - Caractéristiques analytiques des fractions du sol sous-pelouse

fractions granulométriques.

Sur les figures III.6 et III.7 on a représenté les données consignées dans les tableaux précédents.

L'examen des histogrammes indique que la matière organique (carbone et azote) est principalement localisée dans les fractions 0 - 2 μm et 2 - 20 μm . Ces observations sont en accord avec celles de BRUCKERT (1980), d'ANDREUX (1978) (1981) de TURCHENEK et OADES (1979) et de SATALI et YAMANE (1972 b).

Avant d'interpréter ces résultats, il est indispensable d'analyser les conséquences du mauvais fractionnement granulométrique sur la répartition observée pour la matière organique.

- fraction 0 - 2 μm : dans ce cas, il n'y a pas de contamination par d'autres fractions et les teneurs trouvées sont donc exactes. Par contre, les déficits en masse observés pour cette fraction seront gênants quand on voudra estimer la quantité de matière organique présente dans la fraction argileuse du sol.
- fraction 2 - 20 μm : c'est surtout dans le cas du sol sous pelouse que cette fraction est contaminée, notamment par la fraction 0 - 2 μm . Les erreurs entraînées sur les teneurs seront toutefois négligeables car, dans ce cas particulier, les fractions 0 - 2 μm et 2 - 20 μm ont des richesses en matière organique très voisines. Là encore, les erreurs les plus importantes seront commises quand on voudra estimer la quantité de matière organique présente dans la fraction limoneuse des sols.
- fraction 20 - 50 μm : dans ce cas, les quantités de matière organique présente sont faibles de telle sorte qu'une discussion approfondie n'offre que peu d'intérêt.
- fraction 50 - 2000 μm : c'est pour la parcelle témoin et pour la parcelle fumier que cette fraction est contaminée par des particules fines parfois beaucoup plus riches en matière organique. Dans ces deux cas, les teneurs en carbone et en azote sont surestimées. Un calcul simple va

mais aussi les teneurs moyennes si l'on admet que les erreurs les plus importantes sont faites

mais est-ce la même

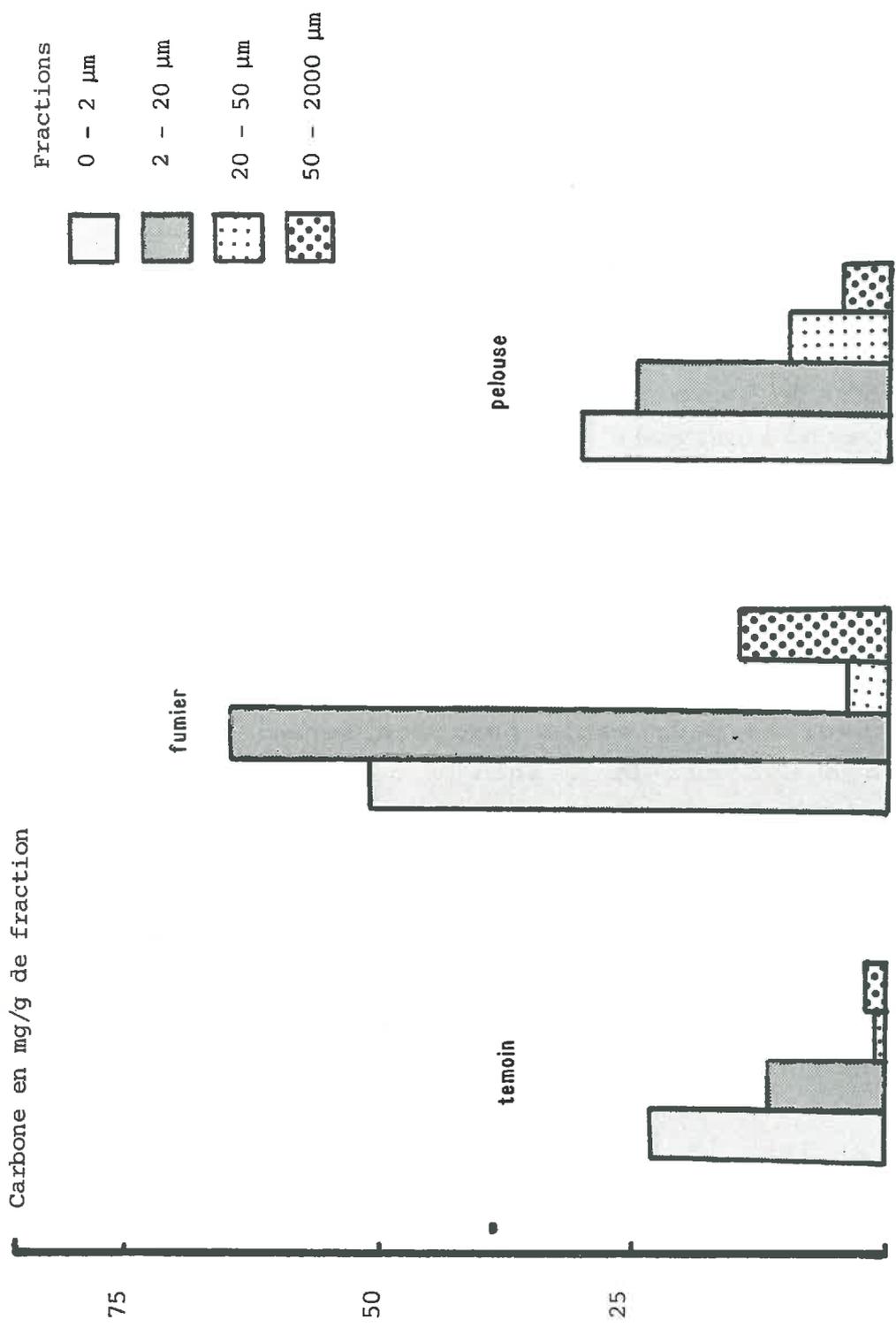


Figure III.6 : Répartition du carbone dans les fractions granulométriques (exprimée en mg/g de fraction).

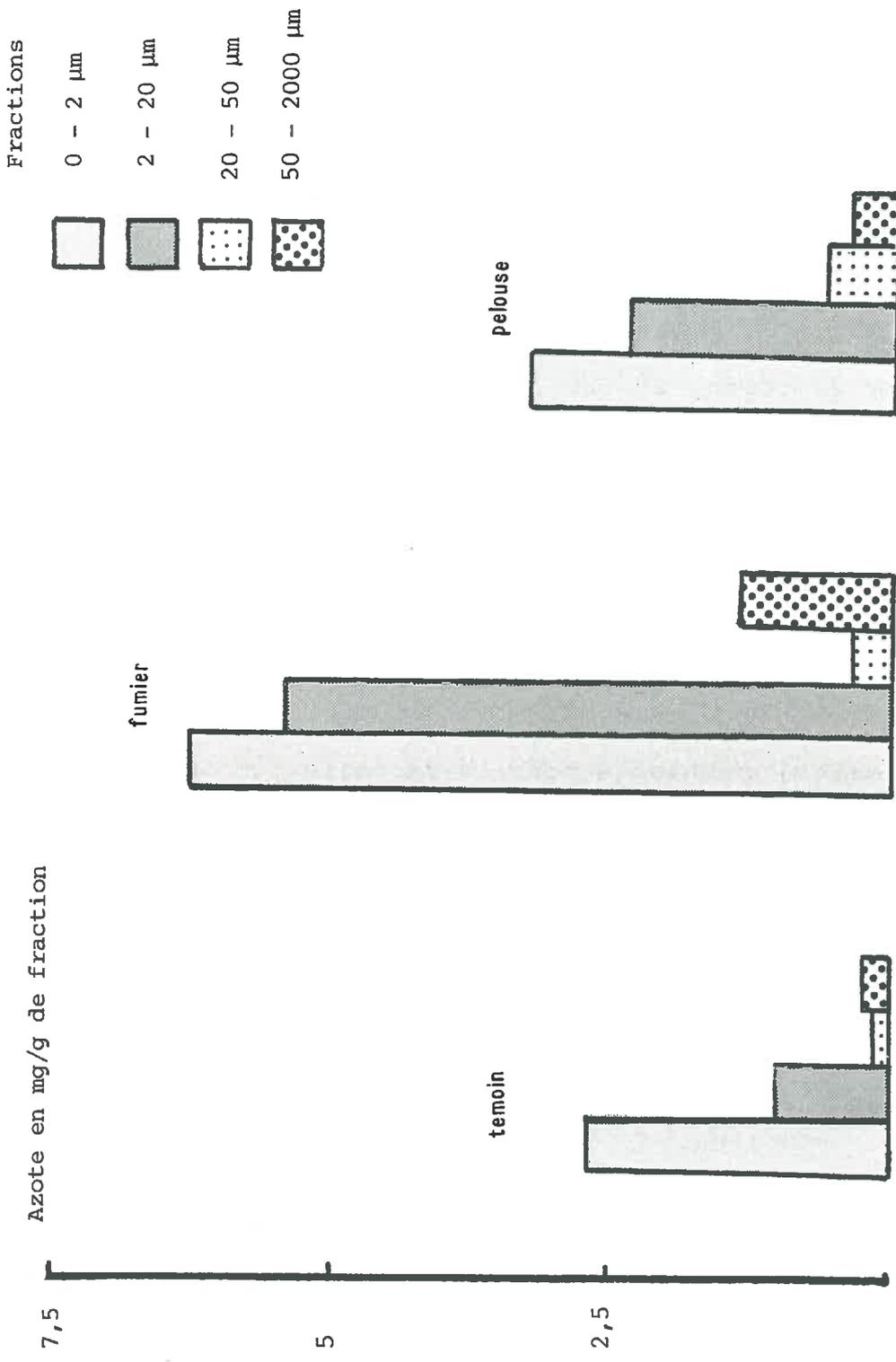


Figure III.7 : Répartition de l'azote dans les fractions granulométriques (exprimé en mg/g de fraction).

nous permettre d'estimer les erreurs commises.

Cas de la parcelle fumier

Nous supposerons que l'excès de masse observé dans la fraction 50 - 2000 μm est dû aux déficits notés dans les autres fractions ; à savoir que les 35 g contiennent :

- 23 g de fraction 50 - 2000 μm
- 5,5 g de fraction 20 - 50 μm
- 1,5 g de fraction 2 - 20 μm
- 5 g de fraction 0 - 2 μm

Ceci suppose que il n'y a pas d'interaction de la ro sur la Eva de la au-floct le pui est de raison de 66

Avec cette hypothèse, la teneur réelle X de la fraction 50 - 2000 μm en matière organique serait de :

$$X = \frac{35 \times 14,35 - (5,5 \times 3,98 + 1,5 \times 64,73 + 5 \times 51,04)}{23} = 5,86$$

Un calcul semblable pour la parcelle témoin conduirait à admettre que la teneur réelle en matière organique de la fraction 50 - 2000 μm serait voisine de 1 % .

3.4.5. Discussion des résultats

(Coupes ou non ?)

a) Répartition granulométrique du carbone

Sur la figure III.6, on a reporté les quantités de carbone trouvées dans les différentes fractions granulométriques. Ces quantités sont exprimées en mg de carbone pour 1 g de fraction.

L'examen de cette figure montre que les fractions 0 - 2 μm extraites de la parcelle témoin et du sol sous pelouse sont plus riches que les fractions 2 - 20 μm . Inversement, c'est la fraction 2 - 20 μm qui est la plus riche dans le cas de la

parcelle fumier. On doit également noter que la fraction 0 - 2 μm extraite de cette parcelle est néanmoins la plus riche.

On peut donc conclure que l'accumulation (cas de la parcelle fumier) ou la disparition (cas des parcelles témoin et sous pelouse) de matière organique depuis l'installation du système expérimental (cf. paragraphe 32) se traduit par des variations dans les deux fractions granulométriques si l'on se rappelle les modèles d'évolution de la matière organique (cf. chapitre II), on peut émettre les conclusions suivantes :

- Les compartiments caractérisés par des temps de demi-vie de plusieurs dizaines d'années ou de plusieurs centaines d'années sont localisés dans les fractions 0 - 20 μm .
- Le compartiment caractérisé par un temps de demi-vie de quelques dizaines d'années est également localisé dans les deux fractions granulométriques extraites puisque l'on observe des variations importantes de la teneur en carbone dans la fraction 0 - 2 μm et 2 - 20 μm .
- Réciproquement, comme toutes les teneurs en matière organique des fractions extraites ont varié, il devient impossible de localiser le compartiment à temps de vie de plusieurs siècles.

Pour essayer d'aller plus loin dans l'analyse des résultats, nous avons reporté les teneurs en matière organique trouvées dans les fractions 0 - 2 μm et 2 - 20 μm en fonction des teneurs totales en matière organique des sols. Pour justifier l'intérêt de cette représentation prenons deux exemples :

. **1er cas** : Une fraction granulométrique contient seulement le compartiment à temps de demi-vie de quelques dizaines d'années (c'est-à-dire que le compartiment à temps de demi-vie long est localisé dans une autre fraction). Dans ce cas, la disparition ou l'accumulation de carbone se fera préférentiellement dans cette fraction, c'est-à-dire que les quantités de matière organique varieront plus rapidement que la teneur globale. Lorsque toute cette fraction aura été minéralisée, la teneur en

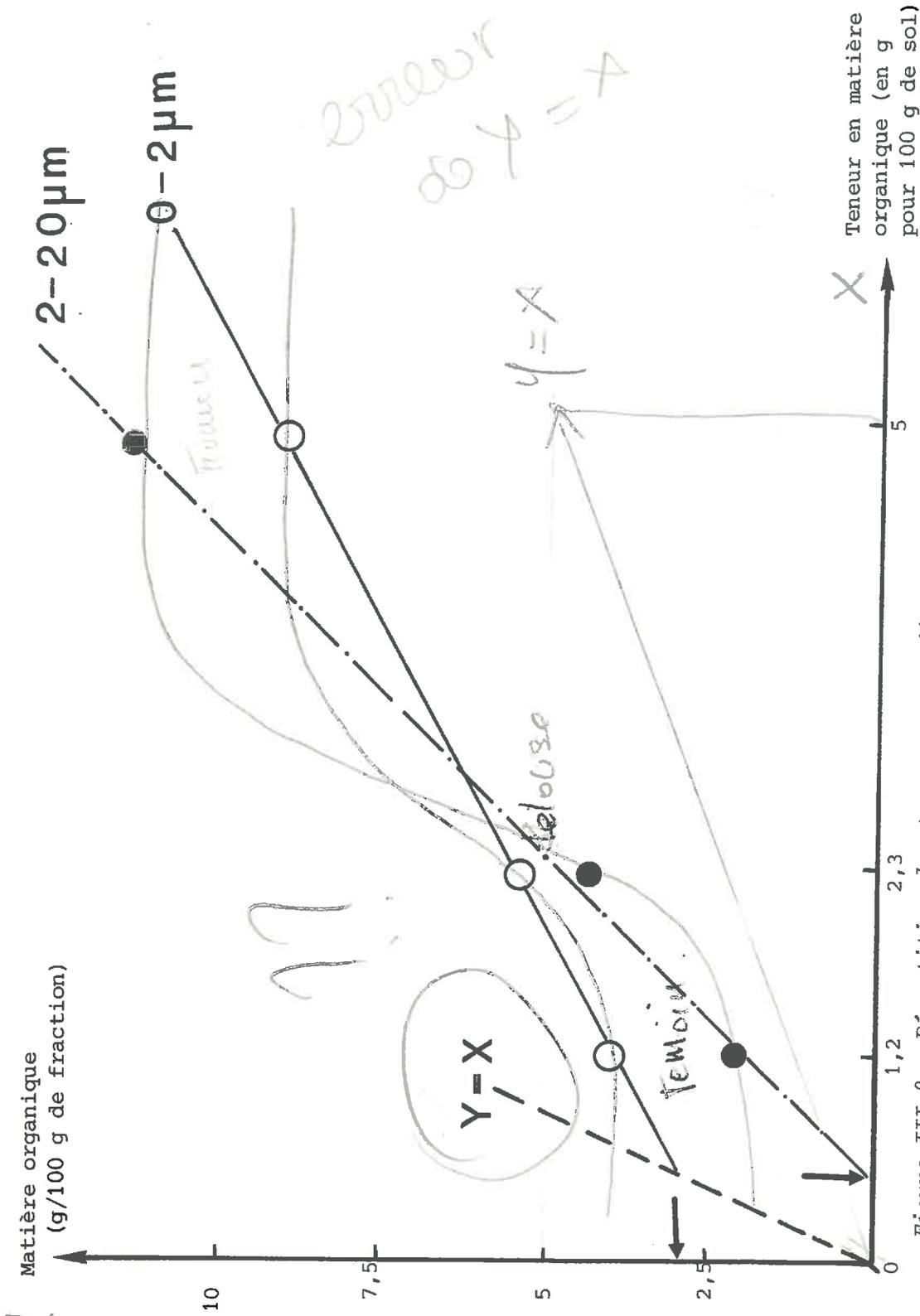


Figure III.8 : Répartition des teneurs en matières organiques en fonction de la teneur en matière organique du sol global.

Pourquoi sont ce des droites?
 on peut faire passer beaucoup de courbes
 avec que des droites
 les 2 traits

matière organique du sol tendra vers une valeur limite qui sera une estimation quantitative du compartiment stable.

. 2ème cas : Une fraction granulométrique contient simultanément un compartiment à temps de demi-vie de quelques dizaines d'années et un compartiment à temps de demi-vie de quelques centaines d'années. Dans notre exemple et pour la facilité de la compréhension, nous supposons que le contenu du compartiment stable ne varie pas pendant la durée de l'expérience. Dans ce cas, la teneur de la matière organique de cette fraction variera moins rapidement que la teneur du sol, puisqu'à la limite cette fraction ne contiendra plus que le compartiment stable.

Sur la figure III.8, on a représenté les teneurs en matière organique des fractions granulométriques 0 - 2 µm et 2 - 20 µm en fonction de la teneur en matière organique globale. On peut constater que les teneurs en matière organique de la fraction 2 - 20 µm décroissent plus rapidement que les teneurs en matière organique des sols non fractionnés. A la limite, la teneur en matière organique trouvée dans cette fraction sera nulle quand la teneur de la matière organique du sol non fractionné sera de 0,45 %.

Inversement, la quantité de matière organique trouvée dans la fraction granulométrique 0 - 2 µm décroît moins vite que la teneur en matière organique du sol non fractionné. A la limite la teneur en matière organique de ce compartiment serait de 2,9 % (2,9 g pour 100 de fraction 0 - 2 µm) quand la teneur en matière organique de la fraction 2 - 20 µm est nulle. Cette valeur de 2,9 % a été obtenue graphiquement au point d'intersection de la droite matérialisant l'évolution des teneurs en matière organique de la fraction 0 - 2 µm et la droite Y = X. Puisque l'analyse granulométrique nous indique que le sol contient environ 17 % d'argile, la quantité de matière organique stable présente dans le sol sera donc de 2,9 x 0,17 = 0,49 g de matière organique pour 100 g de sol.

On peut donc décrire l'évolution des teneurs en matière organique observées dans les fractions 0 - 2 µm et

de ou soit cette valeur de limite. Le pas est de 100 de temps mais le trait

les deux décroissent plus vite et surtout 2-20µ

usage! au volume

ou pas?

??

que sont Y et X

2 - 20 μm de la façon suivante :

- Présence dans la fraction granulométrique 2 - 20 μm d'un compartiment unique, de temps de demi-vie de quelques dizaines d'années.
- Présence dans la fraction granulométrique 0 - 2 μm de deux compartiments différents, l'un à un temps de demi-vie long représentant environ 0,45 à 0,50 g de matière organique pour 100 g de sol, l'autre à temps de demi-vie plus court.

d'où se fait l'allochthonie préférentielle des droits ? danger

Par rapport au modèle et bien que nous n'ayons pas à notre disposition les temps de résidence moyen, nous admettrons que les compartiments mis en évidence dans les deux fractions correspondent au compartiment chimiquement stabilisé (matière organique stable) et au compartiment physiquement protégé (matière organique moins stable).

quelques 10 ans, quelle 100 ans ?

Une discussion générale sur la légitimité de ces hypothèses sera conduite lorsque nous aurons présenté et discuté d'autres résultats comme la distribution de l'azote, l'extractibilité de la matière organique dans les différentes fractions ... A ce stade de la discussion, nous ne ferons que comparer nos résultats à ceux obtenus à partir des études de la minéralisation de la matière organique des sols.

→ mais c'est le cas où les valeurs sont le + importantes

D'un point de vue quantitatif les sols sous pelouse sont considérés comme des sols de référence dans l'établissement des modèles. Dans le modèle de JENKINSON et RAYNER (1981), la quantité de matière organique stabilisée dans les 23 premiers centimètres de sol serait de 21 tonnes par hectares ; ce qui correspond à 3,20 g de matière organique pour 100 grammes d'argile. Dans ce calcul, nous avons utilisé les données publiées par JENKINSON (1981) et DEMOLON (1960) sur les caractéristiques des sols de ROTHAMSTED (teneur en argile = 20 % ; densité apparente 1,4).

Dans le cas du sol étudié par VAN VEEN et PAUL (1977), la quantité de matière organique stabilisée dans les 15 premiers

centimètres serait d'environ 25,5 tonnes par hectare. Dans ce cas, il faut souligner que les auteurs distinguent une matière organique récalcitrante physiquement protégée ayant un temps de demi-vie de 35.000 ans d'une matière organique récalcitrante non physiquement protégée ayant un temps de demi-vie de 350 ans. Comme nous ne possédons pas des caractéristiques du sol étudié, nous ferons le calcul inverse en supposant que la masse de matériau terreux contenu dans 15 cm de sol sous pelouse est de 2100 tonnes par hectare ; à savoir que la quantité de matière organique stabilisée dans le sol de Versailles est de $2100 \times 0,5 \% = 10,5$ tonnes/hectares. Cette valeur est à rapprocher des 12,75 tonnes de matières organiques stabilisée par hectare et ayant un temps de demi-vie de 350 ans.

Quelle manipulation de chiffres !

On peut donc conclure que l'estimation de la quantité de matière organique stable dans le matériau terreux de Versailles est en très bon accord avec celles prévues à partir des différents modèles d'évolution de la matière organique. En particulier la très bonne concordance des estimations faites sur les dispositifs expérimentaux des 42 parcelles et de ROTHAMSTED peuvent se comprendre car les conditions climatiques et les compositions granulométriques des sols sont semblables.

b) Répartition granulométrique de l'azote

Sur la figure III.7, on a reporté les quantités d'azote trouvées dans les différentes fractions granulométriques (exprimées en g d'azote pour 100 g de fraction).

On constate que les fractions 0 - 2 μm extraites sont toujours plus riches que les fractions 2 - 20 μm correspondantes. Il est à rappeler qu'il n'en est pas toujours de même pour le carbone (cf. fig. III.6).

Comme pour le carbone on observe que l'accumulation (cas de la parcelle fumier) ou la disparition (cas des parcelles témoin et sous pelouse) de matière organique depuis l'installation du système expérimental entraîne une variation des teneurs en azotes dans les deux fractions granulométriques

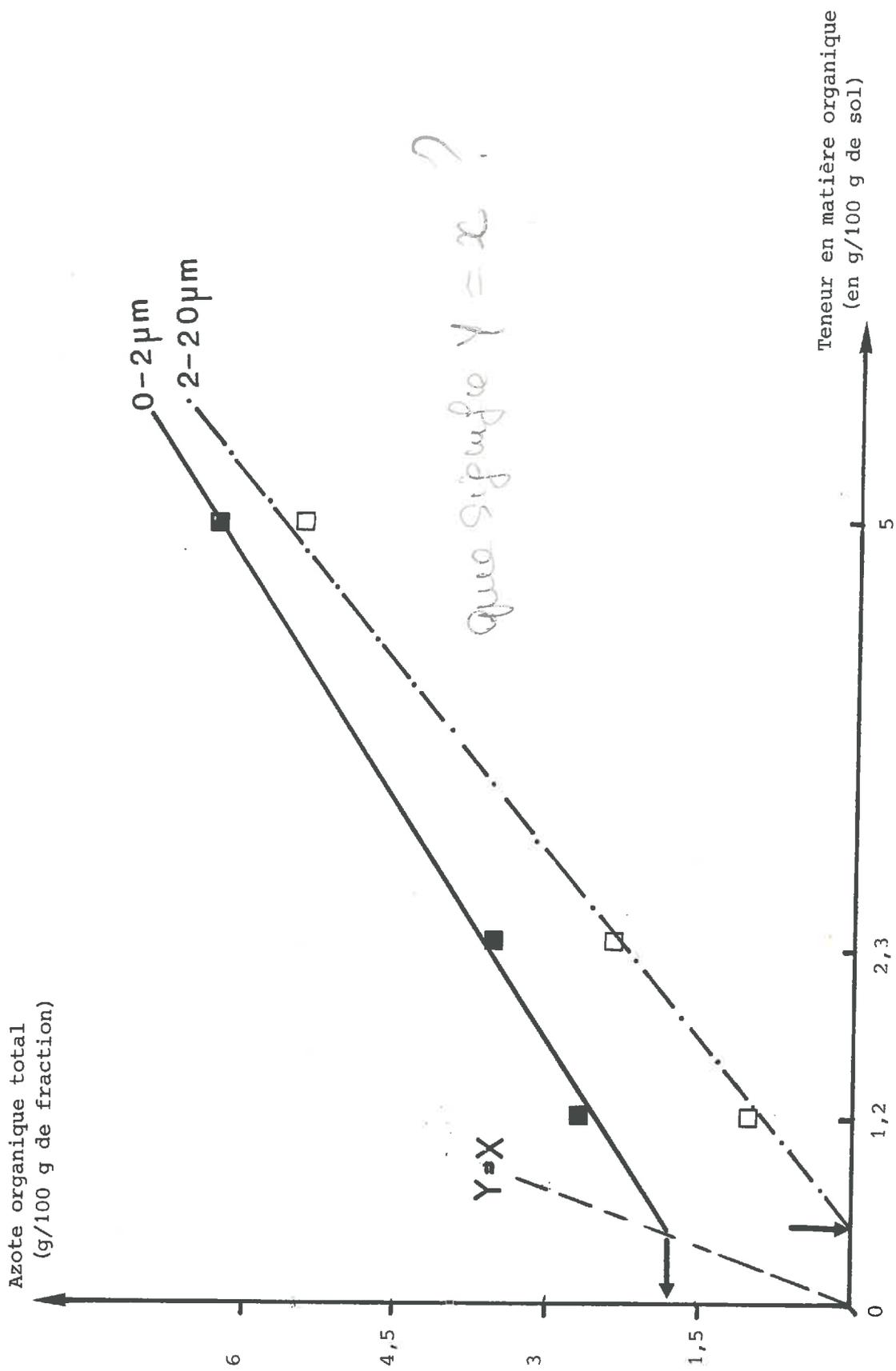


Figure III.9.: Répartition des teneurs d'azote organique total en fonction de la teneur en matière organique du sol global.

extraites.

Sur la figure III.9., nous avons porté la teneur en azote des fractions 0 - 2 μm et 2 - 20 μm en fonction de la teneur en matière organique des sols non fractionnés.

Comme pour le carbone, on observe que la teneur en azote de la fraction 2 - 20 μm décroît plus vite que la teneur en matière organique du sol non fractionné. A la limite, la teneur en azote - donc la quantité - sera nulle quand la teneur du sol en matière organique sera voisine de 0,4 %.

Inversement, la teneur en azote total - donc les quantités - de la fraction 0 - 2 μm décroît moins vite que la teneur en matière organique du sol non fractionné.

On observe donc que l'azote et le carbone ont des comportements semblables. Ceci est confirmé par la bonne relation linéaire entre les quantités d'azote et de matière organique trouvées dans les sols étudiés.

Sur nos systèmes, il serait alors légitime d'utiliser les mêmes paramètres pour décrire les dynamiques du carbone et de l'azote ; à savoir :

- présence, dans la fraction granulométrique 2 - 20 μm d'un seul type de matière organique caractérisée par un C/N de 11,5. Cette valeur a été obtenue en faisant la moyenne des rapports C/N déterminés sur les 3 fractions extraites des sols. Ce compartiment aura complètement disparu quand la teneur en matière organique du sol sera de 0,5 %.
- présence, dans la fraction granulométrique 0 - 2 μm de deux types de matière organique ayant des temps de résidence différents. Si nous admettons que le compartiment stable n'a pas varié pendant la durée de l'expérimentation, nous savons alors que les compartiments les plus labiles auront disparus quand la teneur en matière organique des sols non fractionnés sera

de 0,5 %. Pour cette valeur, la quantité d'azote contenue dans le sol sera de l'ordre de 0,30 % , c'est-à-dire que la matière organique stable aurait un C/N de 9,7.

c) Répartition granulométrique des polysaccharides

Dans le tableau III.11, nous avons regroupé les différents résultats caractérisant la distribution des polysaccharides dans les fractions granulométriques 0 - 2 μm et 2 - 20 μm . Les quantités de polysaccharides trouvées sont exprimées soit en mg pour 100 g de fraction, soit en g pour 100 g de matière organique. Ces valeurs sont reprises dans les figures III.10 et III.11.

Il ressort que les fractions 0 - 2 μm sont toujours plus riches en sucres que les fractions granulométriques 2 -20 μm et les quantités de polysaccharides trouvées se classent dans l'ordre suivant :

Pelouse > Fumier > Témoin

Cette accumulation de polysaccharides dans la fraction argileuse serait due soit à une incorporation dans les substances humiques stables, soit à des phénomènes d'adsorption qui induisent des changements de conformation et, par voie de conséquence, une protection vis-à-vis de la dégradation microbienne. L'existence de ces deux mécanismes de stabilisation a été montrée par PAUL et al. (1964).

Quand on rapporte les quantités de polysaccharides aux teneurs en matière organique trouvées dans les fractions 0 - 2 μm correspondantes, on s'aperçoit que seule la parcelle "pelouse" est très différente des autres ; ce qui n'est pas surprenant car il y a une accumulation de ces produits dans les sols sous prairie.

Par contre, l'accumulation des sucres dans la fraction 0 - 2 μm extraite de la parcelle témoin est plus intéressant. Ce phénomène peut s'expliquer de deux façons, à savoir :

Echantillons	Fractions	Matière organique g/100 g de fractions	Polysaccharides en mg/g de fractions	Polysaccharides en mg/g de fractions
TEMOIN	0 - 2 μm	3,87	1,16	3
	2 - 20 μm	1,92	0,38	1,85
FUMIER	0 - 2 μm	8,78	2,91	3,3
	2 - 20 μm	11,1	1,92	1,73
PELOUSE	0 - 2 μm	5,23	3,17	6,06
	2 - 20 μm	4,28	1,60	3,73

TABLEAU III.11 - Répartition granulométrique des polysaccharides en fonction des traitements.

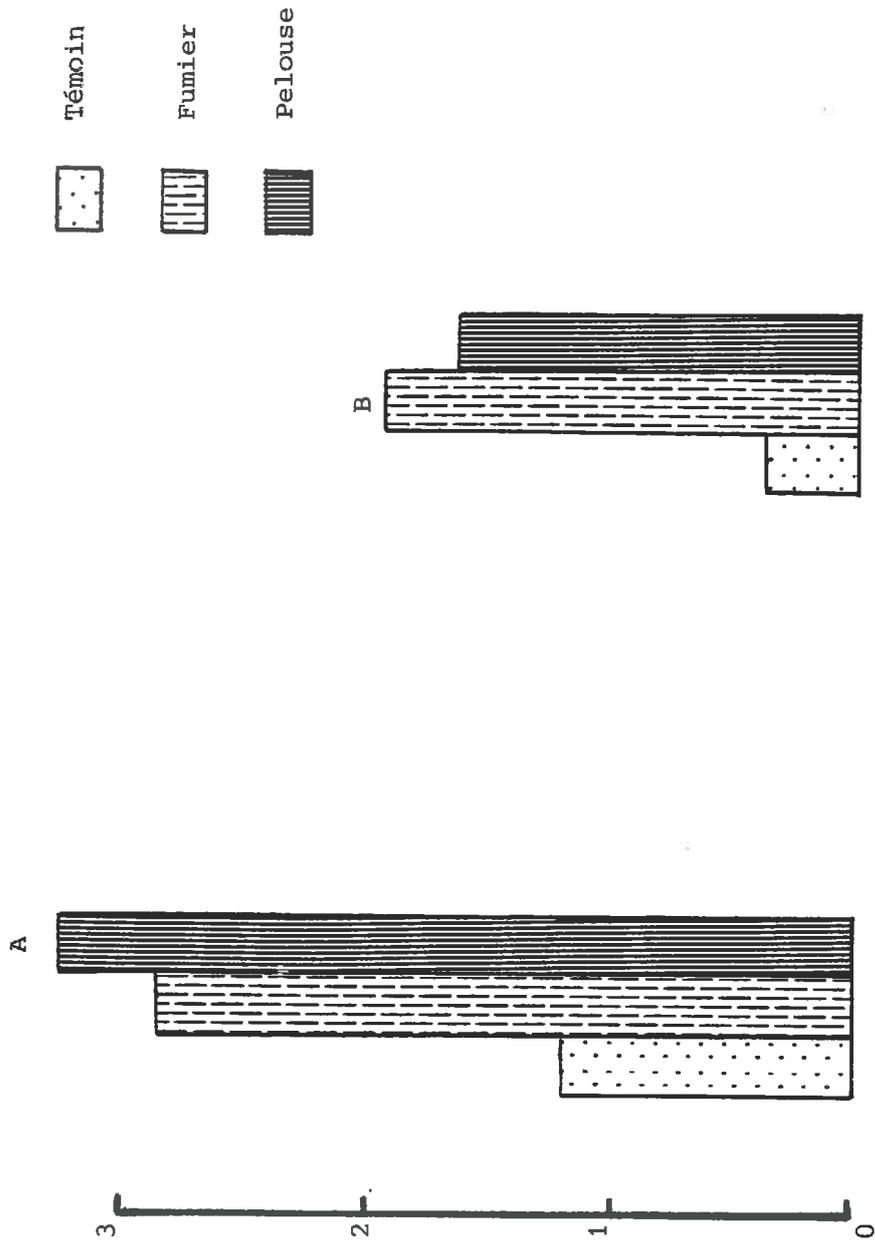


Figure III. 10 : Répartition des polysaccharides dans les fractions granulométriques 0 - 2 μ m (A) et 2 - 20 μ m (B) en fonction des traitements (quantités exprimées en mg/1000 g de fraction).

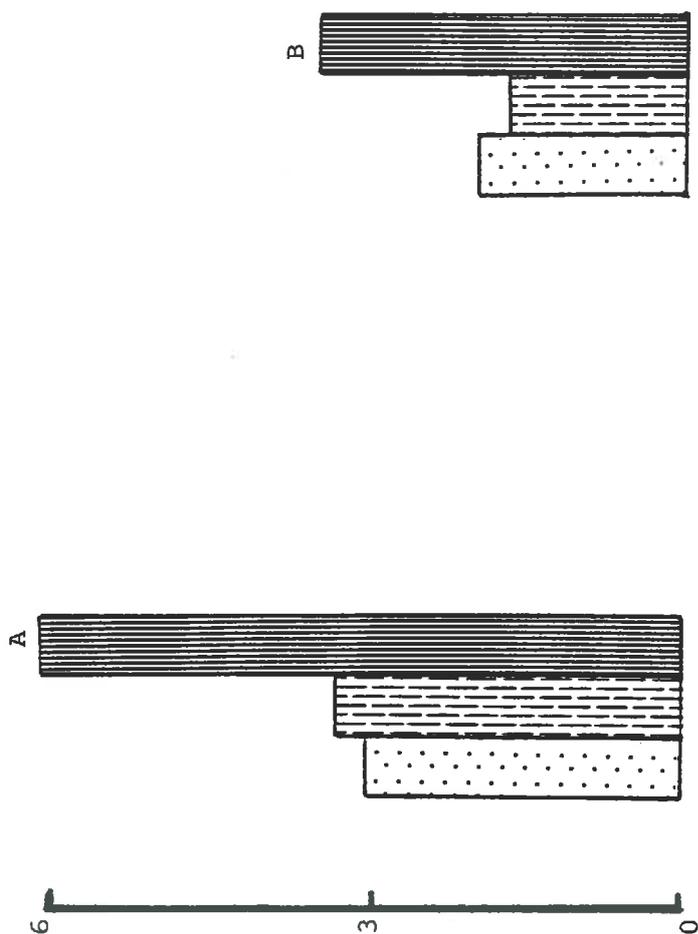
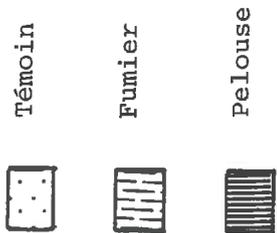


Figure III.11 : Répartition des polysaccharides dans les fractions granulométriques 0 - 2 μm (A) et 2 - 20 μm (B) en fonction des traitements (quantité exprimée en grammes/100 g de matières organiques).

- incorporation des sucres dans la matière organique stable non extractible sous une forme complexe résultant de réactions avec les phénols et les acides aminés (GALLALI, 1972 ; GRIFITHS et BURNS, 1972 ; GUCKERT, 1973).
- évolution des sucres vers des formes osamines résistantes à la dégradation microbienne (JACQUIN et al., 1972).

Il y a donc dans la parcelle "témoin" émergence d'un phénomène général décrit par DUCHAUFOR (1976) dans les termes suivants : "les composés glucidiques de nature relativement labile sont intégrés petit à petit dans une fraction de la matière organique insoluble, dite humine surévoluée, présentant une grande stabilité à la dégradation microbienne".

Dans les fractions 2 - 20 μm , les distributions observées sont semblables à celles trouvées dans les fractions 0 - 2 μm . Là encore, on observe que la matière organique trouvée dans le sol sous pelouse est plus riche en sucre que les deux autres qui restent sensiblement équivalentes :

- 3,7 % dans la matière organique trouvée dans la fraction granulométrique 2 - 20 μm extraite sous pelouse.
- 1,85 et 1,73 % dans les matières organiques localisées dans les fractions granulométriques 2 - 20 μm extraites des sols "témoin" et "Fumier".

3.4.6. Conclusions

Dans ce paragraphe, nous avons envisagé successivement la méthode de fractionnement du sol et la répartition granulométrique de la matière organique en fonction des traitements. C'est ainsi que nous avons défini un protocole expérimental alliant ultra sonification pour la dispersion du sol et tamisage-sédimentation pour le fractionnement granulométrique.

L'interprétation du fractionnement nous amène à formuler les hypothèses suivantes :

- Présence d'un seul compartiment dans la fraction granulométrique 2 - 20 μm ayant un C/N moyen de 11,5. Ce compartiment dont le contenu dépend de la quantité de résidus carbonés introduits annuellement aura disparu quand la teneur en matière organique du sol sera voisine de 0,5 %.
- Présence de deux compartiments ayant des stabilités différentes dans la fraction 0 - 2 μm . Sur nos systèmes, la quantité de matière organique contenue dans le compartiment stable serait estimée à environ 14 tonnes par hectare et pour les 20 premiers centimètres. Comme le C/N de cette matière organique est estimé à 9,7 la quantité d'azote immobilisé dans les 20 premiers centimètres de sol serait voisine de 850 kg. Comme pour le compartiment trouvé dans la fraction 2 - 20 μm , la quantité de matière organique labile trouvée dans la fraction 0 - 2 μm dépendra des quantités de carbone introduites dans le système.

A ce stade de la discussion et compte tenu des résultats présentés, il est impossible de savoir si les compartiments labiles trouvés dans les fractions 0 - 2 μm et 2 - 20 μm sont équivalents ou de nature différente. Ces aspects seront repris dans la discussion générale des résultats (chapitre V).

3.5 - CONCLUSIONS DU CHAPITRE III

Dans cette partie, nous récapitulerons les principales conclusions obtenues dans ce chapitre.

a) Sur le système expérimental choisi

142 parcelles, on note bien une variation de la teneur en matière organique soit en augmentation (parcelle fumier), soit en diminution (parcelle témoin et sol sous pelouse). Comme les granulométries des matériaux terreux provenant de ces trois traitements sont identiques, on se trouve dans les conditions d'application des modèles car seuls les imputs de carbone varient.

On observe également que les traitements ont induit des variations qualitatives, notamment :

- une diminution de l'extractibilité du carbone quand la proportion de matière organique stable augmente (tableau III.2) *en l'absence d'apport et sous pelouse*
- une accumulation de polysaccharides dans la matière organique stable non extractible (tableau III.4).

On est donc amené à proposer, comme l'ont fait déjà d'autres auteurs, une correspondance entre la nature chimique et la stabilité biologique des composés humiques.

b) Sur la distribution de la matière organique dans les agrégats de sol

Après avoir dosé, par analyse élémentaire, les quantités de matière organique dans des familles d'agrégats contenant une centaine d'individus, on a montré que :

- les agrégats extraits de la parcelle témoin et du sol sous pelouse se rangeaient dans une seule famille dont les caractéristiques dépendent du traitement.
- les agrégats extraits de la parcelle fumier se répartissent en plusieurs familles caractérisées par des teneurs en carbone et des formes différentes.

Dans ce dernier cas, les différentes familles

observées se déduisent les unes des autres en utilisant le modèle simple de HENIN et DUPUIS, c'est-à-dire que les différences observées sont le résultat de la minéralisation de fragments de fumier apporté les années précédentes. Ces différences ne concernent qu'une faible proportion de la matière organique présente dans ce type de sol qui, en tout état de cause, ne concerne pas les compartiments "moyennement stable" et "stable" car le temps de demi-vie est de 1 an.

c) Sur la méthode d'extraction des fractions granulométriques

La réalisation pratique du fractionnement granulométrique nécessite deux étapes successives, la fragmentation du sol à l'état particulaire et la séparation des particules en fonction de leur taille. Notre travail a consisté à appliquer à nos systèmes la méthode préconisée par C. VAUGON (1983). Le protocole suivant a été retenu :

- immersion, pendant 12 heures, de 20 g de sol dans 80 ml d'eau ; les récipients utilisés sont des tubes en pyrex de 7 cm de diamètre avec un fond hémisphérique.
- sonification de la suspension pendant 10 minutes. L'appareil utilisé est un BRANSON délivrant une puissance de 90 watts (fréquence : 20 kHz, sonde d'un diamètre de 3 mm).
- obtention des fractions 50 - 2000 μm par tamisage et des fractions 0 - 2 μm et 2 - 20 μm par sédimentation.
- centrifugation des suspensions contenant les fractions 0 - 2 μm et 2 - 20 μm .
- dessiccation des fractions par étuvage ou lyophilisation.

Dans ces conditions, on peut admettre que la dispersion des sols est bonne et que les ondes ultrasonores n'ont pas entraîné de modifications profondes, notamment au niveau des composés organiques.

d) Sur les résultats du fractionnement granulométrique de la matière organique

L'ensemble des résultats obtenus nous amènent à penser que les compartiments introduits dans les modèles d'évolution de la matière organique ont des localisations bien précises.

Ainsi, le compartiment stable de la matière organique serait localisé dans la fraction argileuse des sols. Ce compartiment serait caractérisé par :

- une taille constante pour les trois traitements : la quantité de matière organique stable serait voisine de 2,9 kg pour 100 kg d'argile. Dans notre cas, ceci représenterait environ 14 tonnes par hectare et dans les 20 premiers centimètres.
- un rapport C/N voisin de 9,7 : la quantité d'azote immobilisé dans les 20 premiers centimètres serait voisine de 1000 kg.

Par contre, on trouve dans toutes les fractions granulométriques un compartiment labile. Il y a donc deux compartiments dans la fraction 0 - 2 μm . Par contre, il n'y a qu'un seul compartiment dans la fraction 2 - 20 μm caractérisé par :

- une taille variable dépendant des quantités de matière organique enfouies. Toutefois, ce compartiment aura disparu quand la teneur en matière organique du sol sera de 0,5 %.
- un C/N voisin de 11,5.

Pour l'instant, nous ne pouvons pas conclure si les compartiments labiles trouvés dans les fractions 0 - 2 μm et 2 - 20 μm sont du même type ou sont différents.

CHAPITRE IV

CARACTERISATION DE LA MATIERE ORGANIQUE RECUEILLIE
DANS LES DIFFERENTES FRACTIONS GRANULOMETRIQUES EXTRAITES

4.1 - INTRODUCTION	P. 97
4.2 - EXTRACTIBILITE DE LA MATIERE ORGANIQUE	p. 98
4.2.1. Représentation des résultats	
4.2.2. Discussion des résultats	
4.2.3. Conclusions	
4.3 - STABILITE A L'HYDROLYSE ACIDE	P. 105
4.3.1. Représentation des résultats	
4.3.2. Discussion des résultats	
4.3.3. Conclusions	
4.4 - CAPACITES D'ECHANGE CATIONIQUE	p. 113
4.4.1. Analyse du problème	
4.4.2. Résultats	
4.4.3. Conclusions	
4.5 - ANALYSE THERMIQUE	p. 122
4.5.1. Analyse thermique pondérale	
4.5.2. Analyse thermique différentielle	
4.5.3. Analyse thermique différentielle sous azote	
4.5.4. Conclusions	
4.6 - MICROSCOPIE ELECTRONIQUE	p. 131
4.7 - SPECTROSCOPIE INFRAROUGE	p. 138
4.7.1. Attribution des bandes d'absorption	
4.7.2. Principes des mesures	
4.7.3. Résultats	
4.7.4. Conclusions	
4.8 - CONCLUSION GENERALE DU CHAPITRE IV.....	p. 147

4.1 - INTRODUCTION

Dans le chapitre précédent, nous avons étudié la distribution et la localisation de la matière organique dans le milieu poreux. Il a été montré que :

- Dans la fraction granulométrique 0 - 2 μm , on rencontre deux compartiments, l'un stable et l'autre labile.
- Dans la fraction granulométrique 2 - 20 μm , on ne trouve qu'un seul compartiment labile.

Dans ce chapitre, nous allons voir si ces compartiments sont ou non de nature différente, et si en particulier, la matière organique labile appartenant aux fractions 0 - 2 μm et 2 - 20 μm sont ou non identiques. Pour cela nous traitons successivement les 2 points suivants :

1°) Caractérisation des substances organiques par des méthodes chimiques :

- . Extractibilité par les réactifs alcalins
- . Stabilité à l'hydrolyse acide
- . Capacité d'échange cationique

2°) Caractérisation de la matière organique par les méthodes physiques :

- . Analyse thermique (ATD, ATG)
- . Microscopie électronique (MEB)
- . Spectroscopie infrarouge

4.2 - EXTRACTIBILITE DE LA MATIERE ORGANIQUE RECUEILLIE
DANS LES DIFFERENTES FRACTIONS GRANULOMETRIQUES

Dans les études réalisées sur le sol non fractionné, nous avons pu voir que l'extractibilité de la matière organique variait avec les traitements. Dans cette partie, nous allons étudier si la solubilité de la matière organique dans les solvants alcalins (pyrophosphate de sodium et soude N/10) varie avec sa localisation. Avant de présenter les résultats, nous discuterons du mode de représentation choisi.

4.2.1. Représentation des résultats

Soit une fraction granulométrique contenant deux types de matière organique ayant des propriétés différentes, notamment la proportion de composés extractibles. Dans ces conditions, nous pouvons écrire les relations suivantes :

$$x = x_1 + x_2 \quad (1)$$

$$y = y_1 + y_2 = k_1 x_1 + k_2 x_2 \quad (2)$$

x = quantité de matière organique contenue dans 100 g de fraction granulométrique.

où x_1, x_2 = quantités de matière organique de type 1 et 2

y = quantités de carbone extrait

k_1, k_2 : taux d'extrahibilité des deux types de matière organique présents dans la fraction granulométrique.

Dans notre cas, nous avons vu que le contenu du compartiment stable restait constant quel que soit le traitement. Les équations (1) et (2) deviennent alors :

$$x = a + x_2 \quad (a : \text{constante})$$

$$y = k_1 a + k_2 x_2 = k_1 a + k_2 (x - a)$$

d'où $y = a(k_1 - k_2) + k_2 x \quad (3)$

Dans le cas où une fraction granulométrique contient deux types de matière organique - dont un reste quantitativement constant - ayant des propriétés d'extractibilité différentes, il existe alors une relation linéaire entre quantités extraites et teneurs en matière organique des fractions. Plusieurs cas peuvent se présenter :

- $k_1 = 0$ $y = 0$ pour $x = a$
- $k_1 > k_2$ $y > 0$ pour $x = 0$
- $k_1 = k_2$ $y = k_2 x$

4.2.2. Discussion des résultats

Dans le tableau IV.1, on a reporté les quantités de carbone extraites par le pyrophosphate et la soude N/10 dans les différentes fractions granulométriques.

On peut constater que les bilans sont assez bons car les quantités trouvées oscillent entre 96 et 108 % de la quantité initiale. On remarque également que l'extractibilité

Echantillons	Fractions	C. total en %	en mg par g de fraction				en g pour 100 g de carbone			
			Carbone extractible		Carbone non ex- tractible	Carbone extractible		Carbone non ex- tractible		
			AH	AF		AH	AF			
TEMOIN	0 - 2 μm	22,48	2,80	1,40	17,3	12,46	6,23	76,9		
	2 - 20 μm	19,19	2,19	2,31	7,2	19,6	20,6	64,3		
FUMIER	0 - 2 μm	51,04	15,87	10,93	26,8	31,1	21,4	52,5		
	2 - 20 μm	64,73	14,8	14,9	32,0	22,86	23,0	49,4		
PELOUSE	0 - 2 μm	30,42	4,91	5,89	21	16,14	19,36	69		
	2 - 20 μm	24,89	4,41	6,59	13,1	17,72	26,5	52,6		

TABLEAU IV.1 - Fractionnement chimique de la matière organique contenue dans les fractions granulométriques 0 - 2 μm et 2 - 20 μm des sols étudiés.

décroit avec la teneur en matière organique de la fraction.

Sur la figure IV.2, on a représenté les quantités de carbone extrait dans les fractions granulométriques 0 - 2 μm et 2 - 20 μm en fonction de leurs teneurs en matière organique exprimées en g pour 100 g de fraction.

a) Extractibilité du carbone dans la fraction granulométrique 2 - 20 μm

Dans ce cas, on observe qu'il existe une relation linéaire du type $Y = AX$. D'après l'équation (3), ceci signifie qu'il n'y a qu'un seul compartiment. En effet, dire qu'il existe 2 compartiments ayant des caractéristiques identiques n'offre aucun intérêt.

A partir de la pente observée, on déduit que le carbone contenu dans la matière organique associée à la fraction granulométrique 2 - 20 μm est extractible à environ 45 %.

b) Extractibilité du carbone dans la fraction granulométrique 0 - 2 μm

Dans ce cas, on observe une relation linéaire du type $Y = AX + B$; ce qui signifie la présence de 2 compartiments ayant des caractéristiques différentes.

A partir de la pente de la droite observée, on déduit que le carbone de la matière organique contenue dans la fraction labile associée aux argiles est extractible à 80 %.

L'examen de la figure IV.2 montre également que la quantité de carbone extraite sera nulle quand la teneur matière organique de la fraction 0 - 2 μm sera égale à 3 %. D'après l'équation (3) on déduit que :

$$0 = a(k_1 - 0,8) + 0,8 \times 3$$

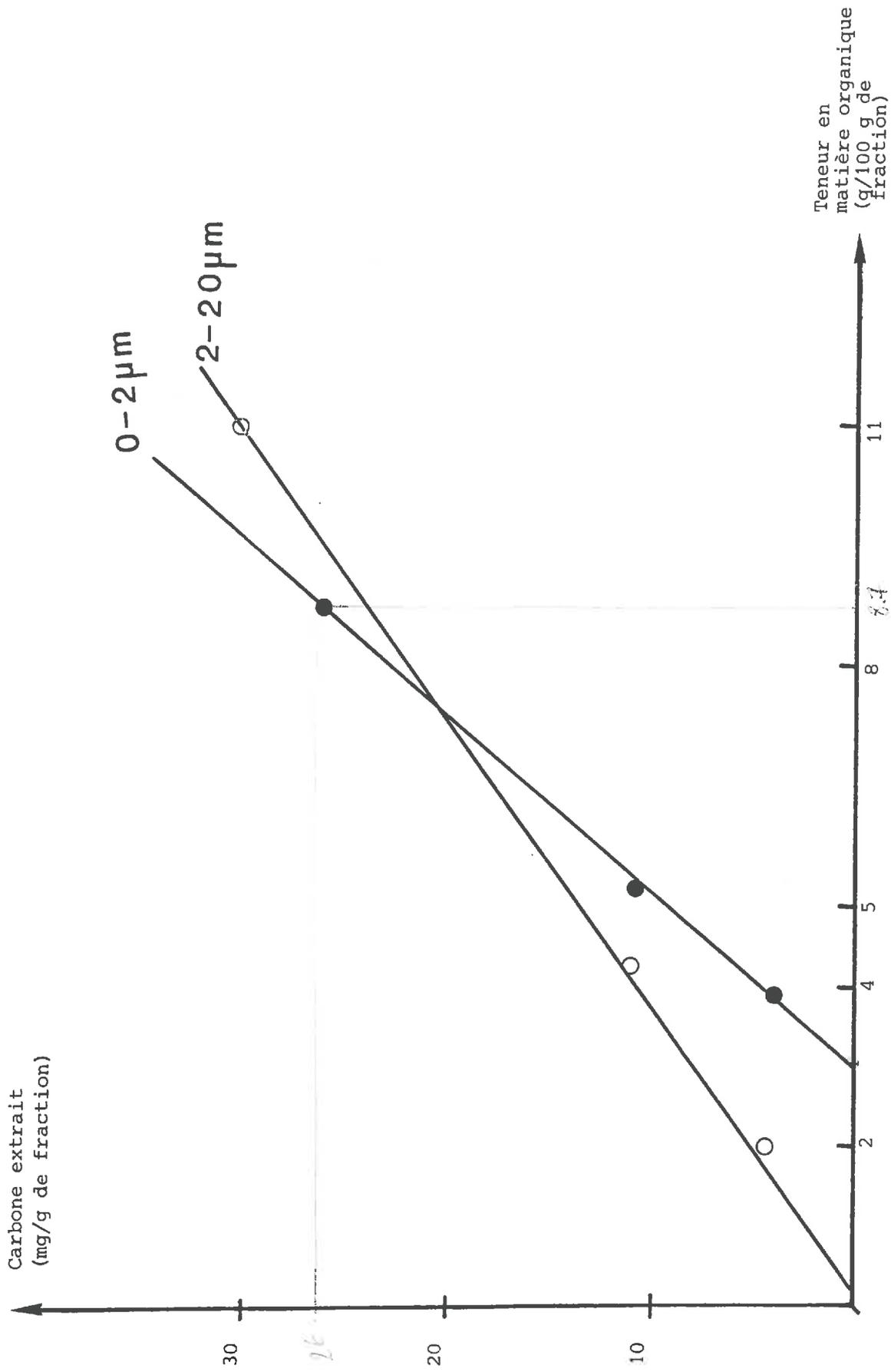


Figure IV.2 : Extractibilité de la matière organique contenue dans les fractions granulométriques 0 - 2 m et 2 - 20 m.

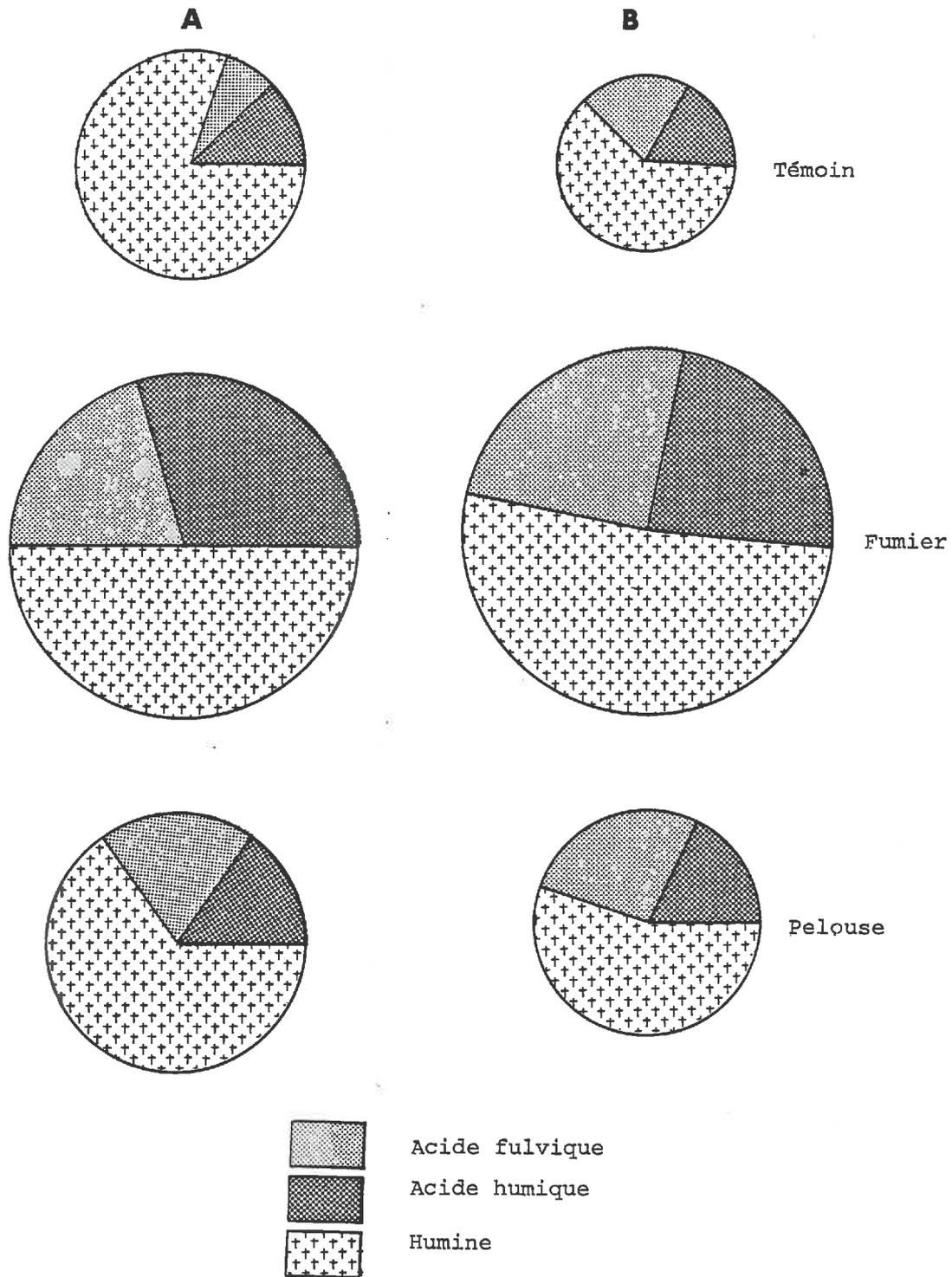


Figure IV.1 : Répartition des formes de matières organiques dans les fractions granulométriques A (0 - 2 μ m) et B (2 - 20 μ m) en fonction des traitements (quantités exprimées en mg/g de fractions)

Type de matière organique	Localisation	Taux d'extraction en %
- Labile	2 - 20 μm	45
- Labile	0 - 2 μm	80
- Stable	0 - 2 μm	0

TABLEAU IV.2 - Extractibilité des différents types de matière organique en fonction de leur localisation.

d'où $k_1 = (0,8a - 2,4)/a$

Comme k_1 est une grandeur positive ou nulle, On en déduit que la quantité de matière organique stable doit être supérieure ou égale à 3 %. Par ailleurs, la quantité de matière organique stable ne peut pas être supérieure à la quantité de matière organique trouvée dans le témoin. Ceci implique que k_1 est inférieur à 0,18.

Dans les précédentes interprétation, nous avons été amenés à conclure que la quantité de matière organique stable associée à la fraction argile était de l'ordre de 3 %.

On admettra désormais que cette valeur de 3 % est bien représentative ; ce qui implique que $k_1 = 0$. La matière organique stable associée aux argiles est donc non extractible.

4.2.3. Conclusion

L'étude de l'extractibilité du carbone montre que les différents types de matières organiques mis en évidence sont chimiquement différents. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau IV.2 et la figure IV.2.

4.3. - STABILITE A L'HYDROLYSE ACIDE DE L'AZOTE
CONTENU DANS LA MATIERE ORGANIQUE ASSOCIEE
AUX DIFFERENTES FRACTIONS GRANULOMETRIQUES

Dans le précédent chapitre nous avons pu montrer que les C/N des matières organiques étaient différents, à savoir :

Echantillons	Fractions	N. total en %	en mg par g de fraction				en g pour 100 g d'azote			
			N.hydrolysable:		N non hydroly- sable	N.hydrolysable		N non hydroly- sable		
			N α aminé	Amide +NH ₄		N α aminé	Amide +NH ₄			
TEMOIN	0 - 2 μm	2,71	0,86	0,92	0,81	31	34	30		
	2 - 20 μm	1,01	0,40	0,26	0,29	39	26	29		
FUMIER	0 - 2 μm	6,32	2,52	2,21	1,32	40	35	21		
	2 - 20 μm	5,54	2,63	1,26	1,22	48	23	22		
PELOUSE	0 - 2 μm	3,58	1,64	0,89	0,56	50	27	17		
	2 - 20 μm	2,38	1,05	0,73	0,45	44	31	19		

TABLEAU IV.3 - Distribution des formes d'azote dans les différentes fractions des sols étudiés.

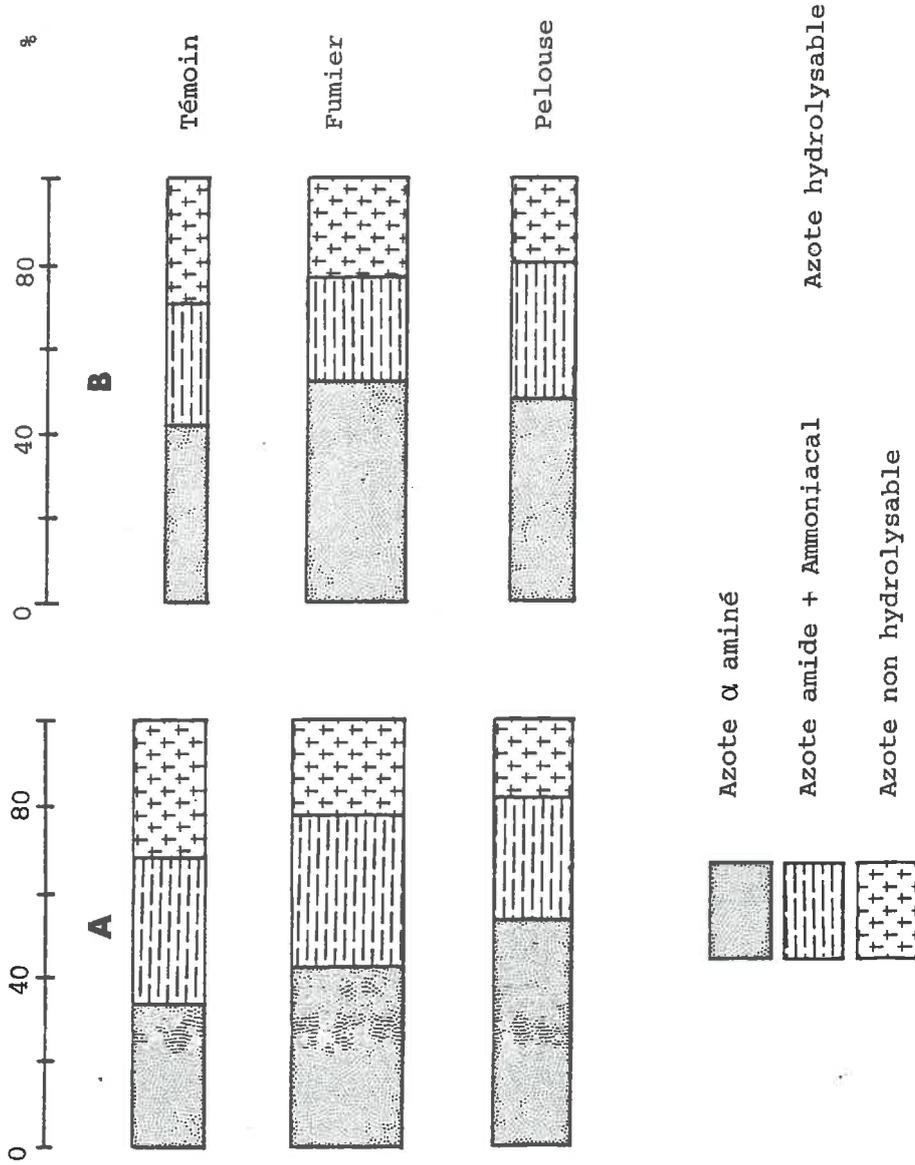


Figure IV.3 : Hydrolyse de l'azote dans les fractions granulométriques 0 - 2 μm (A) et 2 - 20 μm (B) extraites (exprimées en %) La hauteur des cartouches est proportionnelle à la quantité d'azote trouvée dans la fraction.

- C/N de l'ordre de 10 pour la matière organique stable associée aux argiles (0 - 2 μm).
- C/N de l'ordre de 12 pour la matière organique associée aux limons (2 - 20 μm).

Dans cette partie nous allons étudier la répartition des différentes formes d'azote contenues dans les trois types de matière organique mis en évidence. Pour cela, nous avons réalisé des hydrolyses acides selon la méthode BREMNER (1965) (cf. annexe).

4.3.1. Représentation des résultats

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau IV.3 et la figure IV.3. La répartition des différentes formes d'azote montre que, dans tous les cas, les formes hydrolysables sont plus importantes que les formes non hydrolysables. Il semblerait toutefois que l'azote non hydrolysable varierait plus avec le type de traitement qu'avec le type de matière organique. C'est ainsi que le sol témoin contient 30 % d'azote non hydrolysable bien que les teneurs en matière organique et en azote total des fractions granulométriques 0 - 2 μm sont les plus faibles.

Dans le sol sous pelouse, la matière organique contient relativement plus d'azote hydrolysable que celle contenue dans la parcelle fumier.

Devant les risques d'artefacts lors de l'hydrolyse acide (BREMNER 1974, JANEL 1979, ANDREUX 1978), nous n'interpréterons pas les variations des formes $\alpha\text{-NH}_2$ et "amidé + ammoniacal".

Comme pour l'extractibilité de la matière organique nous représenterons les quantités d'azote total et d'azote

hydrolysable en fonction des teneurs en matière organique des fractions granulométriques (Fig. IV.4 et IV.5).

4.3.2. Discussion des résultats

a) Hydrolyse de l'azote contenu dans la fraction granulométrique 2 - 20 μm

L'examen de la fig. IV.4 montre qu'il existe une assez bonne corrélation avec l'azote total et la teneur en matière organique. On est donc capable de calculer un C/N moyen de la matière organique à partir de la pente de la droite. La valeur de ce rapport est de l'ordre de 12.

Un calcul simple à partir de la pente de la droite indique qu'environ 72 % de l'azote contenu dans la matière organique associée à la fraction granulométrique 2 - 20 μm est sous forme hydrolysable.

b) Hydrolyse de l'azote contenu dans la fraction granulométrique 0 - 2 μm

Comme pour le carbone, nous pouvons écrire les relations suivantes :

$$X = a + x$$

$$Y' = Y_1 + Y_2 = ak_1 + k_2x \quad (1)$$

$$Y'' = am_1 + m_2x \quad (2)$$

où X = teneur en matière organique

a = teneur en matière organique du compartiment stable

x = teneur en matière organique du compartiment labile

k_1 et k_2 = quantité d'azote total contenue dans un gramme de matière organique stable et labile

m_1 et m_2 = quantité d'azote hydrolysable contenue dans un gramme de matière organique stable et labile.

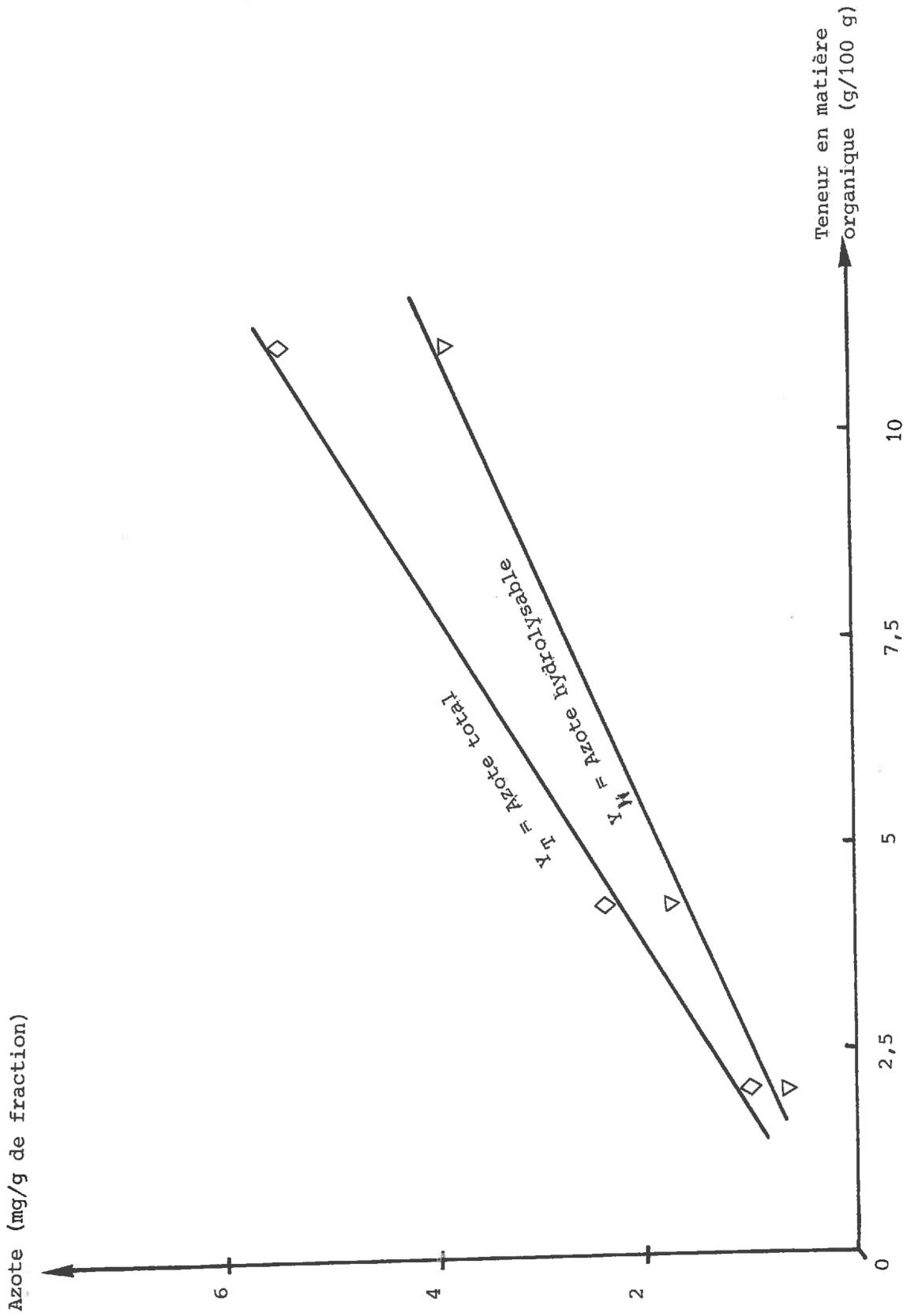


Figure IV.4 : Variations des teneurs en azote total (droite Y_T) et hydrolysable (droite Y_M) en fonction de la teneur en matière organique des fractions 2-20 μm.

Y' et Y'' = quantité d'azote total et hydrolysable contenue dans la fraction granulométrique considérée.

Après transformation, les équations (1) et (2) deviennent :

$$Y' = a (k_1 - k_2) + k_2 X \quad (3)$$

$$Y'' = a (m_1 - m_2) + m_2 X \quad (4)$$

Les taux d'azote hydrolysable contenu dans la matière organique stable et labile s'obtiennent en faisant les rapports m_1/k_1 et k_1/k_2 .

L'examen de la figure IV.5 montre que les quantités d'azote total et hydrolysable (exprimées en mg par gramme de fraction) sont reliées à la teneur en matière organique par les équations :

$$Y' = 0,8 X - 0,6$$

$$Y'' = 0,65 X - 0,91$$

d'où l'on tire :

$$k_2 = 0,8$$

$$m_2 = 0,65$$

ce qui conduit à des valeurs du C/N de l'ordre de 7,25 et un taux d'hydrolyse de l'azote de 81 % pour la matière organique labile associée à la fraction granulométrique 0 - 2 μ m.

En supposant que la quantité de matière organique stable est de 3 g/100 g de fraction, on obtient les valeurs suivantes :

$$k_1 = 0,6$$

$$m_1 = 0,35$$

ce qui conduit à un C/N de l'ordre de 9,7 et un taux d'hydrolyse de l'azote voisin de 58 % pour la matière organique stable

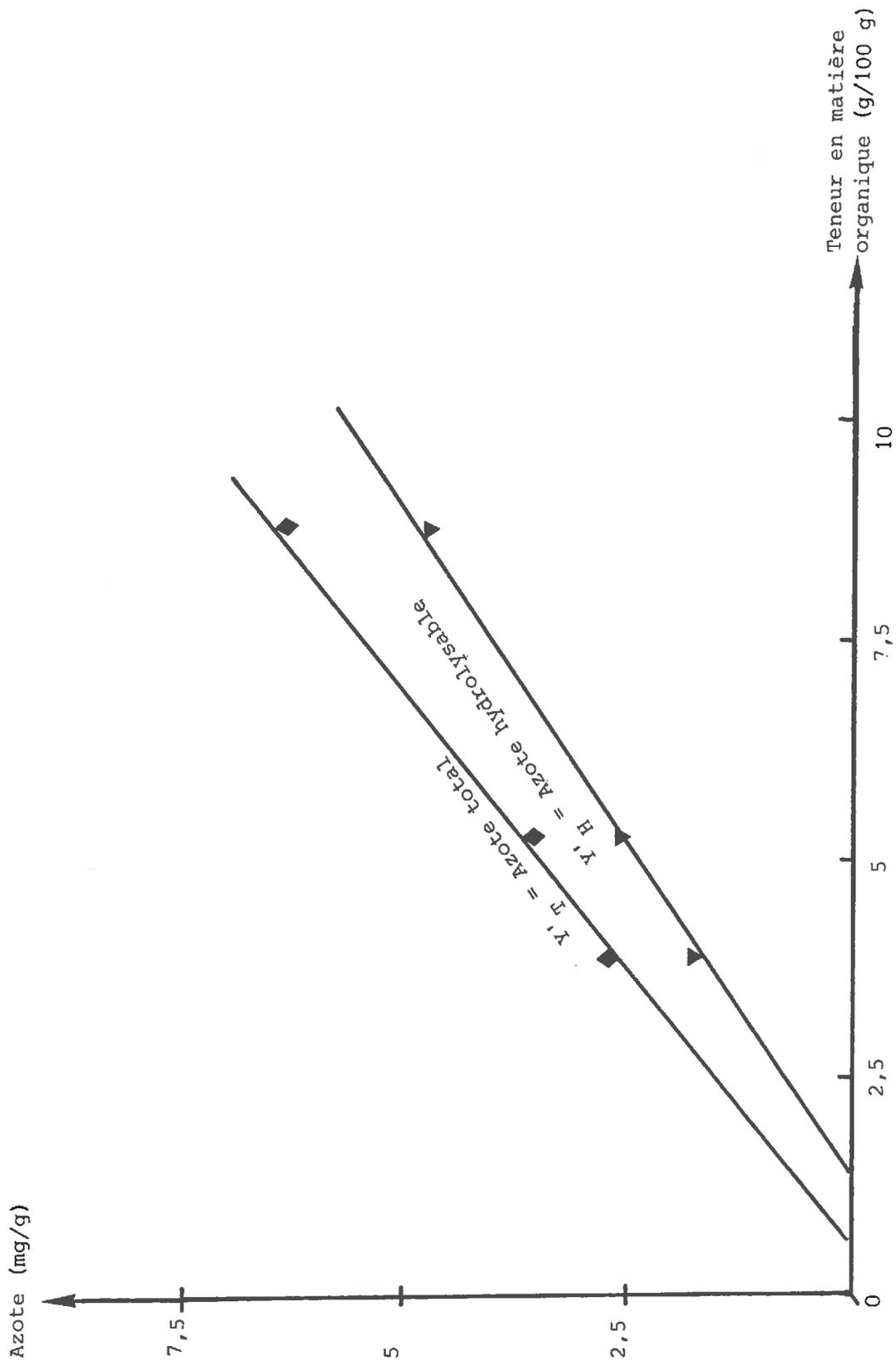


Figure IV.5 : Variations des teneurs en azote total (droite Y'_T) et hydrolysable (droite Y'_H) en fonction de la teneur en matière organique des fractions 0-2 μm .

associée à la fraction 0 - 2 μm .

4.3.3. Conclusion

L'étude de la distribution de l'azote hydrolysable et non hydrolysable montre que les trois types de matières organique associés aux fractions granulométriques 0 - 2 μm et 2 - 20 μm sont chimiquement différentes.

Les résultats sont résumés dans le tableau IV.4.

4.4 - ETUDE DE LA CAPACITE D'ECHANGE CATIONIQUE DES DIFFERENTES FRACTIONS GRANULOMETRIQUES

Comme pour les expériences précédentes d'extractibilité du carbone et d'hydrolysabilité de l'azote, nous avons déterminé les capacités d'échange cationique des fractions granulométriques extraites pour savoir si les matières organiques ont des contenus fonctionnels différents.

4.4.1. Analyse théorique du problème

Dans ce type de détermination, nous ne pourrons pas interpréter aussi facilement les résultats que précédemment. En effet, la valeur de la capacité d'échange cationique dépend des phases organique et minérale.

On est donc conduit à faire les hypothèses suivantes :

- la capacité d'échange cationique de l'association est la

Types de matières organiques	Localisation	C/N	Taux d'N hydrolysable
- Labile	2 - 20 μm	12	70 %
- Labile	0 - 2 μm	7	80 %
- Stable	0 - 2 μm	10	60 %

TABLEAU IV.4 - Taux d'azote hydrolysable et rapport C/N des différents types de matière organique en fonction de leur localisation.

Fractions		C.E.C. meq/100 g	Teneur en matières organiques
Témoin	0 - 2 μm	42	3,87
	2 - 20 μm	13	2
Fumier	0 - 2 μm	55	8,78
	2 - 20 μm	32	11
Pelouse	0 - 2 μm	45	5,24
	2 - 20 μm	18	4,28

TABLEAU IV.5 - Capacité d'échange cationique des fractions granulométriques 0 - 2 μm et 2 - 20 μm extraites (exprimées en meq pour 100 g de fractions organo-minérales).

somme des capacités d'échange des phases prises séparément. Cette hypothèse est bien entendu critiquable mais acceptable (DEMOLON, 1959).

- la phase argileuse contient deux compartiments organiques alors que la fraction granulométrique 2 - 20 μm n'en contient qu'un seul.

4.4.2. Résultats

Les capacités d'échange cationiques ont été déterminées par la méthode classique (cf. annexe). Les résultats obtenus sont consignés dans le tableau IV.5.

a) Estimation de la capacité d'échange cationique de la matière organique associée à la fraction granulométrique 2 - 20 μm

Dans ce cas, il n'y a qu'un seul type de matière organique. La capacité d'échange Y' est due à x grammes de matière organique et $(100 - x)$ grammes de phase minérale ayant des capacités d'échanges respectives C_o et C_m exprimée en meq/g.

$$Y' = (100 - x)C_m + x.C_o \quad (1)$$

$$Y' = 100C_m + (C_o - C_m)x \quad (1)'$$

La représentation graphique de la C.E.C en fonction des teneurs en matière organique des fractions granulométriques est donnée dans la figure IV.6.

On en déduit que la capacité d'échange de la phase minérale est voisine de 9 meq/100 g. Il est donc vraisemblable que des particules inférieures à 2 μm soient incluses dans cette fraction.

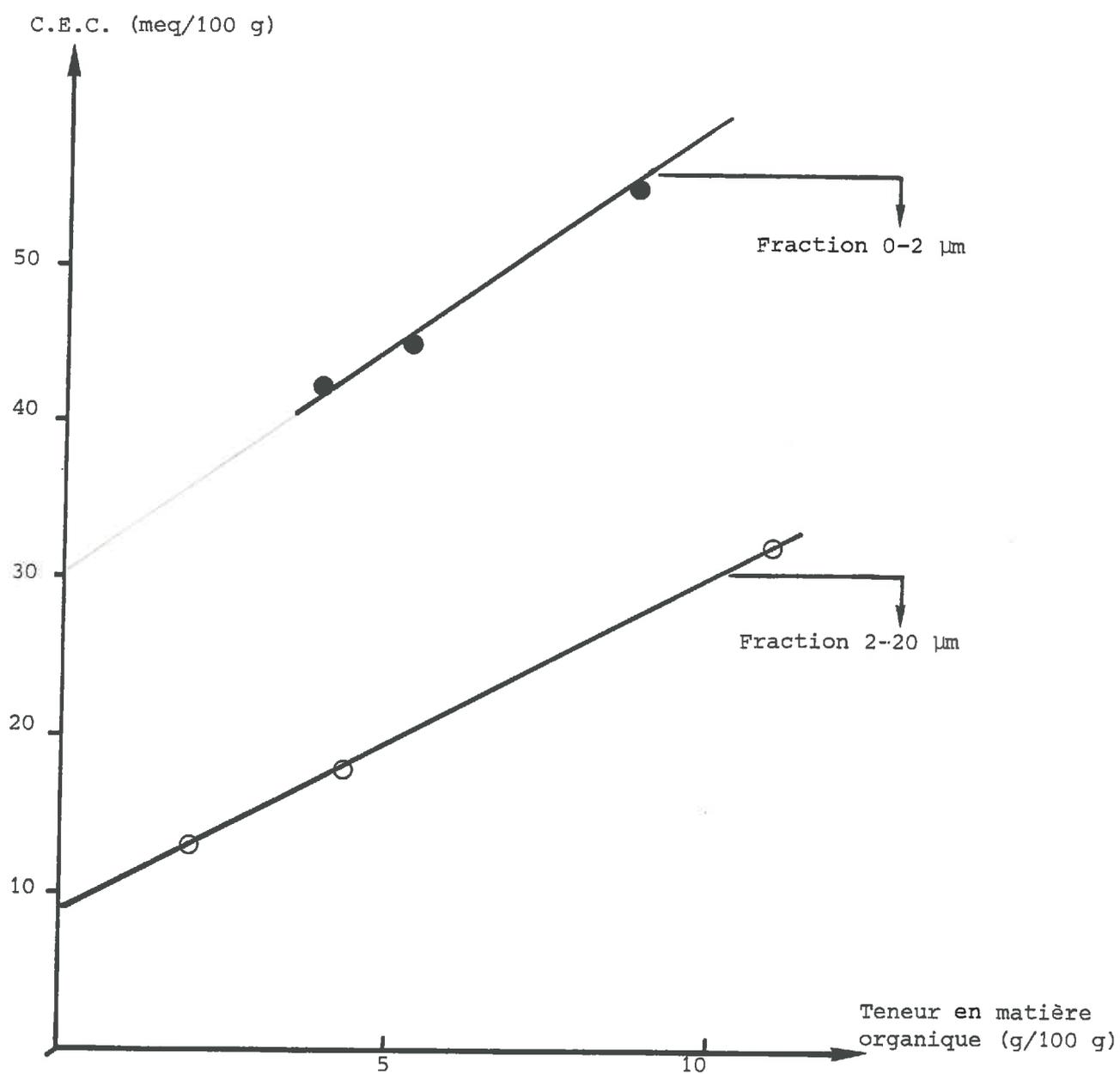


Figure IV.6 : Capacités d'échange cationique des fractions 0-2 μm et 2-20 μm en fonction de la teneur en matières organiques.

A partir de la pente de la droite, on en déduit que $C_o - C_m$ est égal à 2, c'est-à-dire que la capacité d'échange de la matière organique est voisine de 210 meq/100 g.

b) Estimation de la capacité d'échange de la matière organique associée à la fraction granulométrique 0 - 2 μ m

Dans notre cas, nous avons vu que la fraction granulométrique 0 - 2 μ m contient deux types de matière organique.

- l'une stable dont la quantité reste constante d'un échantillon à l'autre
- l'autre labile dont les quantités varient d'un échantillon à l'autre.

Supposons que ces deux types de matière organique sont chimiquement différents et caractérisés par des capacités d'échange C_1 et C_2 .

Pour 100 g de fraction, la capacité d'échange totale Y' sera :

$$Y' = (100 - x_1 - x_2)C_m + x_1C_1 + x_2C_2 \quad (2)$$

C_m = C.E.C. de la phase minérale

où x_1 = Quantité de matière organique stable

x_2 = Quantité de matière organique labile

Comme x_1 est constant, l'équation précédente devient :

$$Y' = 100C_m + x_1(C_1 - C_2) + (C_2 - C_m)x$$

où x = teneur en matière organique totale de la fraction.

Dans ce cas, il est impossible de déterminer les

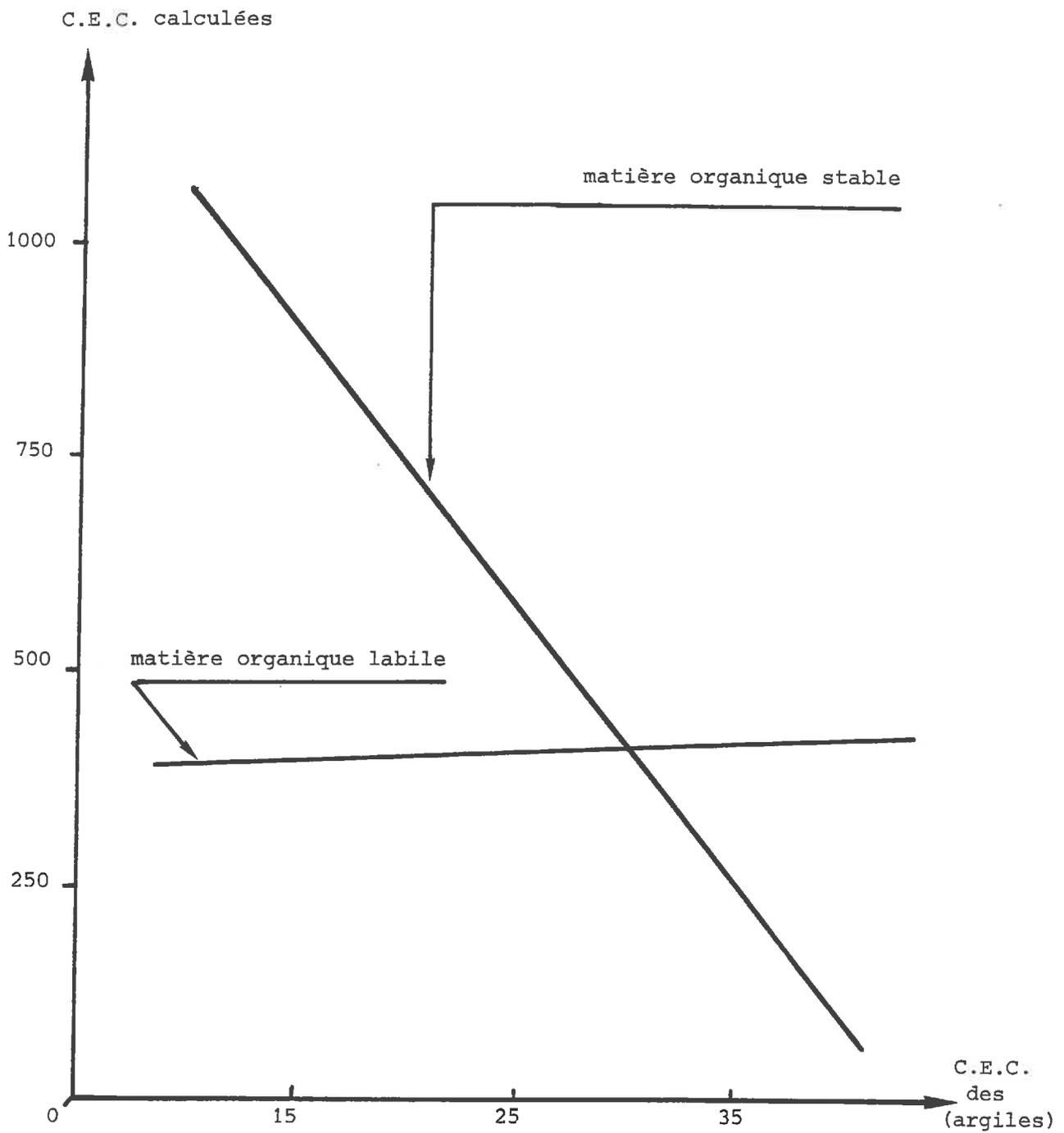


Figure IV.7 : Variations théoriques des C.E.C. de la matière organique stable et labile en fonction de la C.E.C. de la fraction argileuse.

valeurs C_1 et C_2 car il faut connaître x_1 et C_m . Dans la suite des calculs nous admettrons que $x_1 = 3$.

Pour estimer la capacité d'échange de la phase minérale, nous avons détruit la matière organique avec de l'eau oxygénée. Les résultats obtenus indiquent que C_m serait de l'ordre de 30 à 35 meq/100 g. avec une valeur moyenne de 32 meq/100 g.

A partir de la droite expérimentale représentant la capacité d'échange de la fraction granulométrique 0 - 2 μm en fonction de la teneur en matière organique, on a :

$$C_2 - C_m = 3.8$$

$$100C_m + x_1(C_1 - C_2) = 30$$

d'où l'on déduit :

$$4,12 < C_2 < 4,15$$

$$4,12 < C_1 < 2,45$$

On voit immédiatement qu'une faible erreur sur la capacité d'échange de la phase minérale entraîne une erreur très importante sur celle de la fraction organique stable. Sur la figure IV.7, on a simulé les variations des capacités d'échange des fractions labile (C_2) et stable (C_1) pour différentes valeurs de la capacité d'échange de la fraction minérale. Dans ces calculs, nous avons supposé que $Y' = 30$ quand $X = 0$ et que $x_1 = 3$.

La détermination de la C.E.C des associations organo-minérales montre que les trois types de matière organique identifiés dans les sols ont des caractéristiques chimiques différentes.

En effet, plus les substances humiques sont polymérisées et plus le nombre de groupements fonctionnels à l'origine de la capacité d'échange (fonctions carboxyliques) est faible.

Types de matières organiques	Localisation	C.E.C. meq/100 g
- Labile	2 - 20 μm	200
- Labile	0 - 2 μm	400
- Stable	0 - 2 μm	250-350

TABLEAU IV.6 - Capacité d'échange cationiques des différents types de matières organiques en fonction de leur localisation.

L'hypothèse d'un pool organique facilement extractible, peu polymérisé donc labile, localisé dans la fraction 0 - 2 μm est donc compatible avec la mesure des capacités d'échange.

4.4.3. Conclusions

La mesure des capacités d'échanges des fractions granulométriques 0 - 2 μm et 2 - 20 μm nous amène à conclure que les matières organiques associées ont des structures chimiques différentes. Les résultats obtenus sont rassemblés dans le tableau IV.6.

Deux remarques importantes doivent être faites :

- l'ordonnée à l'origine de la droite C.E.C en fonction de la teneur en matière organique peut être différente de la capacité d'échange de la phase minérale. Ceci peut indiquer la présence de deux compartiments ayant des stabilités et capacités d'échange différentes. On peut dire que la déviation de la linéarité pour les plus faibles teneurs peut s'interpréter autrement que par l'existence d'interactions supprimant des sites d'adsorption.
- l'utilisation des capacités d'échange pour caractériser la matière organique stable associée aux argiles est une méthode peu performante. En effet, une faible erreur sur la C.E.C de la phase minérale entraîne des variations considérables sur la C.E.C de la matière organique du compartiment stable.

4.5 - CARACTERISATION DES MATIERES ORGANIQUES PAR ANALYSES THERMIQUES

C'est une technique déjà employée par MITCHELL (1960), SCHNITZER et HOFFMAN (1964) KIERSHAW et BOHNER (1969) DUPUIS et al. (1970) pour caractériser les composés humiques.

4.5.1. Analyse thermique pondérale (ATP)

Cette méthode consiste à déterminer en fonction de la température les quantités de constituants volatils dégagés ou décomposés lors du chauffage.

Les diagrammes obtenus par ATP présentent tous, au moins deux pertes de poids (figures IV.8, IV.9, IV.10) :

- l'une entre la température ambiante et 150 - 200°C correspondant au départ de l'eau hygroscopique. Elle varie de 4 à 8 % pour les fractions 0 - 2 μm et de 1 à 4 % pour les fractions 2 - 20 μm et de 1 à 2 % pour les sols entiers.
- l'autre aux environs de 350 et 370°C. Elle correspond à l'oxydation et la décomposition de la matière organique.

Pour les fractions granulométriques inférieures à 2 μm , on note une troisième perte de poids vers 480° - 500°C. Il s'agit de la deshydroxylation des argiles (cf. paragraphe sur l'A.T.D) qui est un phénomène endothermique. Comme on n'observe pas de perte de poids, ni de phénomène endothermique sur les fractions 2 - 20 μm du témoin et de la parcelle fumier, on en déduit que ces fractions ne contiennent pas (ou peu) de fraction argileuse. Par contre l'existence de ces signaux avec la

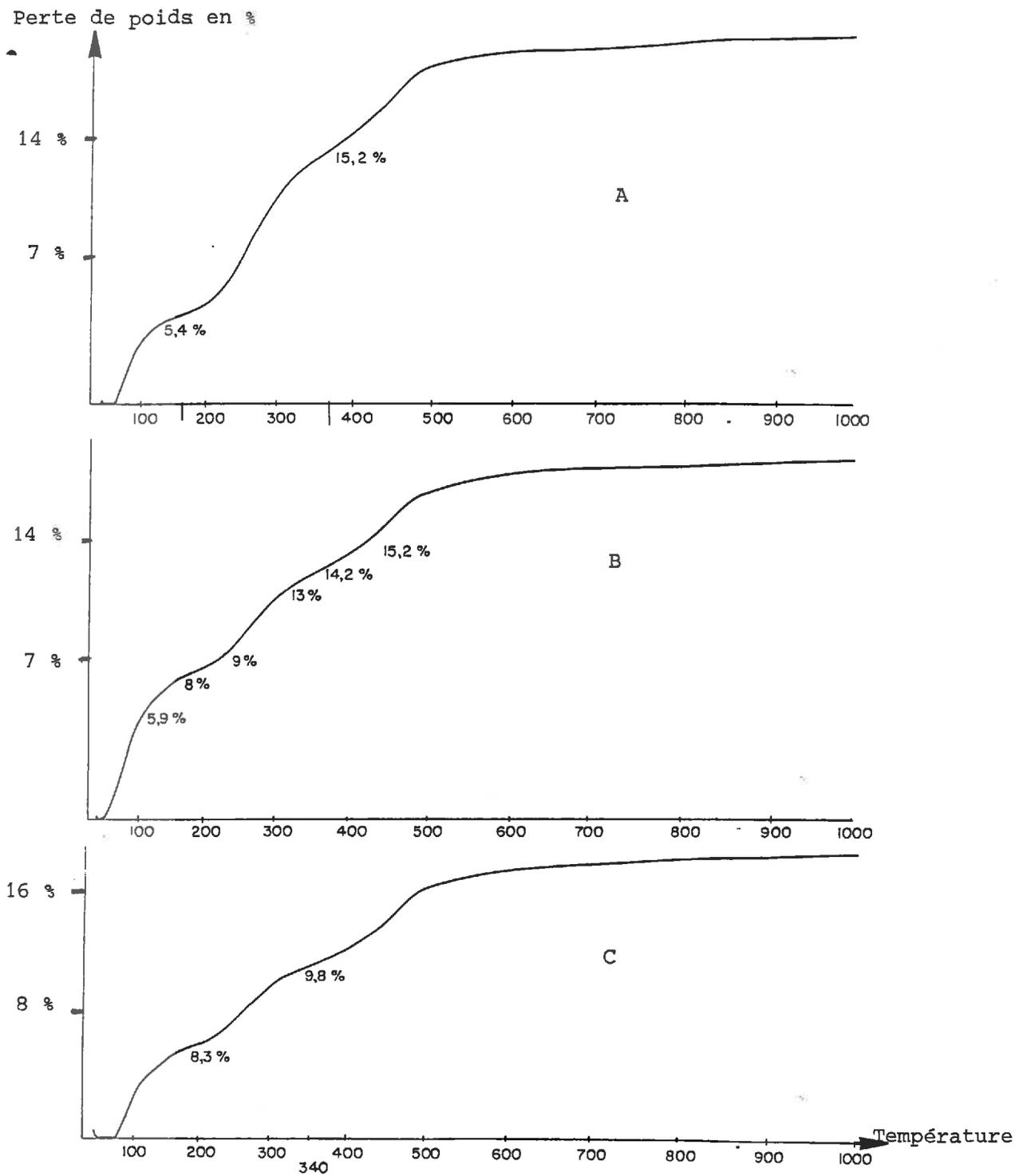


Figure IV.8 : Courbes d'analyse thermopondérale des fractions 0-2 μm extraites.
A - Fumier
B - Pelouse
C - Témoin.

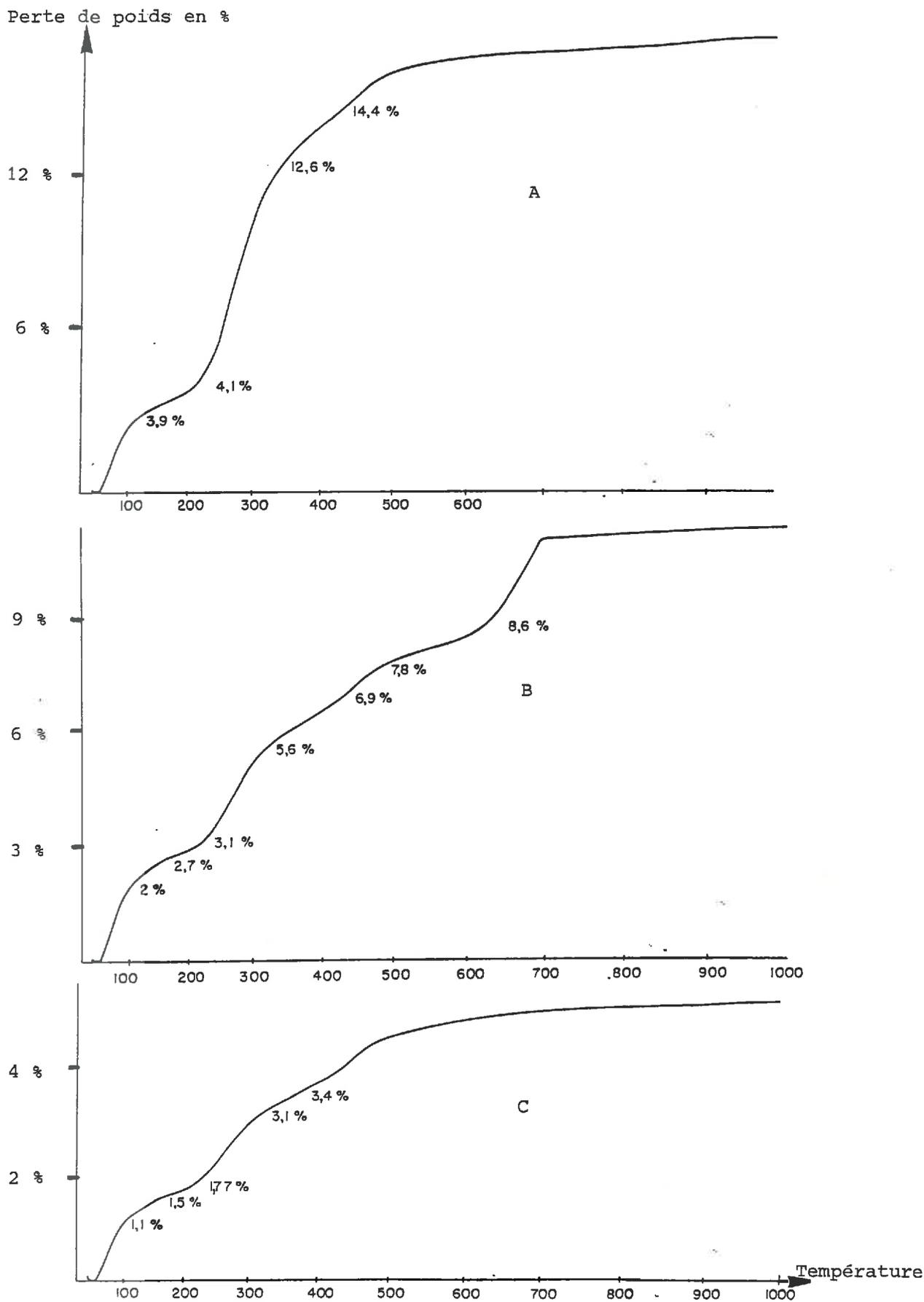


Figure IV.9 : Courbes d'analyse thermopondérale des fractions 2-20 μm de sols
 A - Fumier
 B - Pelouse
 C - Témoïn

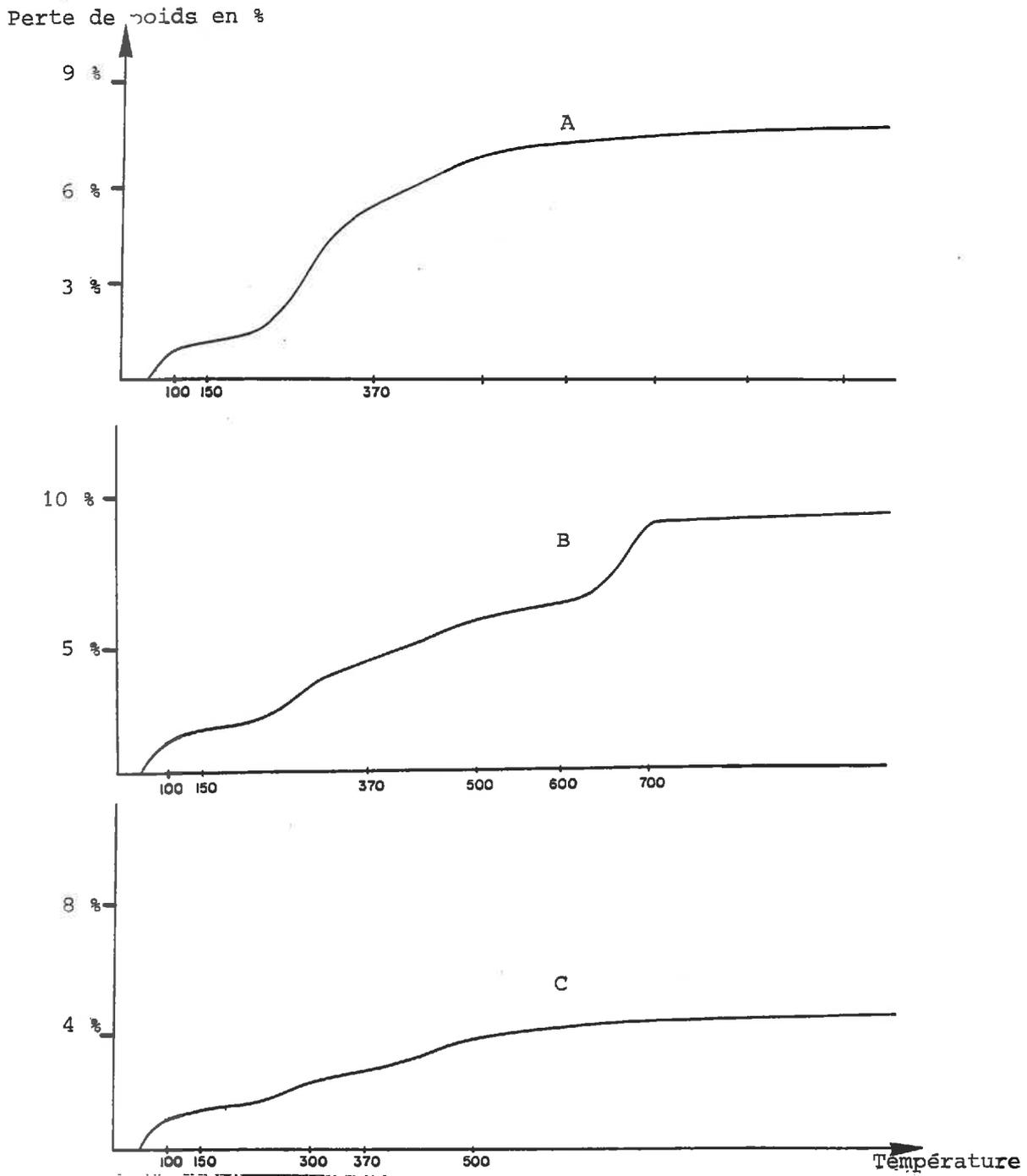


Figure IV.10 : Courbes d'analyse thermopondérale des sols :
A - Fumier
B - Pelouse
C - Témoin.

fraction 2 - 20 μm de la prairie confirme bien une mauvaise dispersion des argiles.

Il est également intéressant de noter que les pertes de poids entre les épaulements situés vers 150 - 180°C et 350 - 370°C correspond bien à la teneur des échantillons en matière organique totale déterminées chimiquement.

4.5.2. Analyse thermique différentielle (A.T.D)

Les courbes d'ATD que nous avons obtenues sur les échantillons de sol et sur les diverses fractions organo-minérales extraites après fractionnement présentent toutes les mêmes allures (cf. figure IV.11).

a) Fractions granulométriques 0 - 2 μm

Toutes les courbes (1,2 et 3 sur la fig. IV.9) présentent un crochet endothermique d'intensité moyenne dont le maximum est situé vers 120°C pour la fraction extraite de la parcelle fumier et 150°C pour les deux autres.

Dès 210 - 220°C, commence toujours un phénomène exothermique, de forte intensité, qui culmine vers 300 - 320°C. En fin de réaction, un pic endothermique, de faible intensité, se développe vers 480 - 520°C.

b) Fractions 2 - 20 μm

Par rapport aux courbes précédentes, les diagrammes A.T.D. des fractions 2 - 20 μm présentent les différences suivantes :

- absence de pic exothermique à 320°C pour la fraction du sol témoin

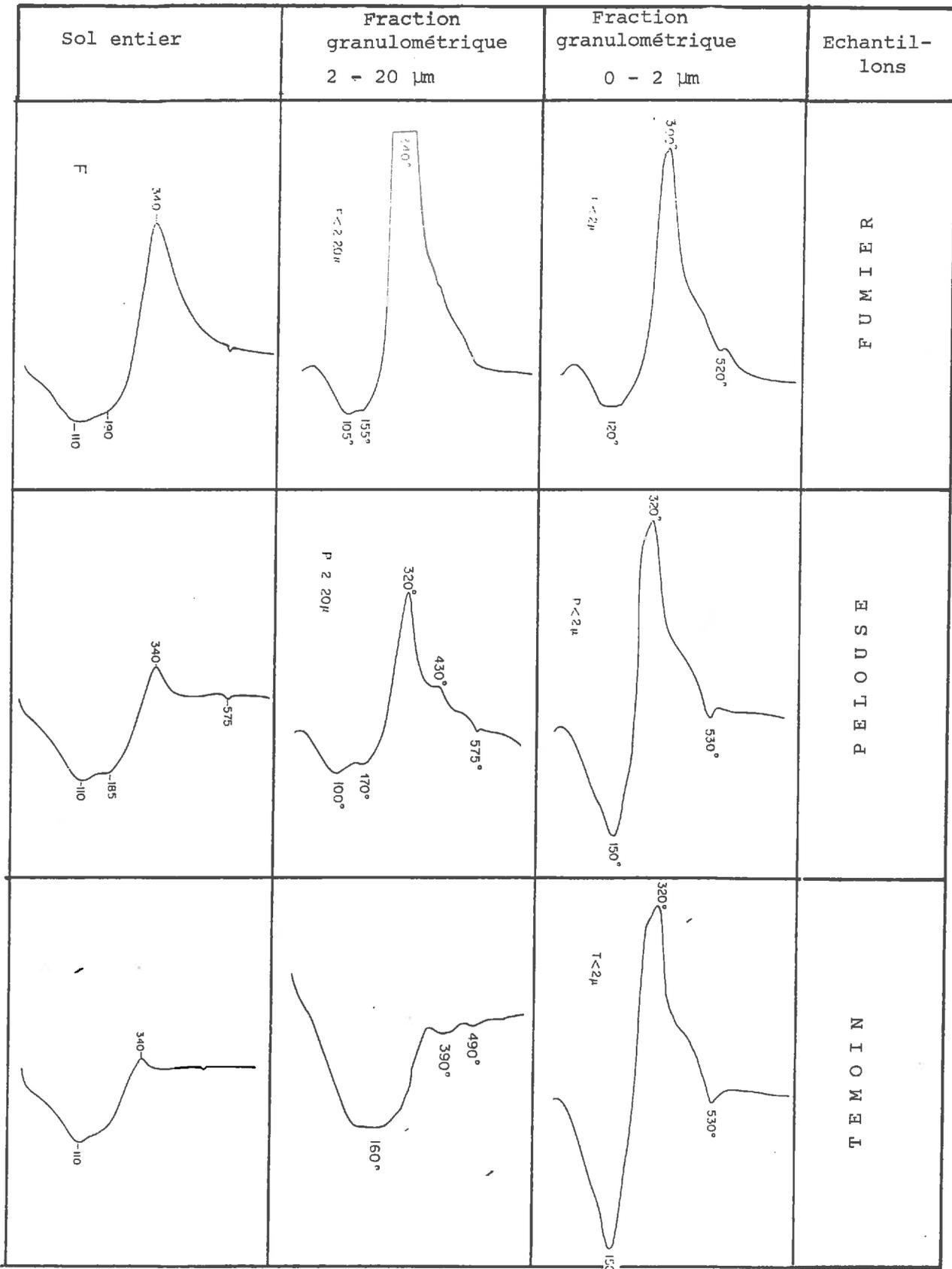


Figure IV.11 : Courbes d'analyse thermique différentielle sous oxygène.

- forte intensité du pic exothermique dans la zone d'oxydation de la matière organique (320°C) pour la fraction extraite de la parcelle fumier.
- présence de pics endothermiques de faible intensité à 575° pour les fractions du témoin et de la pelouse.

c) Sol entier

Les échantillons de sol non fractionnés et les fractions 0 - 2 µm correspondantes ont des caractéristiques semblables :

- un pic endothermique vers 120 - 150°C
- un pic exothermique vers 320 - 350°
- en fin de réaction un crochet endothermique de faible intensité vers 480°C.

d) Discussion des résultats

Le premier pic endothermique traduit les départs successifs de l'eau hygroscopique et de l'eau d'hydratation des cations (DUPUIS et al., 1970).

Pour les températures les plus élevées observées dans ce domaine, il peut y avoir également une légère déshydroxylation de la matière organique. (SCHNITZER et KHAN, 1978). Dans nos conditions expérimentales, il ne nous est pas possible de dissocier le départ d'eau du début de la déshydroxylation.

L'accident exothermique qui culmine vers 320 - 350°C serait principalement dû à l'oxydation de la matière organique sans rejeter l'hypothèse d'une deshydroxylation de minéraux mal cristallisés. Ce dernier phénomène, s'il existe, est toutefois mineur car les pertes de poids correspondant au signal exothermique permettent de retrouver les teneurs en matière organique.

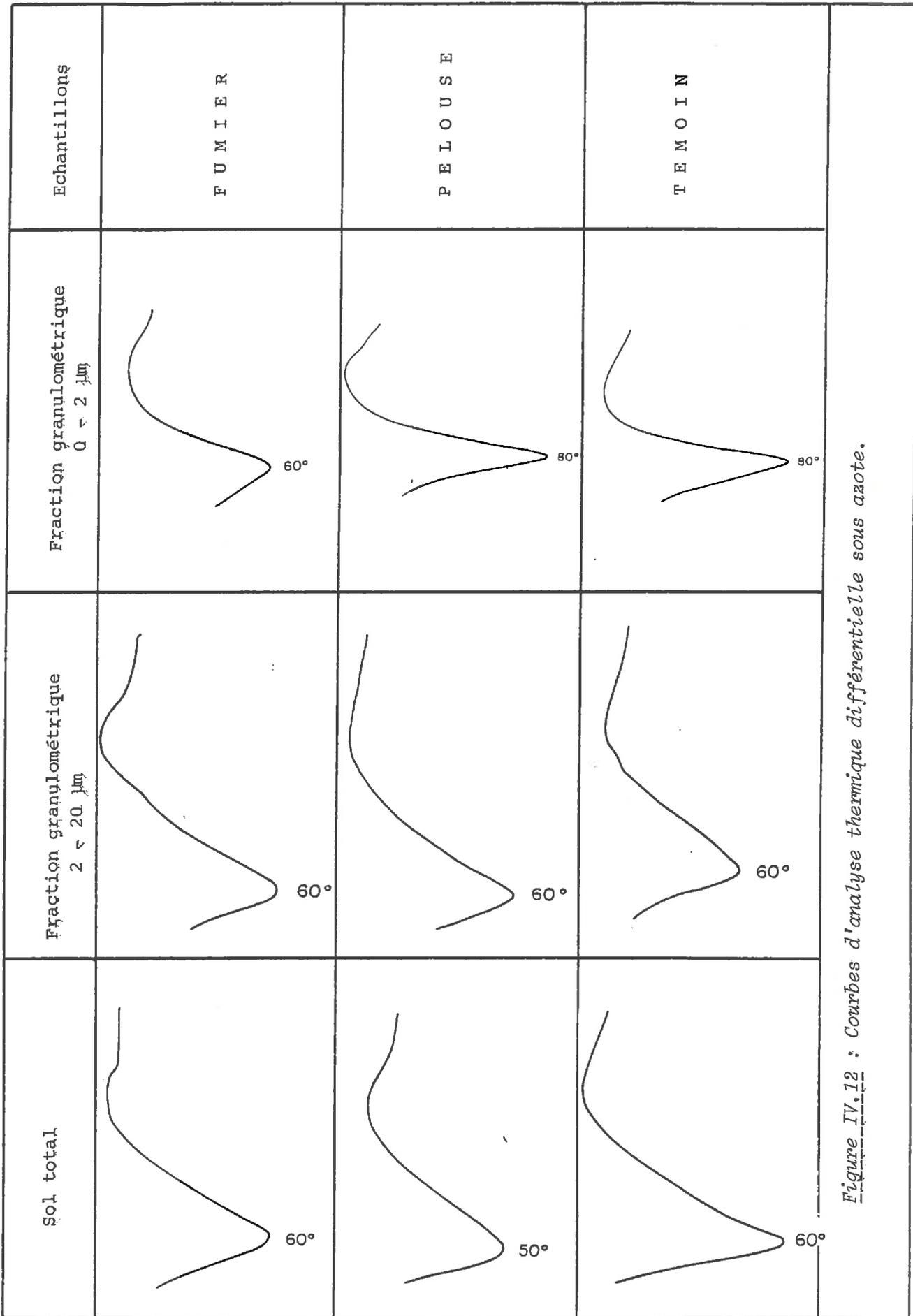


Figure IV.12 : Courbes d'analyse thermique différentielle sous azote.

Les courbes d'A.T.D obtenues ne permettent pas de différencier les matières organiques associées aux fractions granulométriques extraites des différentes parcelles. Ces observations sont conformes aux résultats publiés par DUPUIS et al. (1975) qui ont montré que :

- des matières libres du type lignine s'oxydent à ces températures
- la température d'oxydation dépendrait davantage de la phase minérale associée que de la structure chimique de la matière organique (JAMBU et DUPUIS, 1975).

Comme les matériaux étudiés ont des minéralogies identiques, l'analyse thermique différentielle ne permet pas de détecter de différences significatives dans la nature chimique des matières organiques associées aux fractions associées.

4.5.3. Analyse thermique différentielle sous azote

Dans ce cas, les courbes A.T.D sont différentes des précédentes (figure IV.12). En particulier, le pic endothermique est moins intense alors que le pic exothermique disparaît presque complètement.

Cette expérience prouve bien que le pic exothermique observé en A.T.D en présence d'oxygène correspond à la combustion de la matière organique. Ce faible signal observé sous azote est attribuable à des phénomènes de pyrolyse ou d'auto-oxydation (MITCHELL, 1980).

4.5.4. Conclusions

D'une façon générale, on peut synthétiser les

résultats obtenus en distinguant, en fonction de la température, trois grandes zones :

- zone 1 allant de la température ambiante à 200°C : il s'y produit un départ d'eau et éventuellement une déshydroxylation de la matière organique. Ces phénomènes sont endothermiques
- zone 2 allant de 200 à 370°C : il y a combustion de la matière organique et éventuellement une déshydroxylation de composés amorphes. Ce phénomène est exothermique et la perte de poids correspondant bien à la teneur en matière organique des échantillons.
- zone 3 allant de 480° à 700°C associée à des transformations de la phase minérale.

Cette méthode d'analyse ne nous a pas permis de différencier les trois types de matière organique déjà mis en évidence.

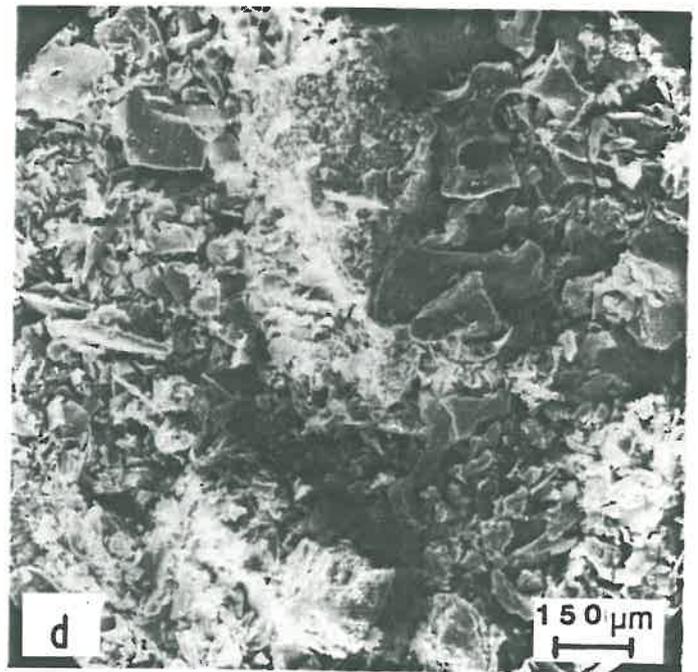
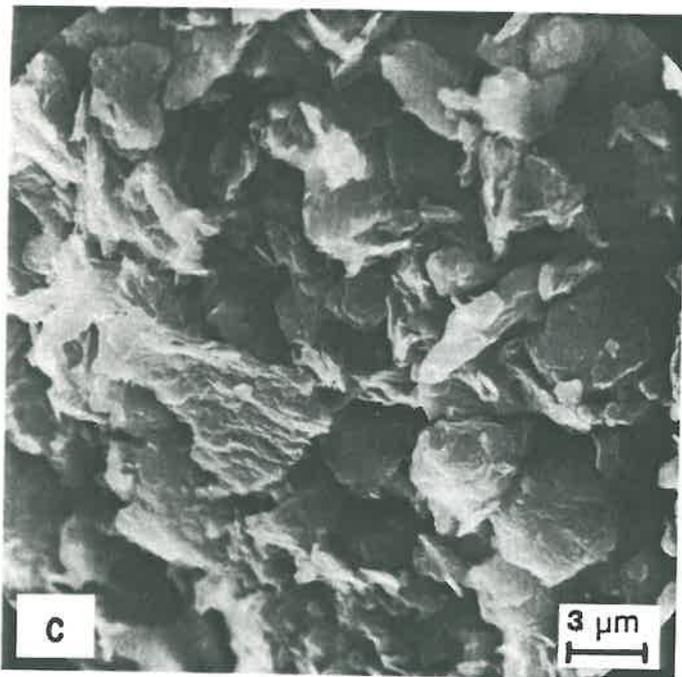
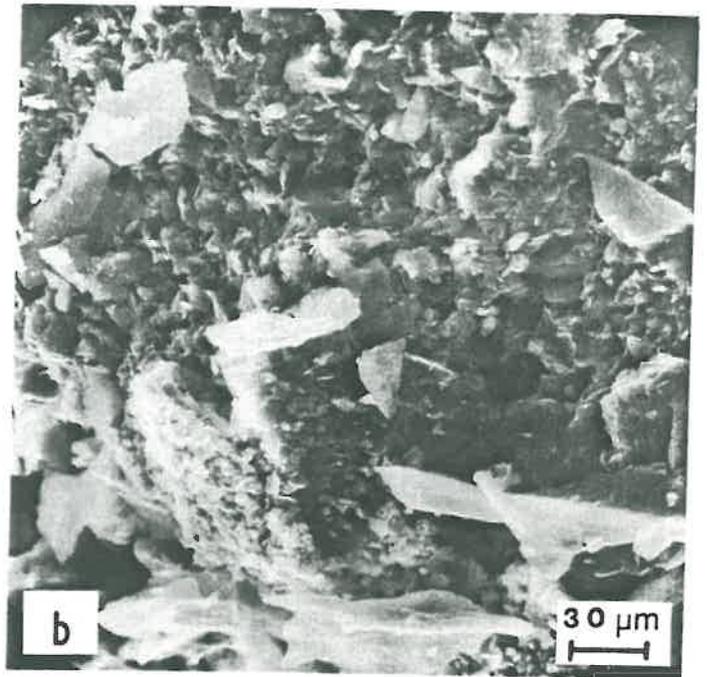
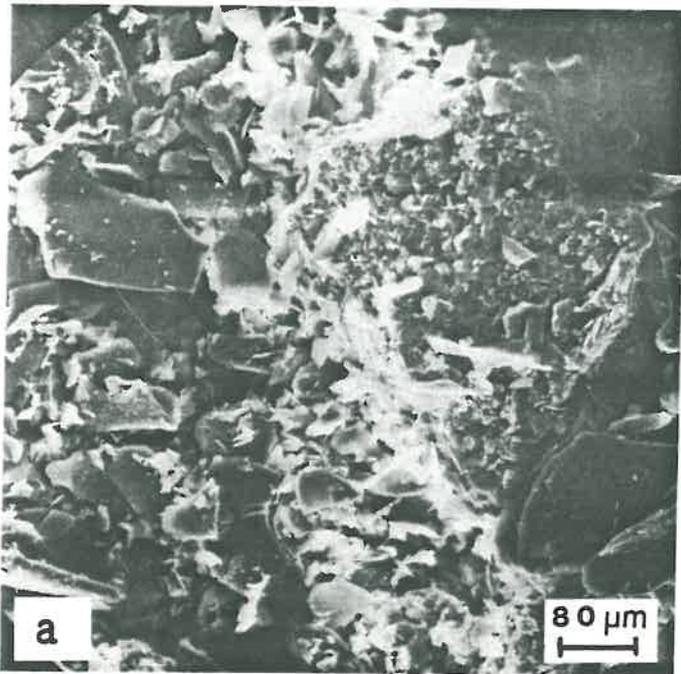
4.6 - MICROSCOPIE ELECTRONIQUE

Après fractionnement des matériaux, nous avons procédé à la morphoscopie des différentes associations extraites. Chaque fraction granulométrique préalablement lyophilisée est métallisée à l'or palladium.

Les observations ont été réalisées avec un microscope électronique à balayage. Les différents clichés obtenus sont présentés dans les planches VI à XI.

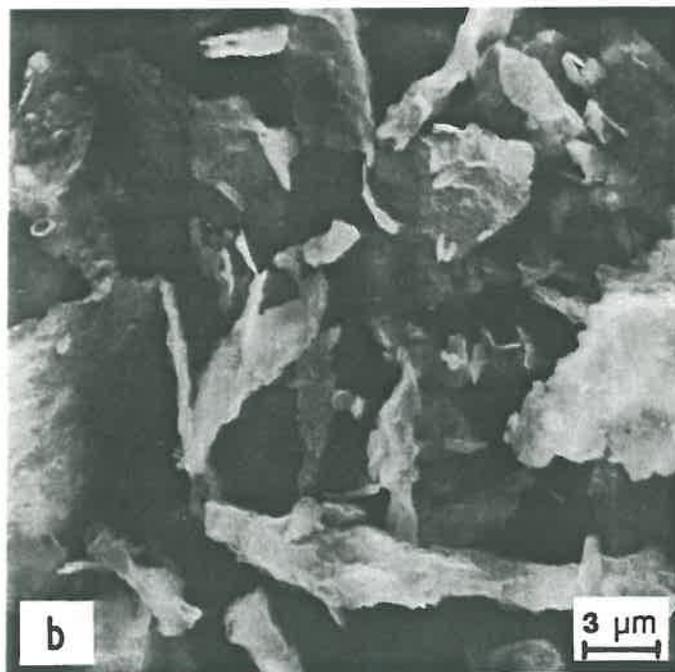
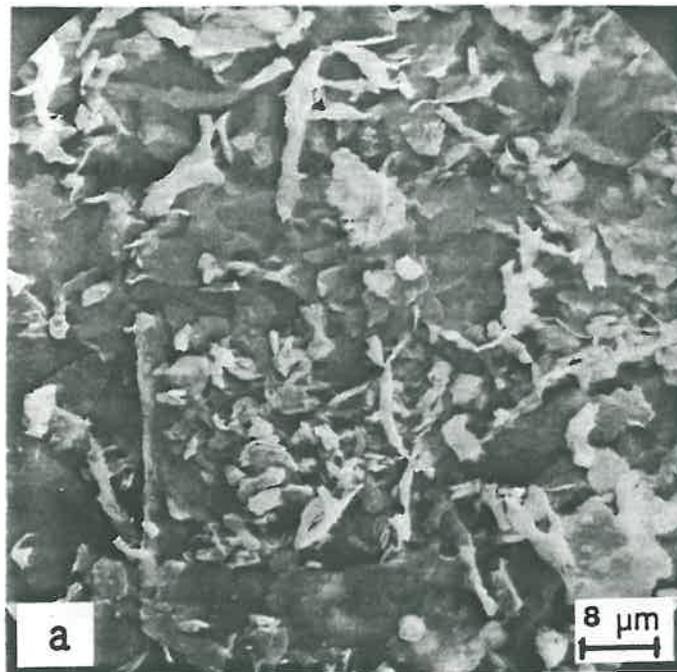
L'examen des photos ne permet pas de localiser et caractériser les différents compartiments déjà mis en évidence

PLANCHE VI



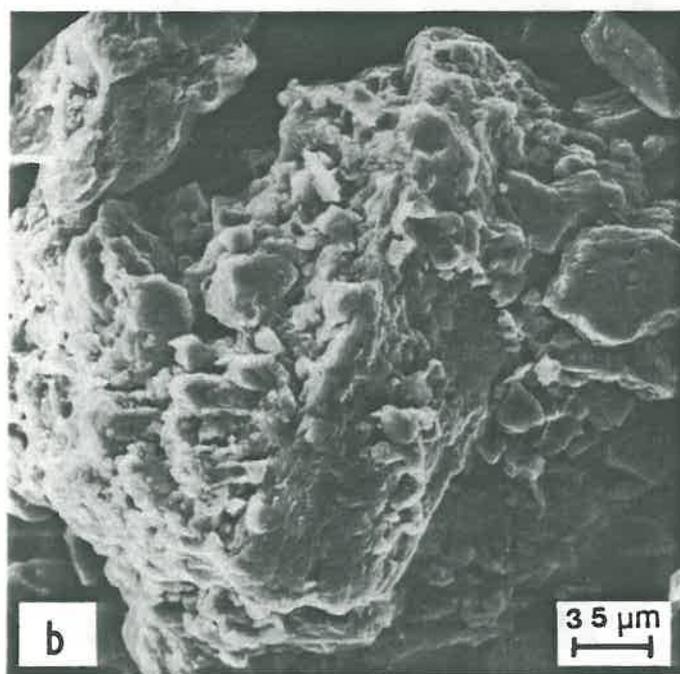
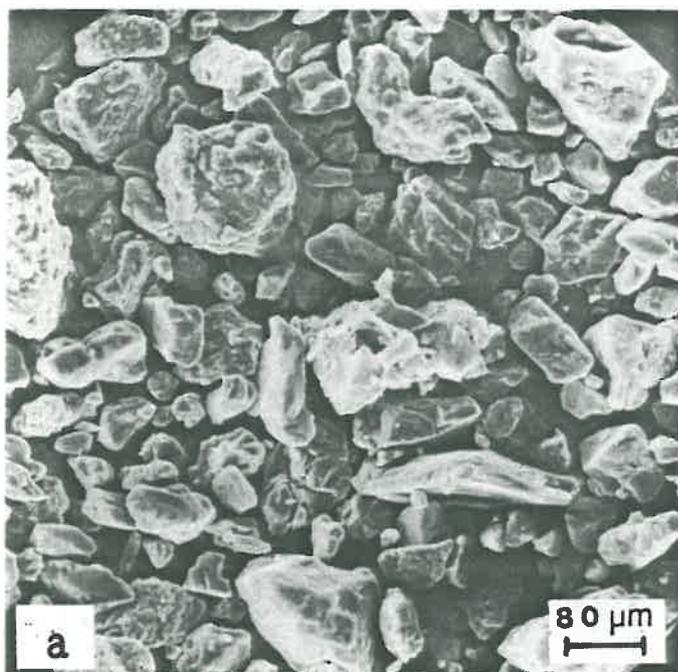
Observations au microscope électronique à balayage
de la fraction granulométrique 0-2 μm extraite
de la parcelle "Fumier"
a : x 200 ; b : x 600 ; c : x 4800 ; d : x 1000.

PLANCHE VII



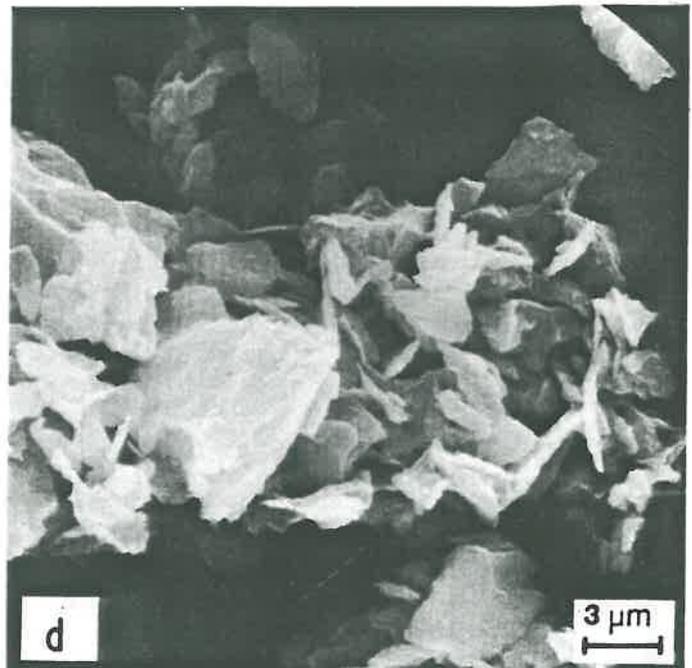
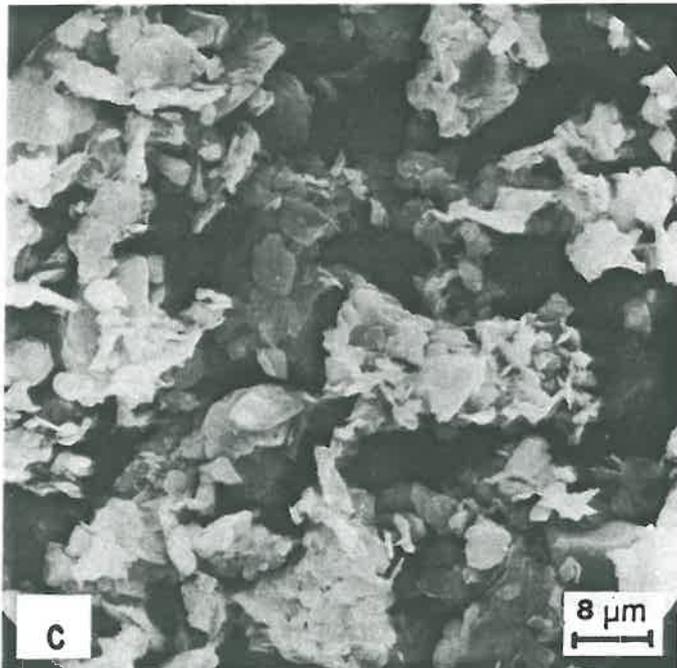
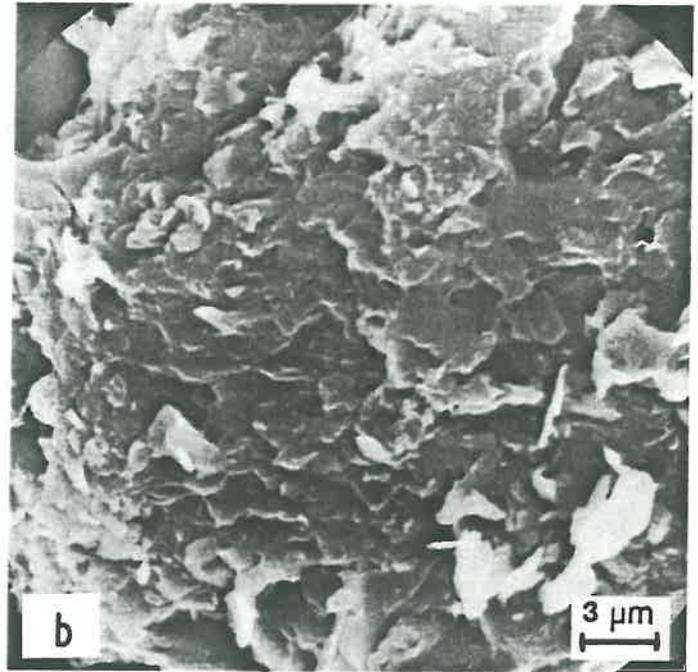
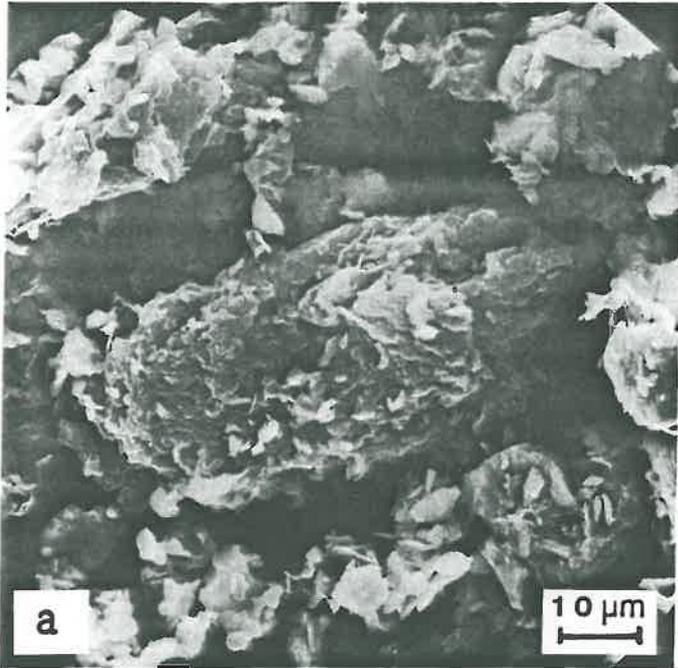
Observations au microscope électronique à balayage
de la fraction granulométrique 0-2 μm extraite
de la parcelle "Pelouse"
a : x 2000 ; b : x 6000.

PLANCHE VIII



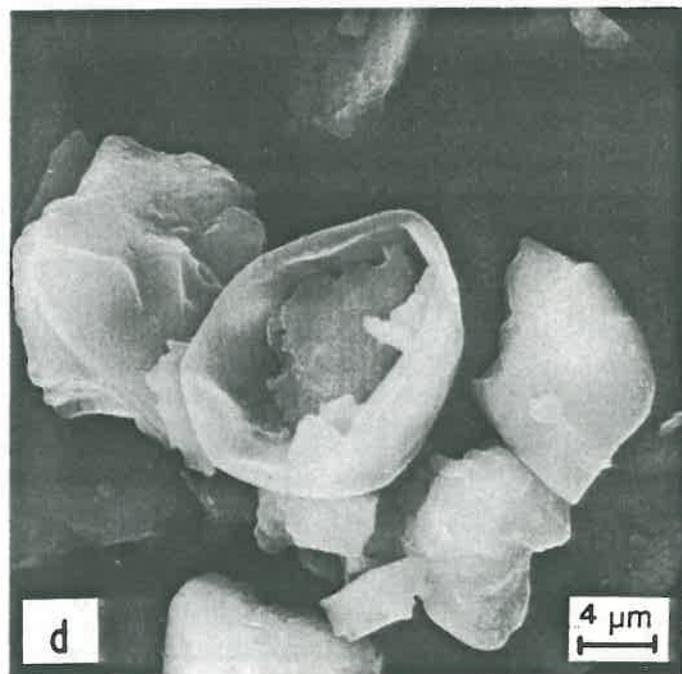
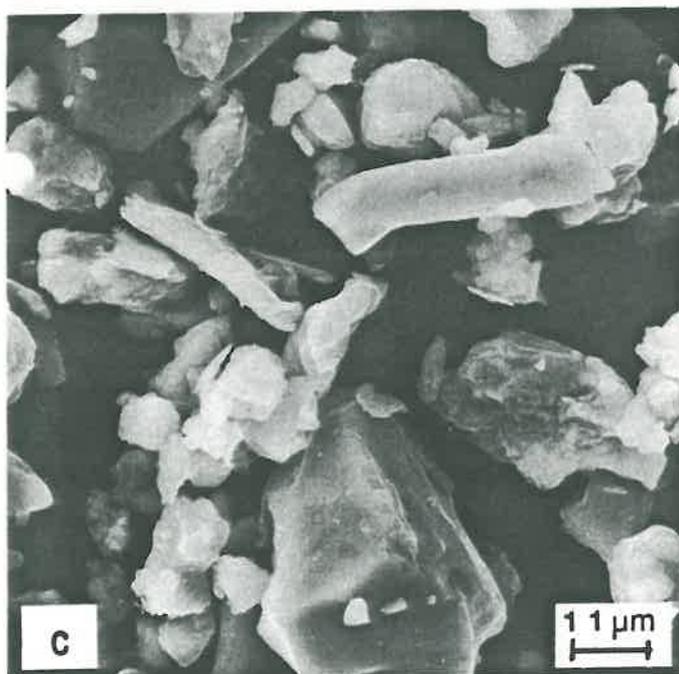
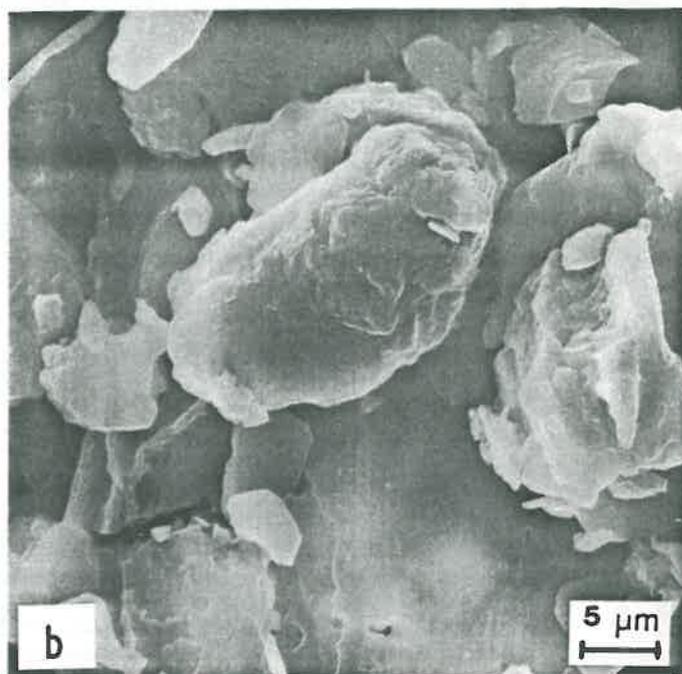
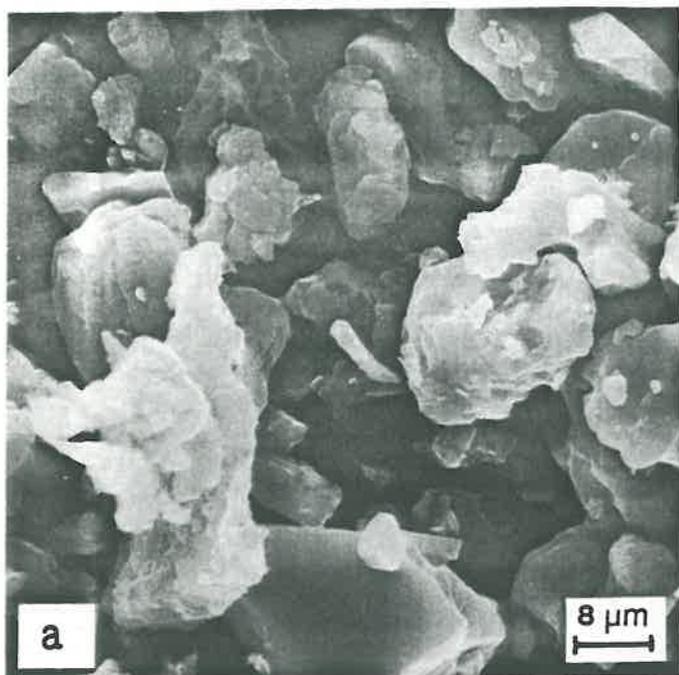
Observations au microscope électronique à balayage
de la fraction 0-2 μm extraite de la parcelle
"Témoïn"
a ; x 200 ; b : x 480.

PLANCHE IX



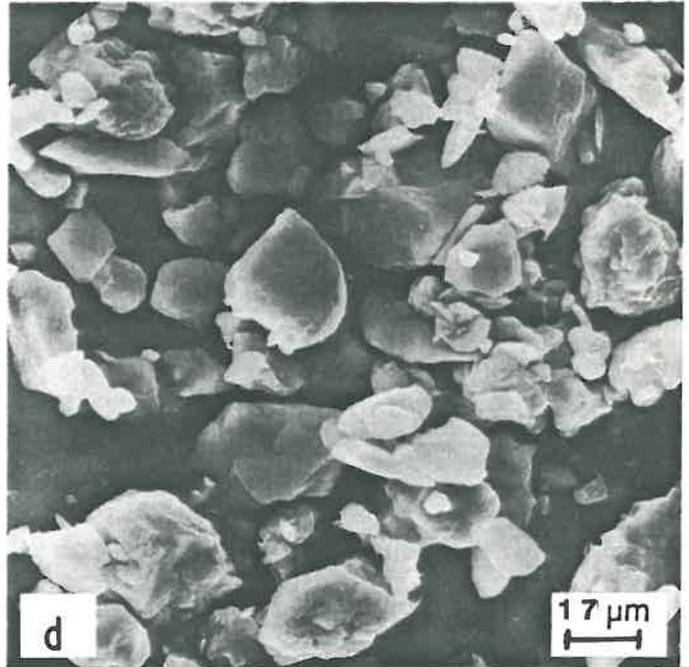
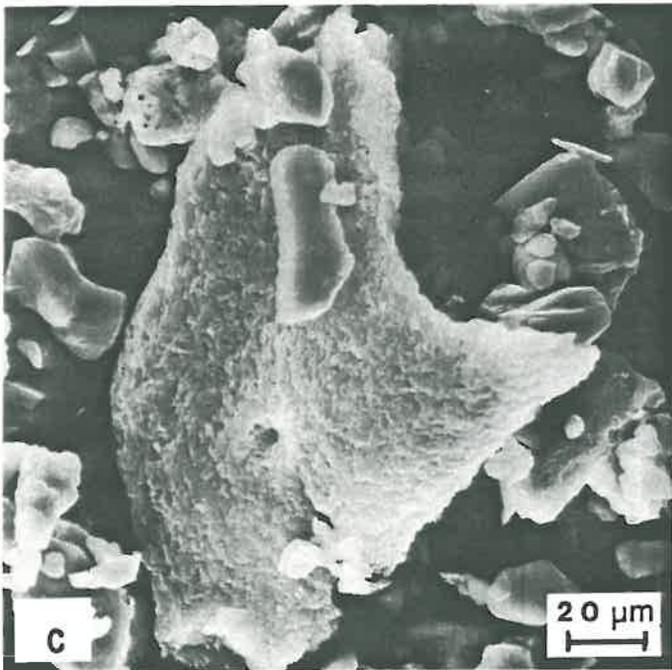
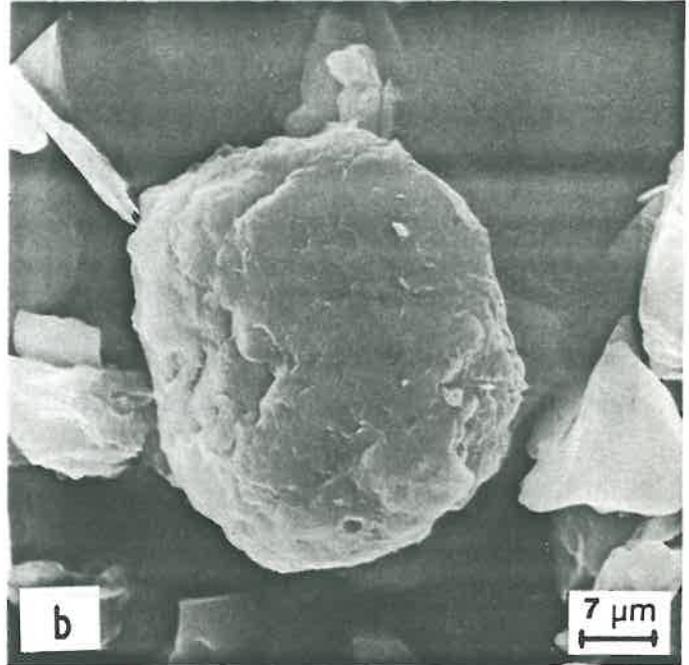
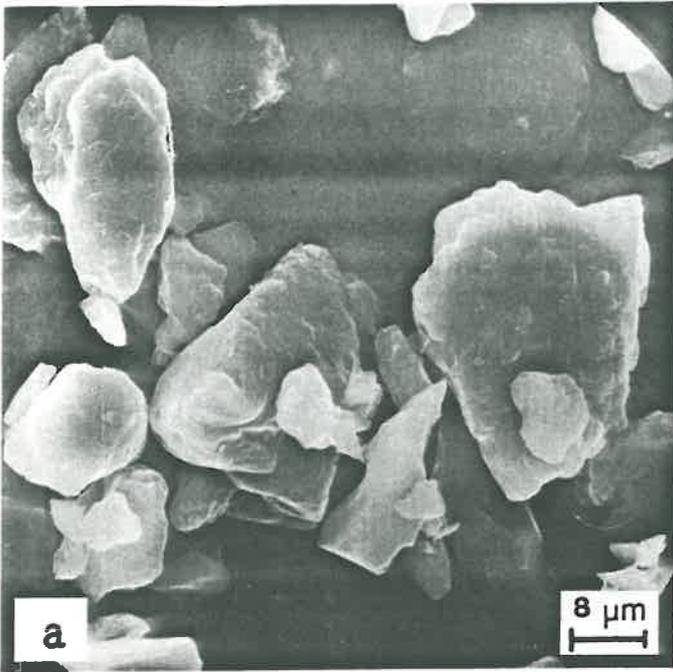
Observations au microscope électronique à balayage
de la fraction granulométrique 2-20 µm extraite
de la parcelle "Fumier"
a : x 1500 ; b : x 6000 ; c : x 2000 ; d : x 6000.

PLANCHE X



Observations au microscope électronique à balayage
de la fraction granulométrique 2-20 μm extraite
de la parcelle "Pelouse"
a : x 2000 ; b : x 3000 ; c : x 1500 ; d : x 4000.

PLANCHE XI



Observations au microscope électronique à balayage
de la fraction granulométrique 2-20 μm extraite
de la parcelle "Témoin"
a : x 2000 ; b : x 2400 ; c : x 860 ; d : x 1000.

*aggrégat d'aiguille. or de orio ? de densité faible et
donc de taille \gg 20 μ .*

car on observe pas de différences significatives quand on compare les parcelles "témoin", "pelouse" et "fumier".

Il ressort de cette étude que la microscopie électronique à balayage ne constitue pas une méthode très pertinente pour caractériser la matière organique contenue dans les différentes fractions granulométriques extraites.

Devant ces résultats négatifs, nous avons tenté d'étudier les complexes organo-minéraux par microscopie électronique à transmission. Là encore, les résultats obtenus ont été décevants.

4.7 - SPECTROSCOPIE INFRAROUGE

La spectroscopie infrarouge a été très largement utilisée par différents auteurs pour caractériser les substances organiques des sols. C'est dans cet esprit que nous avons utilisé cette technique en espérant mettre en évidence des différences entre les associations organo-minérales étudiées.

4.7.1. Attribution des bandes d'absorption

Les substances humiques sont des molécules très complexes et très riches en groupements fonctionnels. C'est pour cette raison que les spectres obtenus présentent des bandes d'absorption mal résolues. Dans ces conditions, il est difficile d'attribuer à une bande d'absorption un groupement fonctionnel précis.

Plusieurs auteurs ont établi un inventaire des principales bandes d'absorption caractérisant les substances

humiques : KHAN (1971), THENG et POSNER (1967).

C'est ainsi que l'on distingue couramment les bandes d'absorption dues aux vibrations de :

- valence des OH aux environs de 3400 cm^{-1} . Il est rappelé pour mémoire que la fréquence de vibration de ces radicaux est très fortement dépendante de l'intensité des liaisons d'hydrogène qu'elles peuvent contracter.
- Valence des CH_2 et CH_3 situées entre $2920 - 2850 \text{ cm}^{-1}$
- Valence des radicaux $\text{C}=\text{O}$ et COOH vers $1720 - 1710 \text{ cm}^{-1}$
- Valence des liaisons $\text{C}=\text{C}$ aromatique vers 1620 et 1530 cm^{-1}
- Déformation angulaire des radicaux CH_2 et CH_3 vers 1450 et 1375 cm^{-1}
- Déformation angulaire des groupements OH vers $1330 - 1350 \text{ cm}^{-1}$.

Nous ne nous intéresserons pas aux bandes de plus basses fréquences, car le réseau silicaté absorbe toute l'énergie.

4.7.2. Principe des mesures

Les spectres infrarouge ont été obtenus en laissant évaporer une suspension sur une fenêtre de fluorine. Dans cette partie du travail, nous ne nous sommes intéressés qu'aux spectres obtenus avec les fractions granulométriques $0 - 2 \mu\text{m}$.

Pour les fractions granulométrique $2 - 20 \mu\text{m}$, la qualité optique des dépôts entraîne des phénomènes de diffusion de la lumière très importants. Dans ces conditions les spectres

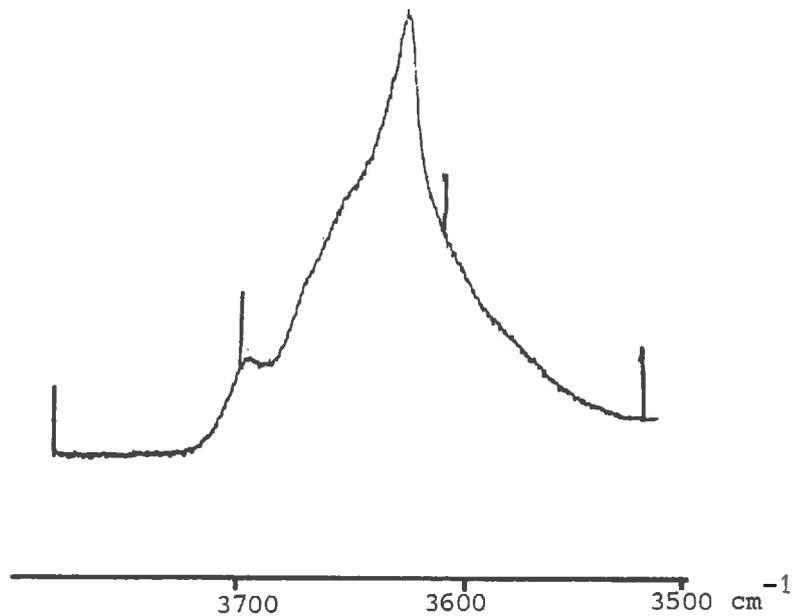


Figure IV.13. : Spectre de vibrations de valence des OH des argiles (Parcelle pelouse).

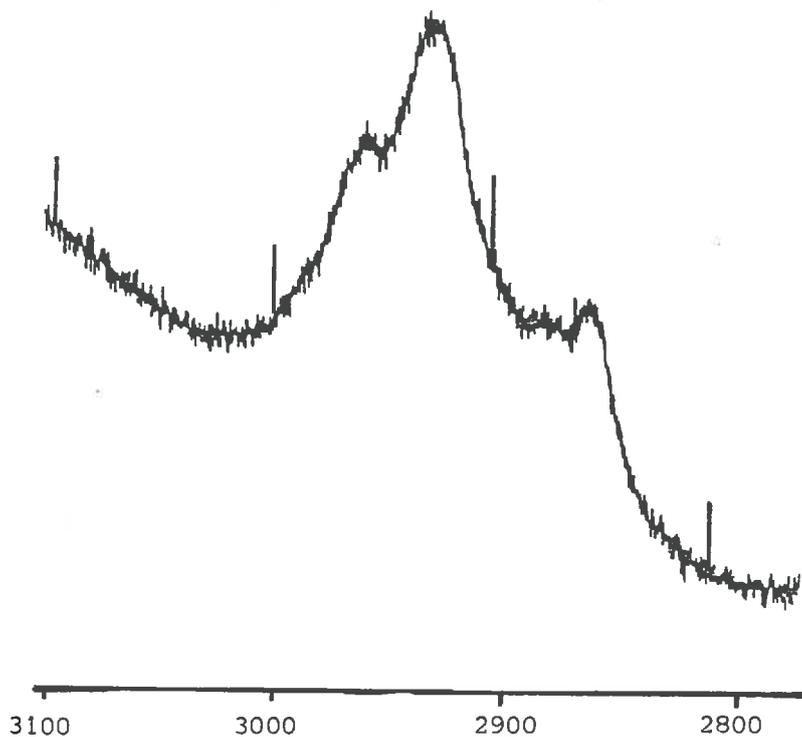


Figure IV.14. : Spectre de vibration de valence des radicaux CH_2 et CH_3 des composés organiques associés aux argiles (Parcelle pelouse).

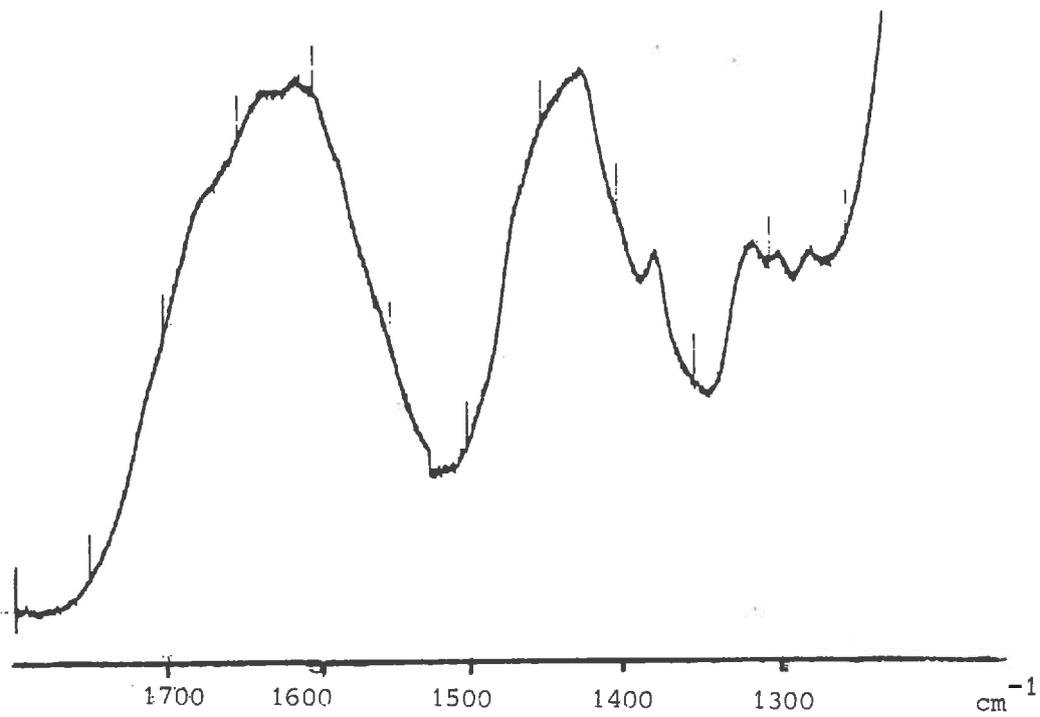


Figure IV. 15. : Spectre d'absorption des associations organo-minérales 0-2 μm extraites de la parcelle pelouse.

obtenus sont de mauvaise qualité et ne peuvent pas être facilement interprétés.

Pour pouvoir comparer valablement les différents spectres infrarouge obtenus, il est obligatoire de travailler sur des dépôts ayant exactement la même épaisseur. Cette dernière condition ne peut pas être obtenue expérimentalement.

Pour contourner cette difficulté on normalise les intensités des bandes d'absorption dues à la matière organique par rapport à une bande d'absorption due à la phase minérale. Dans notre cas la bande d'absorption qui nous a servi de référence est la bande de vibration des OH inclus dans la structure des argiles.

Dans les conditions expérimentales normales, cette bande n'est pas directement accessible car elle se situe dans une région où les groupements OH de l'eau adsorbée et de la matière organique absorbe de l'énergie. On se débarrasse de ces absorptions "gênantes" en deutérant l'échantillon et en travaillant sous vide dynamique. Ceci est possible car les OH de constitution des argiles ne se deutèrent pas à la température ambiante.

4.7.3. Résultats

Sur les figures IV.13, IV.14 et IV.15, on a reporté les spectres d'absorption obtenus avec la fraction granulométrique extraite du sol sous pelouse. Les spectres obtenus avec les autres fractions granulométriques (témoin - fumier) sont semblables et ne diffèrent que par leur intensité relative.

a) Région entre 3800 et 3500 cm⁻¹

Il s'agit des bandes d'absorption dues aux hydroxyles des argiles. Signalons que les bandes d'absorption situées vers

3620, 3640 et 3700 cm^{-1} sont à relier à des minéraux du type smectique, illitique et kaolinitique.

C'est à partir de l'intensité intégrée (surface totale) de ces bandes d'absorption que nous avons normalisé les bandes d'absorption dues à la matière organique. Ceci signifie que nous avons travaillé à teneur en matière minérale constante. Il en résulte que les quantités de matière organique prises spectroscopiquement en compte sont de 4,1 % pour le témoin, 5,5 % pour la pelouse et 9,8 % pour le fumier.

b) Région entre 3000 et 2700 cm^{-1}

Il s'agit des bandes d'absorption des radicaux CH_2 et CH_3 des substances organiques du complexe argilo-humique.

Sur la figure IV.16, on a reporté les intensités intégrées relatives (unité arbitraire) en fonction de la quantité de matière organique associée à 100 g de phase minérale. On observe que cette grandeur est indépendante de la teneur en matière organique. En se référant aux équations déjà écrites pour deux compartiments de la matière organique. On en déduit que la matière organique labile ne contient pas de groupement $\text{CH}_2 - \text{CH}_3$. En d'autres termes les groupements CH_2 et CH_3 sont associés à la matière organique stable.

c) Région 1800 - 1510 cm^{-1}

Il s'agit des bandes d'absorption dues au carbone aromatique des matières organiques. Dans cette région il y aurait également une absorption liée aux groupements carboxyliques non dissociés.

Sur la fig. IV.16, on a reporté les intensités intégrées relatives en fonction de la quantité de matière organique. Dans ce cas on observe que la matière organique labile associée aux argiles contient du carbone aromatique car la pente de la droite est différente de 0. Comme l'ordonnée à l'origine est positive, ceci signifie que la matière organique

Intensités intégrées relatives
(unité arbitraire)

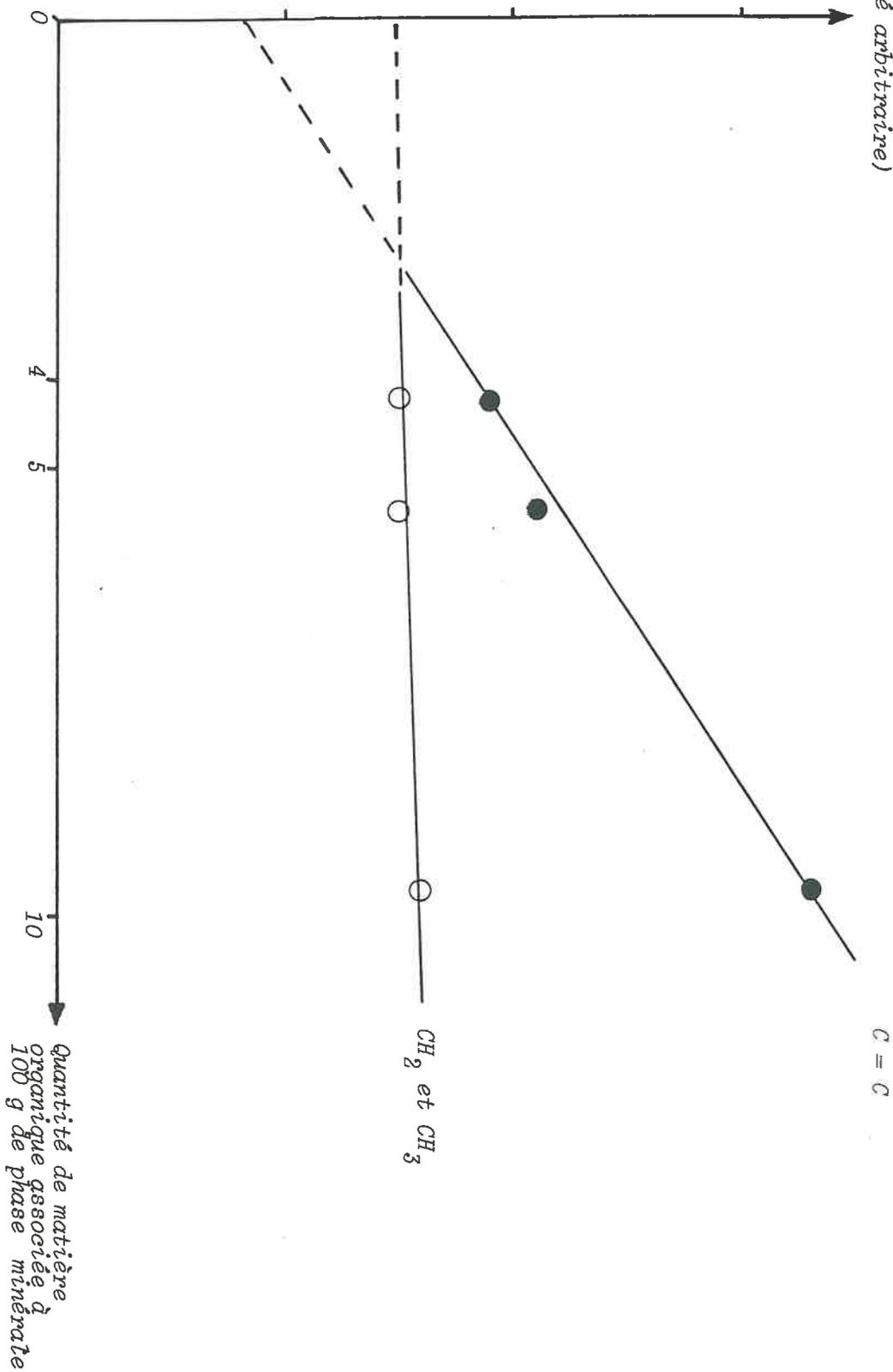


Figure IV - 16 : Variations de l'intensité intégrée relative en fonction de la teneur en matière organique (exprimée en g/100 g de minéral).

stable associée aux argiles contient davantage de carbone aromatique.

Comme nous ne connaissons pas les coefficients d'extinction, il est impossible d'évaluer la proportion du carbone aromatique contenue dans ces 2 types de matières organiques.

c) Région 1580 - 1310 cm⁻¹

Il s'agit des bandes d'absorption dues aux déformations angulaires des radicaux CH₂ et CH₃. Les intensités intégrées restent sensiblement constituées en fonction des teneurs en matière organique. Cette observation confirme à nouveau que la matière organique labile ne contient pas ou très peu les groupements méthyl ou méthoxyl. (CH₂ et CH₃).

Pour les absorptions observées au dessous de 1310 cm⁻¹, nous n'avons pas tenté de les exploiter car le réseau silicaté perturbe fortement les mesures.

4.7.4. Conclusions

La caractérisation des matières organiques par spectroscopie infrarouge n'a pu être réalisée que pour les fractions granulométriques 0 - 2 µm et pour les domaines spectraux correspondant aux vibrations de valence des radicaux CH₂ et CH₃ (3000 - 2700 cm⁻¹) et des carbones aromatiques (1800 - 1510 cm⁻¹) ainsi que des vibrations de déformation angulaire des radicaux CH₂ et CH₃ (1580 - 1310 cm⁻¹).

Pour la fraction granulométrique 0 - 2 µm la spectroscopie infrarouge indique que :

- Les radicaux CH₂ et CH₃ sont associés presque totalement à la matière organique stable.
- La matière organique labile est moins riche que la

Type de matières organiques	Matière organique labile		Matière organique stable
	Fraction 2-20 µm	Fraction 0 - 2 µm	
CARACTERISTIQUES - Quantité (g/100 g de sol) - Témoïn - Pelouse - Fumier - Extractibilité (AH + AF) - Stabilité de l'azote à hydrolyse acide Rapport C/N Capacité d'échange cationique (meq/100 g) Groupement CH ₂ - CH ₃ Carbone aromatique - Quantité (g/100 g de fraction) - Témoïn - Pelouse - Fumier	Fraction 2-20 µm variable 0,4 0,85 2,2 45 % 70 % 12 200 à déterminer non déterminé variable 1,9 4,3 11,1	Fraction 0 - 2 µm variable 0,15 0,4 1 80 % 80 % 7 400 4 + + variable 0,9 2,2 5,8	Fraction 0 - 2 µm constante 0,5 0,5 0,5 0 % 60 % 10 ~ 250 - 300 + + + + + + constante 3 3 3

TABLEAU IV.7 - Caractéristiques des différents types de matières organiques associés aux fractions granulométriques 0-2 µm et 2-20 µm

matière organique stable.

Par contre cette technique ne nous a pas permis d'analyser avec précision les contenus en fonction carboxyliques des 2 types de matière organique associée aux argiles.

4.8 - CONCLUSION GENERALE DU CHAPITRE IV

Dans le précédent chapitre nous avons été conduits à conclure qu'il y avait 2 compartiments associés à la fraction 0 - 2 μm et un compartiment associé à la fraction 2 - 20 μm . Par contre, il ne nous avait pas été possible de montrer si les compartiments labiles associés à la fraction 0 - 2 μm et 2 - 20 μm étaient identiques ou différents.

Dans le présent chapitre nous avons caractérisé par des méthodes physiques et chimiques la matière organique associée aux fractions granulométriques 0 - 2 μm et 2 - 20 μm .

Les principales conclusions obtenues peuvent se résumer de la façon suivante (cf. tableau IV.7) :

- Existence de deux compartiments ; l'un stable et l'autre labile localisés dans la fraction granulométrique 0 - 2 μm .
- Existence d'un seul compartiment labile localisé dans la fraction granulométrique 2 - 20 μm .

Les compartiments labiles associés aux fractions granulométriques 0 - 2 μm et 2 - 20 μm ont des caractéristiques chimiques différentes. (Extractibilité dans les solvants alcalins, rapport C/N, capacité d'échange cationique, stabilité de l'azote à l'hydrolyse acide).

La quantité de matière organique contenue dans le compartiment stable et associée aux argiles est de l'ordre de 3 g pour 100 g d'argile ; ce qui équivaut à presque 5 g de matière organique pour 1 kg de sol. Dans le sol témoin la matière organique stable représente environ 40 % de la matière organique totale du sol. Dans le cas de la parcelle fumier, cette matière organique stable représente 10 % du stock organique total.

La matière organique stable a des caractéristiques chimiques spécifiques : extractibilité dans les solvants alcalins nulle ; aromaticité plus élevée, présence de groupements CH_2 et CH_3 ).

Parmi toutes les méthodes utilisées pour caractériser la matière organique associée aux fractions granulométriques 0 - 2 μm et 2 - 20 μm , les méthodes thermiques (ATD, ATG) et les observations microscopiques (MEB) se sont montrées peu discriminantes.

CHAPITRE V

DISCUSSION GENERALE - CONSEQUENCES

5.1 - DISCUSSION GENERALE	p.	151
5.1.1. Synthèse des résultats		
5.1.2. Vérification du modèle proposé		
5.2 - CONSEQUENCES	p.	157
5.2.1. Conséquences théoriques		
5.2.2. Conséquences pratiques		
5.3 - CONCLUSION DU CHAPITRE V	p.	162

5.1 - DISCUSSION GENERALE

5.1.1. Synthèse des résultats

Un des objectifs de cette étude était l'estimation de la stabilité à la biodégradation des constituants organiques. Les quantités des matières organiques contenues dans les fractions granulométriques 0 - 2 μm et 2 - 20 μm ont été déterminées pour différents traitements :

- sol sous pelouse
- sol sans culture et sans apport de matière organique depuis 55 ans
- sol sans culture recevant 100 t/ha/an de fumier.

Les fractions ayant peu varié quantitativement sont considérées comme stables, les fractions ayant évolué sont considérées comme labiles. L'expérience ne permet pas de déterminer le temps de renouvellement de ces matières organiques notamment les labiles. On peut seulement dire qu'il est plus court que 50 ans.

Les résultats obtenus précédemment nous amènent à penser que la matière organique liée aux fractions les plus fines est constituée de 3 compartiments ayant des caractéristiques, des stabilités et des localisations différentes. (cf. tableau IV.7). Il s'agit de voir si les résultats obtenus sont conformes à ceux rencontrés dans la bibliographie.

a) Compartiment labile associé à la fraction granulométrique 2 - 20 μm

Les résultats obtenus indiquent que la matière organique contenue dans ce compartiment a des caractéristiques chimiques différentes de celles contenues dans la fraction granulométrique 0 - 2 μm . Il est donc vraisemblable que ces deux types de matières organiques auront des temps de demi-vie différents.

Comme la surface spécifique de particules ayant des tailles supérieures à 2 μm est faible, il est donc peu probable que les matières organiques soient adsorbées sur les particules minérales.

Dans un travail récent TURCHENEK et OADES (1979) ont montré par flottaison que la matière organique contenue dans cette fraction granulométrique était essentiellement constituée de corps microbiens, de résidus ligneux, de filaments mycéliens ..., stabilisés par les produits minéraux amorphes (Al, Fe ...). Des résultats semblables ont été obtenus par GUKERT (1970) et NUSSBAUMER et al. (1970) qui ont montré que les produits inextractibles contenus dans la fraction 2 - 20 μm sont constitués de résidus ligneux et de corps microbiens.

b) Compartiment labile associé à la fraction argileuse

D'une façon générale, les caractéristiques trouvées (poids moléculaires, C.E.C, extractibilité, teneur en azote ...) vont toujours de paire avec grande labilité. Par ailleurs FLAIG (1963), BRUCKERT (1980) et SCHNITZER (1963) ont montré que les produits extractibles étaient peu aromatiques ; ce qui leur confère une grande biodégradabilité. Enfin il a été montré que les composés extractibles étaient des produits jeunes (SCHARPENSEEL, 1977).

c) Compartiment stable associé à la fraction argileuse

Les matières organiques contenues dans ce compartiment se distinguent nettement des autres par leur non extractibilité et leur relative richesse en carbone aromatique (spectroscopie infrarouge). Il faut également souligner que l'azote contenu dans cette matière organique est peu hydrolysable.

Ces résultats sont bien conformes à ceux trouvés dans la bibliographie. On peut citer par exemple les travaux d'ANDREUX (1981) ; JOCTEUR MONROSIER (1977) ; CARBALLAS et al. (1972) ; PAUL et VAN VEEN (1978) ; GOH (1980).

Une des principales critiques que l'on puisse faire est de localiser le compartiment stable dans la fraction argileuse. En effet les travaux utilisant les éléments marqués montrent que la matière organique associée aux argiles est relativement labile. Par exemple ANDERSON et PAUL (1984) ont montré par des mesures de datation que les produits organiques liés aux argiles sont plus jeunes que ceux localisés dans les limons 2 - 20 μm . Par ailleurs BALESDENT (1982) a montré que les matières organiques non hydrolysables associées aux argiles avaient un temps de résidence très élevé. Enfin TURCHENECK et OADES (1979) montrent en comparant différents traitements l'existence de 2 compartiments, l'un stable, l'autre labile dans la fraction argileuse. Dans ces études les auteurs ont utilisé la datation.

Tous ces résultats ne sont pas contradictoires si l'on admet que la matière organique labile a un temps de turn-over très court. Cette hypothèse n'est pas déraisonnable, car de nombreux auteurs ont signalé que les matières organiques liées aux argiles s'enrichissaient sélectivement après l'apport de traceur.

Pour confirmer cette hypothèse, nous avons mesuré l'activité ^{14}C des matières organiques des fractions 0 - 50 μm

extraites de la parcelle témoin et du sol sous pelouse. Ces déterminations n'ont pas été réalisées sur la parcelle fumier car nous ne connaissons pas les caractéristiques isotopiques de l'amendement organique apporté.

Les résultats indiquent qu'il y a un écart d'activité important des matières organiques sous pelouse et dans la parcelle témoin. Ceci confirmerait bien l'existence d'un pool organique jeune dans le sol sous pelouse. Cependant l'éventualité d'artéfacts dans ces mesures dus à des pollutions par des produits organiques marqués au ^{14}C ne nous permet pas d'interpréter les résultats obtenus.

5.1.2. Vérification du modèle proposé

Compte tenu de nos résultats et de ceux publiés par ailleurs, nous considérons que les trois compartiments organiques mis en évidence sont de nature chimique différente et ont une localisation bien précise. En d'autres termes il y a une relation étroite entre nature chimique et localisation de la matière organique dans le milieu poreux.

Pour les sols de Versailles le modèle proposé est le suivant :

- Compartiment stable associé aux argiles
- Compartiment très labile associé aux argiles
- Compartiment moyennement labile associé à la fraction granulométrique 2 - 20 μm .

Pour valider ce modèle et en particulier pour confirmer l'existence d'un compartiment labile à temps de demi-vie court associé à la fraction 0 - 2 μm et 2 - 20 μm extraites des parcelles fumier et témoin, nous avons déterminé la cinétique de variation de la teneur en carbone des fractions granulométriques 0 - 2 μm et 2 - 20 μm extraites des parcelles fumier et témoin.

Pour cette étude nous avons choisi des échantillons prélevés en 1930 - 1933 - 1936 - 1939 - 1946 - 1961 et 1971. Les déterminations n'ont pas été réalisées sur le sol initial (1928).

Chaque échantillon d'environ 10 g a été sonifié pendant 10 minutes et dans un volume d'eau de 40 ml. Les fractions 0 - 2 μm et 2 - 20 μm ont été récupérées par sédimentation. Le dosage du carbone a été effectué par combustion sous oxygène de la matière organique à 1100°C.

La variation de la teneur en carbone des fractions granulométriques 0 - 2 μm est représentée sur la figure V.1.

On constate d'abord que les valeurs obtenues pour l'année 1983 et qui ont servi à l'élaboration du modèle se situent bien sur les cinétiques d'évolution des teneurs en matière organique.

Après une augmentation rapide de la teneur en matière organique de la fraction extraite de la parcelle fumier, on note une diminution constante et progressive de cette grandeur. Parallèlement on observe des phénomènes similaires mais inversés sur la parcelle témoin.

Cette diminution anormale de la teneur en matière organique de la parcelle fumier peut s'interpréter comme étant le résultat d'une dilution de l'horizon supérieur par le sous-sol. Ceci se conçoit aisément car les différents prélèvements et l'érosion représentent un départ de 300 kg de terre.

Dans ces conditions il vaut mieux comparer la variation de la teneur en matière organique des fractions 0 - 2 μm et 2 - 20 μm extraites de la parcelle fumier par rapport à la parcelle témoin (cf. figure V.2).

On observe que la teneur en matière organique des

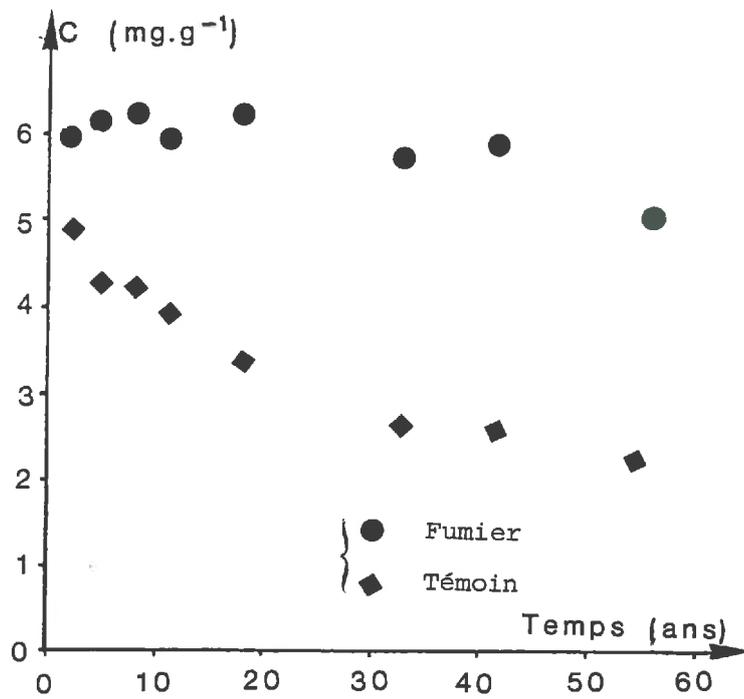


Figure V.1. : Variation de la teneur en carbone des fractions 0-2 μm en fonction du temps (en mg par g de fraction).

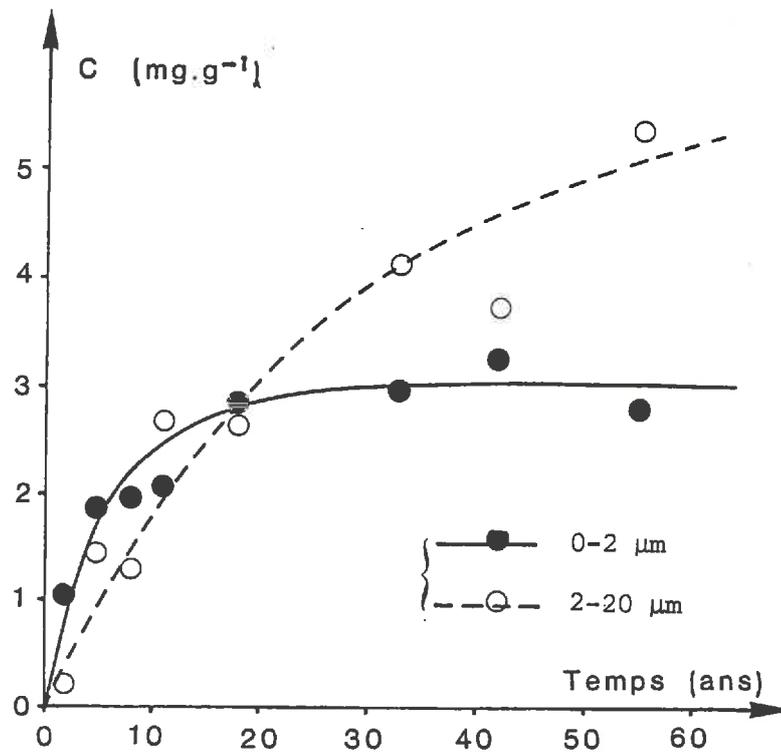


Figure V. 2. : Evolution en fonction du temps de la différence des teneurs en carbone du traitement "fumier" et du traitement "témoin". Pour les fractions 0-2 μm et 2-20 μm (en mg par g de fraction).

fractions fines se stabilise rapidement alors qu'elle croît dans la fraction 2 - 20 μm . Un ajustement numérique des valeurs observées conduit à des temps de demi-vie de 4 ans et de 30 ans pour les fractions labiles respectivement associées aux argiles et aux limons.

5.2 - CONSEQUENCES

5.2.1. Conséquences théoriques

Dans ce paragraphe, nous envisagerons successivement les conséquences de notre travail sur les processus d'humification, sur la modélisation de la minéralisation de la matière organique des sols, et sur une méthode d'estimation des différents pools de matière organique.

a) Conséquences sur les processus d'humification

Les résultats obtenus précédemment indiquent la présence de 2 compartiments ayant des structures et des stabilités différentes au niveau des argiles.

Les modèles proposés par HETIER (1975) et par CHASSIN (1979) sur la structure du complexe argilo-humique se trouvent donc confirmés. Dans ces modèles les auteurs ont supposé :

- que les substances humiques aromatiques se formaient à partir de composés organiques ayant un caractère aliphatique marqué.
- que la grande stabilité des composés localisés au voisinage des surfaces est due à l'aromaticité, à la protection physique par les molécules ayant un caractère

aliphatique et à une teneur en cendre élevée. Inversement la grande labilité des molécules les plus éloignées de la surface est due à leur caractère aliphatique prononcé et à l'absence de protection physique.

Ceci revient à dire que le compartiment stable se forme à partir du compartiment labile, lequel dériverait directement de l'activité de la biomasse.

Dans ces modèles il est admis que la quantité de matière organique stabilisée est reliée à l'aire des surfaces adsorbantes. Ceci signifie que la quantité de matière organique stable sera dépendante de la nature minéralogique des fractions les plus fines (argiles + oxyhydroxydes de Fe et d'Al) et de la granulométrie des sols.

b) Modélisation de la minéralisation de la matière organique des sols

D'après tout ce qui précède, nous sommes amenés à proposer un modèle d'évolution de la matière organique schématisé sur la figure V.3.

On peut remarquer que le modèle proposé est dans sa conception assez proche de celui de VAN-VEEN et PAUL (1977). Comme l'ont suggéré ces auteurs, la stabilisation de la matière organique dans les fractions granulométriques 2 - 20 μm est essentiellement due à une protection physique induite par l'agrégation. En d'autres termes le temps de demi-vie de ce compartiment organique sera lié à la dynamique de l'agrégation. Ainsi tout ce qui va favoriser la formation d'agrégats stables entraînera une stabilisation de ce type de matière organique. C'est ainsi que l'on peut expliquer "l'effet prairie" ou l'effet du calcium sur l'augmentation des teneurs en matière organique des sols.

c) Méthode d'estimation des différents pools de matière organique

Un des facteurs limitants dans l'élaboration des modèles d'évolution de la matière organique est la méconnaissance des quantités de carbone effectivement contenues dans les différents compartiments introduits. A partir de ce travail et des résultats publiés par d'autres auteurs, il devient possible de proposer une méthode permettant de déterminer quantitativement les différents compartiments. Elle comporte les étapes suivantes :

- 1 - dispersion du sol par sonification
- 2 - tamisage à 50 μm
- 3 - obtention par sédimentation des fractions granulométriques 0 - 2 μm , 2 - 50 μm
- 4 - dosage du carbone total dans les fractions granulométriques obtenues
- 5 - par dosage du carbone extractible dans la fraction granulométrique 0 - 2 μm .

Soit A, B et C les quantités de carbone organique total trouvées dans les fractions granulométriques 0 - 2 μm , 2 - 50 μm et > 50 μm .

A partir de ces données, les différents compartiments peuvent être estimés :

- **Résidus de récolte** : il est admis que les résidus de récolte ont des tailles supérieures à 50 μm . Il en résulte que la quantité de carbone contenue dans ce compartiment est identique à C.
- **Matière organique moyennement stable** : la quantité de carbone contenue dans ce compartiment sera très sensiblement égale à B. Dans notre travail nous n'avons tenu compte que de la fraction 2 - 20 μm car la quantité de carbone contenu dans la fraction 20 - 50 μm reste négligeable. De ce fait, l'estimation de la quantité de matière organique moyennement stable à partir de la

fraction granulométrique 2 - 20 μm au lieu de la fraction 2 - 50 μm ne peut entraîner que de faibles erreurs. Cependant la méthode proposée pour estimer ce compartiment a l'avantage de simplifier le fractionnement du sol.

- **Biomasse** : cet aspect n'a pas été traité dans ce travail mais les techniques proposées par JENKINSON (1981) et reprises récemment par NICOLARDOT (1984) permettent d'estimer l'importance de ce compartiment. Il est cependant bon, de faire remarquer que la quantité de carbone contenue dans ce compartiment reste faible (de l'ordre de 500 à 1000 kg C/ha) et varie peu.
- **Matière organique labile** : soit p la proportion de carbone extractible dans la fraction granulométrique 0 - 2 μm . La quantité de carbone contenue dans ce compartiment est égale à $1,25 p \times A$. En effet nous avons vu que le taux d'extractibilité de cette matière organique est de 0,8.
- **Matière organique stable** : elle est égale à la quantité de carbone total trouvée dans les argiles moins la quantité de carbone organique contenue dans le pool labile ; soit :

$$(1 - 1,25 p)A.$$

5.2.2. Conséquences pratiques

Dans cette partie nous allons analyser à l'aide de quelques exemples comment on peut relier structure, localisation et fonction de la matière organique dans les sols.

a) Immobilisation et minéralisation de l'azote

Dans la méthode des bilans proposée par REMY pour estimer la fertilisation azotée, il est nécessaire de prendre en compte la quantité d'azote provenant de la minéralisation de la matière organique. Comme ce phénomène met en jeu des périodes de

temps relativement courtes, les produits organiques concernés sont essentiellement inclus dans le compartiment labile associé aux argiles.

b) Dynamique des métaux lourds

D'une façon générale les métaux lourds sont principalement retenus dans les sols par des phénomènes de complexation avec les composés organiques. Comme par ailleurs, les constantes de complexation diminuent quand le taux de polymérisation augmente (ZUNINO et MARTIN, 1977), la fixation des métaux lourds sera surtout le fait de la matière organique labile associée aux argiles. Si pour des raisons quelconque on diminue les quantités de carbone apportées annuellement aux sols (utilisation des résidus de récolte à des fins énergétiques), la minéralisation de la matière organique pourra entraîner une libération des métaux lourds complexés.

c) Simulation de l'évolution de la teneur en matière organique en fonction des systèmes culturaux

Dans le cas où l'on veut prévoir l'évolution de la teneur en matière organique des sols ; plusieurs cas sont à considérer :

- Les quantités de carbone introduites varient mais les conditions culturales restent identiques (exportation et enfouissement de paille). Pour des prévisions à moyen terme il faudra prendre en compte les compartiments labiles associés aux fractions granulométriques 0 - 2 μm et 2 - 50 μm . Par contre on négligera la matière organique stable qui représente dans les sols de Versailles environ 18 tonnes/ha pour les 20 premiers centimètres.
- Les quantités de carbone introduites restent constantes et les techniques culturales changent. Dans ce cas le compartiment le plus affecté sera celui localisé dans les fractions granulométriques 2 - 20 μm par suite de la modification du temps de demi-vie.

- Les quantités de carbone introduites et les conditions culturales varient simultanément : dans ce cas la prévision de l'évolution de la teneur en matière organique est relativement difficile, car il faut tenir compte à la fois de variations de flux et de temps de demi-vie.

d) Stabilisation de la structure

En Australie, l'emblavement d'anciennes prairies s'est traduit par une dégradation rapide de la stabilité de la structure (OADES, 1974) alors que la quantité de matière organique présente a peu varié. Dans ce cas on peut admettre que la vidange de la matière organique labile associée aux argiles a provoqué une diminution de la cohésion entre les particules les plus fines, ce qui a entraîné un effondrement de la structure. Cette interprétation est conforme avec les observations faites par MONNIER (1965) qui accorde un rôle important aux substances préhumiques dans la stabilisation de la structure.

5.3 - CONCLUSION

L'analyse des résultats obtenus nous a conduits à proposer un modèle à 3 compartiments ayant des temps de demi-vie différents à savoir :

- Un compartiment labile associé aux argiles ayant un temps de demi-vie de 4 ans. Il s'agit essentiellement de composés de faibles poids moléculaires, et qui dérivent de l'activité de la biomasse.
- Un compartiment moyennement labile associé aux fractions granulométriques 2 - 20 μm ayant un temps de demi-vie de l'ordre de 30 ans. Il est essentiellement constitué de résidus ligneux, de filaments mycéliens et de corps

microbiens. La stabilisation de ces composés organiques est à relier à l'agrégation.

- Un compartiment stable lié aux argiles, composé de produits organiques aromatiques et physiquement protégé par les composés les plus labiles.

Il y a donc une relation entre structure des composés organiques et localisation dans le milieu poreux. Ceci nous a permis de proposer une méthode qui permet de déterminer quantitativement les différents compartiments définis. Elle est basée sur le fractionnement granulométrique, le dosage du carbone organique et l'extractibilité du carbone associé à la fraction 0 - 2 μm .

Enfin, on peut sur quelques exemples tels que la dynamique de l'azote, la stabilité de la structure, relier la structure, la localisation et la fonction de la matière organique.

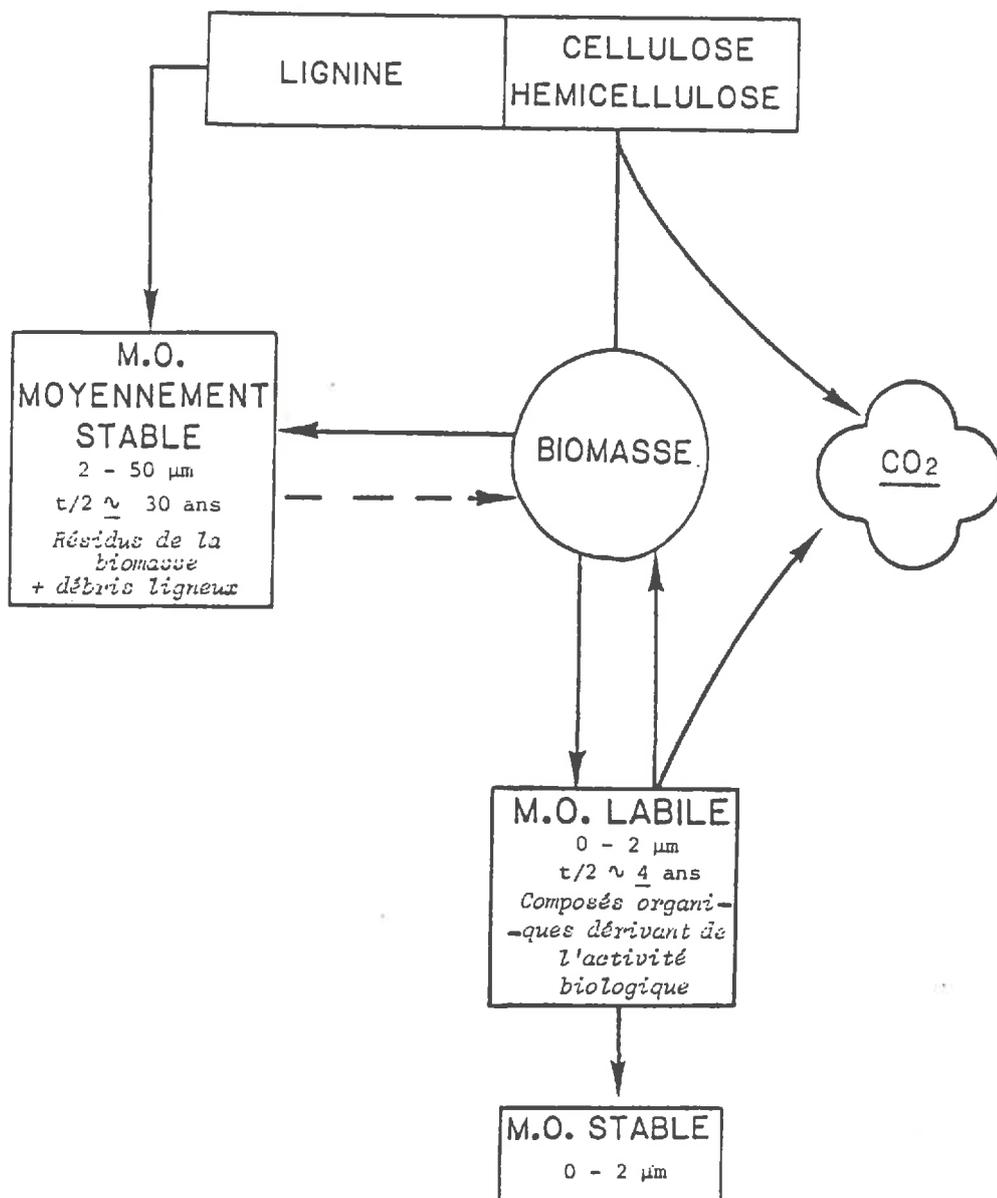


figure v₃

CONCLUSIONS GENERALES

Dans ce travail, on se proposait de vérifier s'il existe des relations directes entre localisation, structure, turn over et fonctions de la matière organique des sols. Il s'agit avant tout d'une contribution théorique qui doit permettre de mieux analyser et expliquer les mécanismes d'action de la matière organique sur les propriétés physiques, physico-chimiques et biologiques des sols .

Comme la matière organique humifiée est principalement localisée dans les fractions les plus fines, l'étude des complexes organo-minéraux nécessite une dispersion et un fractionnement du sol n'entraînant pas - ou peu - de modifications chimiques des ciments organiques.

La réalisation pratique de cette approche exige deux étapes :

- fragmentation du sol à l'état particulaire par les ultra-sons.
- séparation des particules en fonction de leur taille par sédimentation et tamisage.

Le protocole expérimental alliant ultrasonification pour la dispersion du sol et tamisage-sédimentation pour le fractionnement granulométrique est résumé dans la figure A.

On peut admettre que la dispersion est bonne car l'état final obtenu est proche de l'état particulaire.

non! 30% de l'après a disparu.

Les résultats obtenus sur la distribution de la matière organique dans les fractions 0 - 2 μm et 2 - 20 μm nous ont conduit à suggérer que l'on pouvait introduire l'existence de différents compartiments localisés de la façon suivante :

- la fraction argileuse 0 - 2 μm contient deux compartiments, l'un stable, l'autre labile.
- la fraction limoneuse 2 - 20 μm contient un seul compartiment

L'analyse qualitative de ces différents types de matière organique (extractibilité dans les produits alcalins, hydrolyses acides, spectrométrie infra rouge, C.E.C.) nous a permis de caractériser ces associations et de tirer les conclusions suivantes :

- la matière organique stable associée à la fraction 0 - 2 μm se caractérise par :

- * une teneur en matière organique stable et constante pour les trois traitements. Elle est de l'ordre de 3 g pour 100 g d'association. Elle représente, pour le sol de VERSAILLES, environ 18 tonnes de matière organique par hectare pour les horizons supérieurs (0 - 20 cm).
- * une quantité d'azote immobilisée, pour les mêmes horizons, de l'ordre de 1 000 kg.
- * un C/N voisin de 10.
- * une extractibilité nulle dans les produits alcalins.
- * un taux d'hydrolyse de l'azote voisin de 60 %.
- * une capacité d'échange cationique de l'ordre de 250 - 350 meq/100 g. Pour cette propriété nous avons montré que la valeur obtenue dépendait

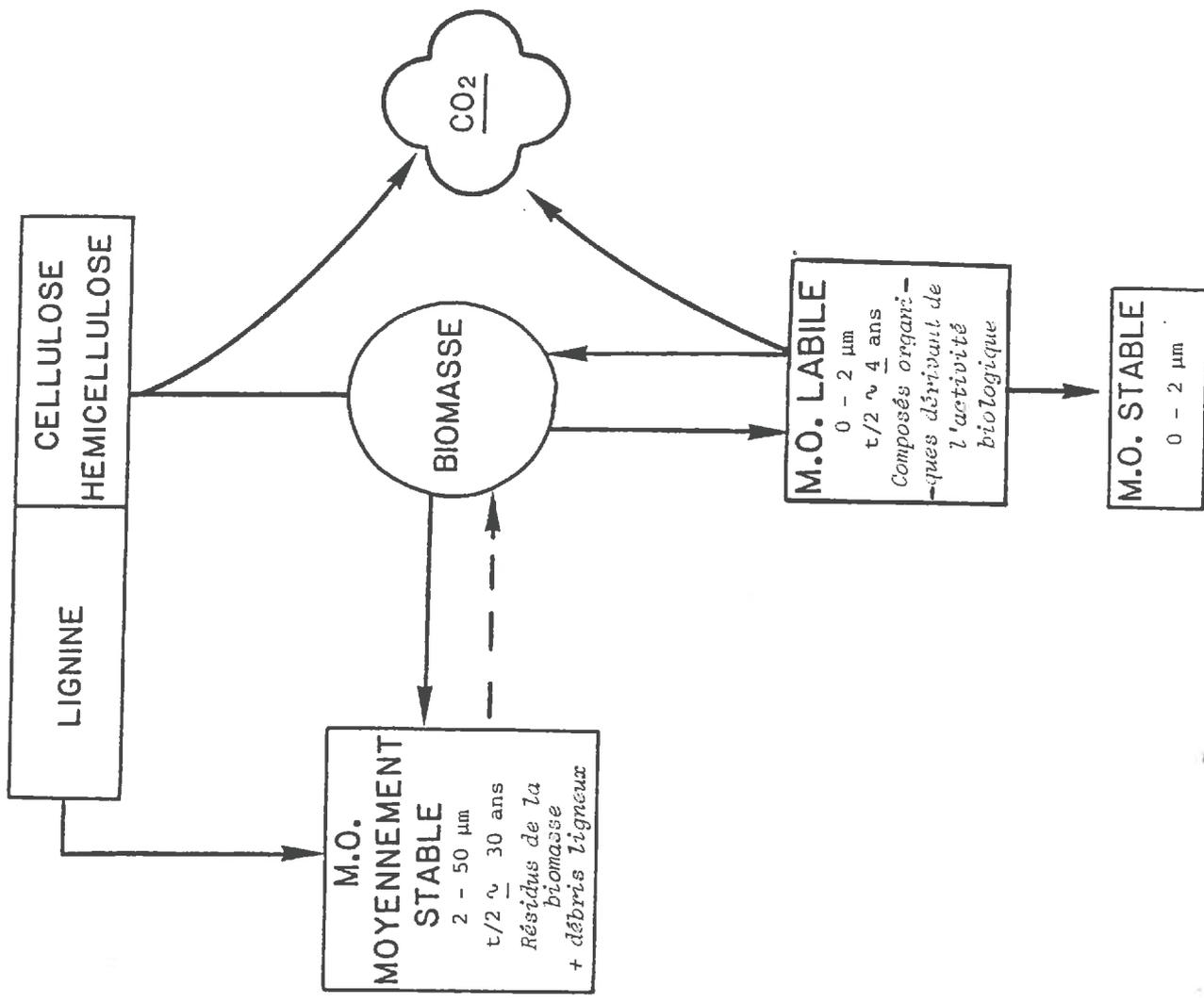


figure b

fortement de la C.E.C. déterminée pour la fraction minérale.

- * la présence de groupements CH_2 et CH_3 .
- * une richesse en carbone aromatique plus élevée que dans le cas de la matière organique labile associée à cette fraction.

- la matière organique labile associée à la fraction 0 - 2 μm présente :

- * une teneur en matière organique variable, fonction des apports organiques.
- * un C/N voisin de 7.
- * une extractibilité importante de l'ordre de 80 % dans les produits alcalins.
- * un taux d'hydrolyse de l'azote voisin de 80 %.
- * une capacité d'échange cationique d'environ 400 meq/100 g.
- * une absence de groupements CH_2 et CH_3 .
- * une très faible aromaticité.

- la matière organique associée à la fraction 2 - 20 μm a les caractéristiques suivantes :

- * une taille variable dépendant des quantités de matière organique enfouies.
- * un taux d'extractibilité de 45 %.
- * un C/N de 12.
- * un taux d'hydrolyse de l'azote de 70 %.
- * une capacité d'échange cationique de 200 meq/100 g.

L'analyse des résultats nous a amenés à proposer un modèle à trois compartiments organiques ayant des localisations et des temps de demi-vie différents (cf. fig. B) :

- 1 - Un compartiment labile associé aux argiles.
- 2 - Un compartiment moyennement labile associé aux fractions granulométriques 2 - 20 μm .
- 3 - Un compartiment stable lié aux argiles.

Nous remarquons que le modèle proposé est dans sa conception assez proche de celui de VAN VEEN et PAUL (1977). Les modèles suggérés par HETIER (1975) et par CHASSIN (1979) sur la structure du complexe argilo-humique se trouvent confirmés.

Les relations évoquées précédemment entre structure des substances humiques, localisation dans le massif poreux, et mécanismes d'action sur les propriétés des sols se trouvent aussi confirmées.

Une conséquence pratique importante de ce travail est la détermination quantitative des différents compartiments mis en évidence précédemment. Elle est basée sur le fractionnement granulométrique, le dosage du carbone organique total dans les fractions 0 - 2 μm et 2 - 50 μm et la détermination du carbone extractible associé à la fraction 0 - 2 μm .

BIBLIOGRAPHIE

- AKROUME C. (1982) - Evolution des formes de l'azote au cours de l'humification des matières organiques de 2 profils de sols acides du Morvan. Application de la méthode de BREMNER aux compartiments granulométriques et aux extraits humiques de ces fractions. DEA de pédologie. Univ. Paris. 50 p.
- ALLISON F.E. (1973) - Organic matter and its role in crop production. Elsevier. Amsterdam. 637p.
- ANDERSON DW. et PAUL E.A. (1984) - Organo-mineral complexes and their study by radio carbon dating. Soil Sci. Soc. Am. J. n° 48 ; pp 218-301
- ANDREUX F. (1978) - Etude des étapes initiales de la stabilisation physico-chimique et biologique d'acides humiques modèles. Thèse. Doctorat Etat, Univ. Nancy I, 174 p.
- ANDREUX F. et JOCTEUR-MONROZIER L. (1981) - Les apports des méthodes de séparation des substances humiques à la connaissance de la réserve organique azotée des sols. In : Coll. humus-azote Juillet 1981 Reims (France), pp 69-74
- ANDREUX F. (1979) - Genèse et propriétés des molécules humiques. In : Pédologie II constituants et propriétés des sols. M. BONNEAU et B. SOUCHIER ed., MASSON, Paris publ. pp 97-122
- ANDREUX F., DUPUIS T., GUILLET B. et JAMBU P. (1984) - Constituants organiques et interactions organo-minérales dans les sols. Bull. de l'A.F.E.S. pp 241-251
- BALESDENT J. (1982) - Etude de la dynamique de l'humification des sols de prairie d'altitude (Haut Jura) au moyen des datations ^{14}C des matières organiques. Thèse de Doct. Ing., Univ. Nancy 2, 90 p.
- BARBIER et CHABANNES (1961) - Interaction de la fumure organique et de l'azote minéral. Mécanisme possible de cette action C.R. Acad. Agric. 51, n° 17 pp 1118-1138
- BARKOFF E. (1960) - Utilisation des ultra-sons pour accélérer les réactions et disperser les sols dans les analyses de sols. Cité par BONFILS et DUPUIS (1969)
- BAVER L.D. (1930) - The effect of organic matter upon several physical properties of soils. Amer. Soc. Agron. J. 22; pp 703-708
- BLACK et CORNING (1953) - Organic phosphorus in soils. In soil and fertilizer phosphorus in crop nutrition, edited by PIERRE and NORMAN. Aca. Press inc. New-York
- BOIFFIN J. (1982) - Matière organique et fertilité des sols. A.D.E.P.R.I.N.A. INA Paris-Grignon, 52 p.

BONFILS P. et DUPUIS M. (1969) - Etude de la dispersion des colloïdes du sol à l'aide de vibrations ultra-sonores. Bulletin de l'A.F.E.S. n° 1 pp 13-22

BOURGETS J. (1968) - Ultrasonic vibration for particles-size analyses. Canad J. soil Sci. Vol. n° 48 pp 372-373

BREMNER J.M. (1965b)- In BLACK C.A., EVANS D.D, WHITE J.L. and ENSMINGER L.E. "methodes of soil analyses". Part 2. Amer. Soc. of Agron. WISCONSIN MADISON. U.S.A.

BREMNER J.M. et HAUCK D. (1974) - Perspectives in soil fertilizer nitrogen research. 10 th int cong soil sci. Moscow, Vol. 9, pp 13-29

BRINK R.H., DUBACH P. et LYNCH D.L. (1960) - Measurement of carbohydrates in soil hydrolysates with anthrone. Soil Sci., 89, pp 157-160

BRUCKERT S. (1970) - Influence des composés organiques solubles sur la pédogénèse en milieu acide. Ann. Agron. 21 (4) pp 421-452 et 21 (6) pp 725-755

BRUCKERT S. et KILBERTUS G. (1980) - Fractionnement et analyse des complexes organo-minéraux de sols bruns et de chernozems. Plant and soil., 57, 271-295

CALVET R. et CHASSIN P. (1973) - Complexes organiques des argiles : mécanismes de formation. Méthodes d'étude et application. Bull. Groupe Fr. Argiles, 25. pp 87-113

CARBALLAS T., ANDREUX F. et METCHE M. (1972) - Influence directrice de certains constituants de la litière sur l'élaboration et les propriétés de la matière organique d'un sol brun calcaire Bull. ENSAIA 14 (2) pp 245-261

CHABOUIS C. (1981) - Fractionnement granulométrique de la matière organique par dispersion aux ultrasons. In Coll. Humus-Azote (France) 1981 pp 207-213

CHADOEUF J. (1981) - Modélisation de l'évolution des matières organiques du sol. Estimation des paramètres et simulation. D.E.A de statistiques et modèles Paris XI. 50 p.

CHAMINADE R. (1946) - Ann. Agro., 2, pp 119-132. Cité par BOIFFIN (1975)

CHAMINADE R. (1958) - Influence de la matière organique humifiée sur l'efficacité de l'azote. Ann. Agro, 9, pp 167-192

CHAMPLIN J.B.F. (1966) - Separation by ultra-sonic elutriation and analysis of the fine particles of soil. Canad J. Soil Sci. 44, n°3. Cité par BONFILS et DUPUIS (1969)

CHASSIN P. (1975) - Etude des interactions montmorillonite calcique-eau-diols. Hydratation des complexes Montmorillonite Diols. Thèse Doct. Etat. Univ. Paris. 91p.

CHASSIN P. (1977) - Influence des substances humiques sur les propriétés des argiles. Adsorption des acides humiques et fulviques par la montmorillonite. Clay Minerals. 12, pp 261-271

CHASSIN P. (1978) - Influence des substances humiques sur les propriétés des argiles. Hydratation des associations montmorillonite acides humiques. Clay Minerals 13, pp 1-16

CHASSIN P. (1979) - Hypothèse sur la structure du complexe argilo-humique. Conséquences sur le processus d'humification. Bulletin de l'A.F.E.S. n°4, pp 323-332

CHASSIN P. (1983) - Influence des substances humiques sur les propriétés des argiles - Apports des études sur modèles. Bulletin de l'A.F.E.S n° 2, pp 115-120

CHASSIN P. (1983) - Analyse des contraintes agronomiques liées à l'utilisation des pailles comme source d'énergie. Contrat C.E.E INRA 85 p.

COOKE (1967) - The control of soil fertility. Cross by lockwood and son LTD London. Cité par BOIFFIN 1975

DEMOLON (1960) - Principes d'agronomie Tome 1 : Dynamique du sol Paris - Dunod 520 p.

DEMOLON (1956) - Principe d'agronomie Tome II : croissance des végétaux cultivés. Paris : Dunod 576 p.

DOORMAR J.F. (1967) - Polysaccharides in chermozemic soils of southern Alberta. Soil Sci., 103 ; pp 417-423

DUCHAUFOR Ph. (1976) - Dynamics of organic matter in soils of temperate regions : its action on pedogenesis. Geoderma, 15, 1. pp 31-41

DUCHAUFOR Ph. et SOUCHIER B. (1979) - Pédologie. Tome II. constituants et propriétés du sol (avec M. BONNEAU et al. 1979). Paris, MASSON ed., 459 p.

DUCHAUFOR Ph. (1984) - Abregés de Pédologie. Paris, Masson, ed., 220 p.

DUPUIS T., JAMBU P. et DUPUIS J. (1970) - Etude par ATD des substances extraites de sols hydromorphes calciques. Ann. Agron. 21.1 pp. 75-94

EDWARDS A.P. et BREMNER J.M. (1964) - Utilisation de vibrations sonores pour la séparation des particules du sol. J. of. Soil Science Vol 18, n° 1 pp 47-63

EDWARDS A.P. et BREMNER J.M. (1965) - Dispersion of mineral, colloids 1 soil using cation exchange vesins. Nature, Lond. 205, pp 208-209

EDWARDS A.P. and BREMNER J.M. (1967) - Dispersion of soil particules by sonic vibration. Journal of Soil Science, Vol. 18, n°1, pp 47-63

FLAIG W. (1965) - Action des produits de dégradation de la lignine sur le métabolisme végétal. Mécanisme possible de cette action . C.R. Acad. Agric. 51, 17, pp 118-1138

FLAIG W. (1970) - Contribution à la connaissance de la constitution et de la synthèse des acides humiques. Sci. soil 2, pp 39-72

GALLALI T. (1972) - Etude statistique et dynamique des polysaccharides et des amino-polysaccharides au cours de l'humification. Thèse de spécialité. Univ. Nancy, 93 p.

GAUCHER G. (1968) - Traité de pédologie agricole "Le sol et ses caractéristiques agronomiques". DUNOD.

GILMOUR C.M., BROADBENT F.E. et BECK S.M. (1977) - Recycling of carbone and nitrogen through land disposal of various wastes. Cité par Chadoeuf 1981.

GOH K.M. (1980) - Dynamics and stability of organic matter. In : Soils with variable charge. Elsevier. Scientific Publishing Company. pp. 373-393.

GREENLAND D.J. (1965a) - Interaction between clays and organic compounds in soils. I. Mechanisms of interaction between clays and defined organic compounds. Soils et Fertil., 28, n° 6, pp. 415-425.

GREENLAND D.J. (1965b) - Interaction between Clays and organic compounds and its effects on soil properties. Soil et Fertil. 28, n° 6, pp. 521-532.

GREENLAND D.J. (1971) - Interaction between humic and fulvic acids and clays. Soil Sci. 111 (1), pp. 34-41.

GRIFFITHS E. et BURNS R.G. (1972) - Interaction between phenolic substances and microbial polysaccharides in soil aggregation. Plant and Soil., 36 ; pp. 599-612.

GUCKERT A. (1973) - Contribution à l'étude des polysaccharides dans les sols et de leur rôle dans les mécanismes d'agrégation. Thèse Doct. Etat. Univ. NANCY, 124 p.

GUERIF J. (1980) - Rôle des matières organiques sur le comportement des sols au compactage. 2. Matières organiques libres et liées. Ann. agron., 31, pp. 469-480.

GUERIF J. (1982) - Effect of cultivation on organic matter status and compaction behaviour of soil. 9th Conf. of ISTRO, OSIJECK, YUG. Wageningen, pp. 207-212.

GUERIF J. (1983) - Modification de la répartition et de l'évolution des matières organiques par la simplification du travail du sol, conséquences sur quelques propriétés physiques. Journée d'étude Rotations céréalières intensives, Paris. ONIC.

HENIN S., GRAS R. et MONNIER G. (1969) - Le Profil cultural. L'état physique du sol et ses conséquences agronomiques. Paris, Masson ed., 332 p.

HENIN S. et DUPUIS M. (1939) - Essai de bilan de la matière organique du sol. Ann. agron. n°15, pp. 17-29.

HENIN S., MONNIER G., TURC L. (1959) - Un aspect de la dynamique des matières organiques du sol. C.R. Acad. Sci. 248, pp. 138-141.

HENIN S. et BURGEVIN H. (1945) - Dix années d'expériences sur l'action des engrais sur la composition et les propriétés d'un sol de limon. Ann. Agron. n°6, 1.

HETIER J.M. (1975) - Formation et évolution des andosols en climat tempéré. Thèse Doct. Etat, Univ. Nancy I. 194 p.

HINDS A. et LOWE L.E. (1980) - Dispersing and dissolution effects during ultrasonic dispersion of gley sodic soils in water and in electrolytes. Can. J. Soil Sci. n° 60, pp. 329-335.

HINDS A. et LOWE L.E. (1980) - The use of an ultrasonic probe in soil dispersion and in the bulk isolation of organic-mineral complexes. Can. J. of Soil Sci. n° 60, pp. 389-392.

HORTON D. et WALFROM M.L. (1963) - Polysaccharides. Comprehensive biochemistry, vol. 5 ; Carbohydrates, 7, pp. 185-231. Ed. Florkin and Stolz. Cité par DECAU (1968).

HUNT H.W. (1977) - A simulation model for decomposition in grass lands. Ecology 58, pp. 469-484.

JACQUIN F. (1963) - Contribution à l'étude des processus de formation et d'évolution de divers composés humiques. Thèse Doct. Etat. Univ. Nancy I.

JACQUIN F., GUKERT A. et GALLALI T. (1972) - Evolution des polysaccharides et des aminopolysaccharides au cours de l'humification. Congrès de Moscou, 1974. pp. 217-219.

JAMBU P. et DUPUIS T. (1975) - Characterization of soil humic substances and their organo-metallic derivatives by thermal analysis. Trans. of the 6th int. Cong. "Humus et Planta". Prague. pp. 69-72.

JAMBU P., DUPUIS T. et DUPUIS J. (1975) - Caractérisation par analyse thermique différentielle des complexes métalliques fulviques et humiques. J. of thermal Analysis, vol. 8, pp. 231-237.

JAMBU P., FUSTEC E. et JACQUES Y. (1978) - Les lipides des sols: nature, origine, évolution, propriétés. Science du Sol, n° 4, pp. 229-240.

JANEL P., JOCTEUR-MONROSIER L. et TOUTAIN F. (1979) - Caractérisation de l'azote des litières et des sols par hydrolyse acide. Soil Biol. Biochem. vol. 11, pp. 141-146.

JENKINSON et RAYNER (1977) - The turn-over of soil organic matter in some of the Rothamsted Classical experiments. Soil Sci. 123 (5), pp. 298-305.

JOCTEUR MONROZIER L. (1977) - Etude des formes de l'azote dans les échantillons de surfaces de sédiments récents (Mer de Norvège). In : Orgon I : Mer de Norvège. Géochimie organique des sédiments marins profonds. CEPM-CNEXO, 1974. Ed. CNRS. Paris, pp 269-279.

JOCTEUR MONROZIER L. et ANDREUX F. (1981) - L'azote organique des sols. Exemples des quantification des formes protéiques et des combinaisons complexes. Bulletin de l'A.F.E.S. pp. 219-234.

(KANNO J. et ARIMURA Sh. (1967) - Dispersion of humic allophane soils with supersonic vibration. Soil Sci. and Plant Nut. 13, n° 6, pp. 165-170.

KHAN S.U. (1971) - Distribution and characteristics of organic matter extracted from the black solonchic and black chernozemic soils of Alberta : the humic acid fraction. Soil Sci., 112, (6), pp. 401-409.

KIERSHAW et BOHNER (1969) - Cité par Schnitzer et Khan 1975.

(KOBO K. et OBA Y. (1965) - Dispersion of clay fraction of volcanic ash soils by sonic treatment. Soil Sci. pl. Nuta. Vol. 11, n°6, pp. 41-42.

(KRAVITZ J.H. (1966) - Using and ultrasonic desruptor as and aid to wet sieving. J. Sediment. Petrol. U.S.A. 36, n° 3, pp. 811-2.

LIBOIS (1966) - Le phosphore. Fertilisation 66. Cycle supérieur de fertilisation. Revue agricole de France n° 52.

MARIOTTI A. (1982) - Apports de la géochimie isotopique à la connaissance du cycle de l'azote. Thèse Doct. Etat, Univ. Paris, 476 p.

MAYAUDON J. et SIMMONART P. (1965) - Humification dans le sol d'un complexes polysaccharidiques ¹⁴C d'origine microbienne. Medelingen van de Landbouwhogeschool. 30, pp. 941-955.

MEHTA N.C., DUBACH P. et DEUEL H. (1961) - Carbohydrates in the soil. Adv. in Carbohydrate Chem., 16, 335

MEYRS (1937) - Cité par BOIFFIN.

- MITCHELL B. (1960) - The differential thermal analysis of humic substances and related materials. *Scient. Proc. Royal. Dubl. soc.* 1 (4) pp. 330-356. cité par MOUCAWI.
- MONNIER G. (1965) - Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols. Thèse Fac. Sci. Paris. 140 p.
- MOREL R. (1982) - Transferts généraux d'azote et du carbone dans le sol. A.D.E.P.R.I.N.A. INA-Paris-Grignon. pp. 1-22.
- MOREL R. (1981) - Quelques aspects nouveaux de la dynamique du carbone et de l'azote dans le sol. *Ann. agron.* 29 (4), pp. 357-379.
- MOUCAWI J. (1981) - Recherches sur l'évolution de la matière organique dans les sols des plaines atlantiques (Plaine calcaire et bas-bocage vendéens, France). Thèse Doct. Etat Univ. Poitiers. 157 p.
- NICOLARDOT B. (1983) - Contribution à l'étude de la biomasse microbienne des sols à l'aide de micro-organismes marqués au Carbone 14 et ^{15}N . Thèse de Doct. ing. Univ. Lyon I, 120 p.
- NUSSBAUMER E., GUKERT A. et JACQUIN F. (1970) - Nature et répartition de la matière organique cimentant les agrégats d'un sol après incubation, en présence de glucose radioactif. *C.R. Acad. Sci.* 270. pp. 3235-3238.
- OADES J.M. (1974) - Synthesis of polysaccharides in soil by microorganisms. *Biol. of Soils. Trans.* 10 th Int. Congr. Soil Sci. Moscow, 3. pp. 93-100.
- PAL et BROADBENT (1975) - Kinetics of rice straw decomposition in soils. *J. Environ. Qual.* 4, pp. 256-260.
- PAUL E.A., CAMPBELL C.A., RENNIE D.A. et Mc CALLUM K.J. (1964) - Investigations on the dynamics of soils humus utilizing carbon dating techniques. In : *Proc. 8th Intern. Cong. Soil Sci.* Bucarest III, pp.201-207.
- PIERRE D. (1979) - Variation de l'abondance naturelle de l'isotope ^{15}N dans le sol au cours de l'humification de la matière organique. Thèse de spécialité Univ. Paris. 85 p.
- PROST R. - Eléments fondamentaux de spectroscopie infrarouge pour l'étude des minéraux secondaires et de la matière organique. *Bulletin de l'A.F.E.S.* n° 1, pp. 19-29.
- QUIRCK J.P. et WILLIAMS B.G. (1974) - *Trans. 10th. Int. Cong. Soil. Sci. Moscou*, pp. 165-171.
- REMY H. (1971) - Influence de la constitution physique des sols sur leur comportement mécanique ; signification des limites d'Atterberg en matière de travail du sol. *Ann. Agron.*, n° 28, vol 3, pp. 267-290.
- RUELLAN et DELETANG (1967) - Les phénomènes d'échange de cations et d'anions dans les sols. *ORSTOM.* Cité par BOIFFIN J. (1975)

RUSSELL J. S. (1964) - Mathematical expression of seasonal changes in soils organic matter. Nature 204, pp. 161-162.

SAFALI et YAMANE (1972 b) - cité par VAUGON C.

SALY R. (1967) - Use of ultra-sonic vibration for dispersing soils samples. Soviet Soil Sci. n° 11, pp. 1547-59.

SAUNIER et BONNET (1970) - L'asphyxie radriculaire chez les arbres fruitiers. Bull. Tech. d'information n° 251. 403 p.

SCHARPENSEEL H.W. et SCHIFFMANN H. (1977) - Radiocarbon Dating of Soils. A Review. Zeitsch. Pflanzenern. Bodenk. 140, 159-174.

SCHNITZER M. (1963) - Soil Sciences 96 ; pp. 181-186.

SCHNITZER M. et HOFFMAN I. (1964) - Pyrolysis of soil organic matter. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 28, pp. 520-525.

SCHNITZER M. et KHAN S.U. (1972) - Humic substances in the environment. Marcel Dekker, inc. New-York, 320 p.

SCHNITZER M. et KHAN S.U. (1978) - Soil organic matter. Elsevier scientific publishing company. Amsterdam, Oxford, New-York. 320 p.

SEBILLOTE M. (1969) - Les modifications des assolements et rotations liées à l'emploi des herbicides. C.R. Coll. Herbicides et techniques de cultures ; FNGPC-COLUMA.

SEQUI P., GUILDI G. et PRETRUZZELI G. (1975) - Geoderma - pp. 153-161.

SHAYMUKHAMETOV S.H. (1968) - Experimental use of ultra sound to study the mechanism of fixation of organic matter in the soil. Sov. Soil Sci., vol 5. pp. 346-353.

SIMMONS G. (1965) - Les ultra-sons en géologie. Proc. I.E.E.E. (U.S.A.) 53, n° 10, pp. 1337-45.

SINHA M.K. et SINHA D.P. (1977) - Organic matter transformation in soils. U. Kinetics of carbon and nitrogen mineralization in soils amended with different organic materiels. Plant and Soil 46, pp. 579-590.

SPIEGEL (1982) - cité par CHASSIN (1983).

STANFORD et PIERRE (1953) - Soil management practices in relation to phosphorus availability and use. Cité par BOIFFIN 1975.

STANFORD G. et SMITH S.J. (1972) - Nitrogen mineralization potentials of soils. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 36, pp. 465-472.

SYERS G., CAMPBELL C.A. et WALKER B. (1970) - Contribution of organic carbon and clay to cation exchange capacity in a chronosequence of sandy soils. Plant Soil, 33, pp. 104-112.

THENG B.K.G. et POSNER A.M. (1967) - Nature of the carbonyl groups in soil humic acid. Soil Science, 104, pp. 191-201.

THENG B.K.G. (1979) - Formation and properties of clay polymer complexes. Elsevier scientific publishing Company, 362 p.

TISDALL J.M. and OADES J.M. (1982) - Organic matter and water-stable aggregates in soils. J. of Soil Science, n° 33, pp. 141-163.

TROCME S. (1966) - Cycle supérieur de fertilisation ; Mg, S, oligoéléments, R.A.F. n° 52, cité par Boiffin (1975).

TURCHENECK L.W. et OADES J.M. (1979) - Fractionnement of organo-mineral complexes by sedimentation and density techniques. Geoderma, 21, pp. 311-343.

VAN VEEN J.A., PAUL E.A. (1981) - Organic carbon dynamics in grassland soils. I. Background information and computer simulation. Can. J. of Soil Sci. 61 (2), pp. 185-201.

VAUGON C. (1983) - Etude de l'action des ultrasons sur la dispersion des agrégats du sol. Mem. INA.Paris-Grignon ENSA Rennes 61 p.

VLADIMIROV (1968) - Study of the effects of acoustic vibrations on the physico-chemical properties of a soil suspension. Sov. Soil Sci. vol 5, pp. 127-134.

ZUNINO H. et MARTIN J.P. (1977) - Metal buiding organic macromolecules in soil : I. Hypothesis interpreting the role of soil organic matter in the translocation of metal ions from rock to biological systems. Soil Sci. vol 125, n° 2, pp. 65-76.

ANNEXE

LE DISPOSITIF EXPERIMENTAL DES 42 PARCELLES 1928-1983

Il y a exactement 55 ans, une importante expérience était entreprise à la Station Centrale d'Agronomie de l'I.N.R.A. à Versailles.

Cette réalisation, mise en place au cours de l'année 1928, se poursuit à l'heure actuelle selon un protocole immuable. Elle est connue sous le nom d'EXPERIENCE DES "42 parcelles".

Le but de ces expériences est d'étudier l'action prolongée des principaux engrais et amendements sur la structure du sol, la réaction (pH) et la teneur en éléments fertilisants (HENIN et BURGEVIN, 1939).

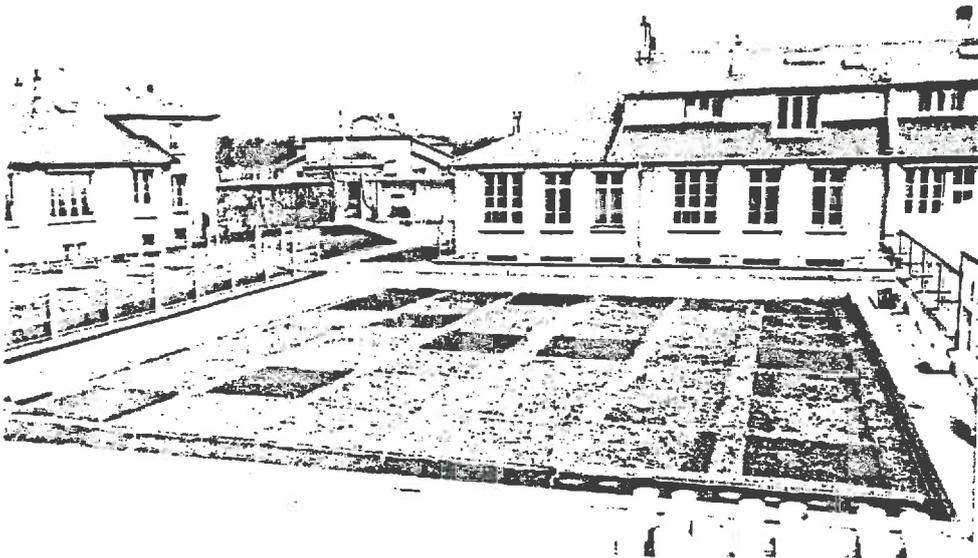
Les parcelles de 2 m x 2 m 50 sont délimitées sur un terrain de limon de Versailles. Elles sont séparées par des sentiers et disposées en deux groupes contigus de 21 parcelles.

Un de ces groupes reçoit chaque année des amendements organiques ou des engrais azotés ; l'autre des amendements calcaires, des engrais phosphatés ou potassiques.

Dix parcelles ne reçoivent rien et servent de témoins.

Aucune culture n'est implantée ; le sol est maintenu en jachère nue, les engrais et les amendements sont épandus à la main dans la deuxième quinzaine de novembre, sauf les nitrates qui sont appliqués au printemps.

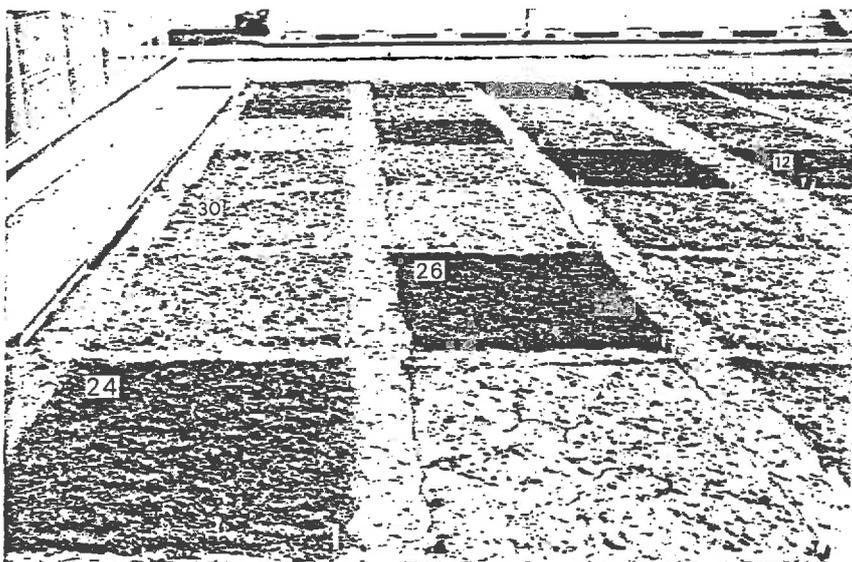
Le sol est travaillé deux fois par an.



Vue générale

Plan de l'expérience
des 42 parcelles

42 Témoin	41 Sulfate de potasse	40 Chaux	21 Témoin	20 Nitrate d'ammoniaque	19 Sulfate d'ammoniaque
39 Carbonate de chaux	38 Super- phosphate de chaux	37 Chlorure de potasse	18 Sang déséché	17 Nitrate de soude	16 Nitrate de chaux
36 Sylvinite	35 Scories	34 Témoin	15 Chlorhydrate d'ammoniaque	14 Phosphate d'ammoniaque	13 Témoin
33 Phosphate naturel	32 Témoin	31 Carbonate de chaux	12 Fumier	11 Témoin	10 Fumier
30 Témoin	29 Sylvinite	28 Phosphate naturel	9 Témoin	8 Sang déséché	7 Chlorhydrate d'ammoniaque
27 Super- phosphate de chaux	26 Chaux	25 Sulfate de potasse	6 Nitrate d'ammoniaque	5 Nitrate de chaux	4 Nitrate de soude
24 Scories	23 Chlorure de potasse	22 Témoin	3 Phosphate d'ammoniaque	2 Sulfate d'ammoniaque	1 Témoin



Vue de détail

PARCELLES
N°12 Fumier
N°24 Scories
N°26 Chaux
N°30 Témoin

METHODES D'ANALYSES

1 - Carbone organique total

Le carbone est dosé :

- soit par la méthode Anne (1945)
- soit en coulométrie.

2 - Azote organique total

L'azote est dosé :

- soit par la méthode Kjeldahl
- soit en autoanalyseur C.H.N. Carlo Erba 1104.

3 - Matière organique totale

Taux de carbone x 1,72.

4 - Capacité totale d'échange

mesurée à pH - 7 après saturation d'acétate d' NH_4^+
(méthode INRA-ARRAS).

5 - Substances humiques

Fractionnement des substances humiques.

- . extractions successives des matières organiques par le pyrophosphate de sodium 0,1 M (pH 9,7) et la soude N/10.
- . séparation des acides humiques et fulviques par acidification à pH 1,5 par HCl puis centrifugation.

6 - Formes d'azote : Méthode BREMNER (1965) simplifiée.

Les échantillons sont traités par HCl 6 N à ébullition pendant 12 heures sous réfrigérant à reflux.
Sur une partie aliquote des fractions solubles et insolubles, on dose :

- l'azote non hydrolysable (culot) et hydrolysable (solution) par la méthode Kjeldahl,
- l'azote amide et ammoniacal de la solution par distillation à pH alcalin.

7 - Dosage de sucres

Méthode de BRINK (1960) modifiée par GUKERT (1973) :
5 g d'échantillon sont additionnés à 50 ml d'eau distillée et placés à l'étuve à 80°C pendant 24 heures (Extraction de sucres libres). Ensuite ces sucres restant dans le culot sont extraits par H₂SO₄ 3 N (50 ml à l'étuve à 80°C pendant 24 heures).

Dosage par colorimétrie à 625 nm après coloration à l'anthrone en utilisant une gamme étalon de glucose. Les résultats sont exprimés en mg d'équivalent-glucose.

8 - Microscopie électronique à balayage

Microscope JEOL. J.S. 1. 35.

9 - Enregistrement de spectres d'absorption infrarouge

Les spectres ont été enregistrés avec le spectrophotomètre BECKMAN (580) à partir de dépôts sur fenêtre en fluorine.

10 - Courbes d'analyse thermique

Les courbes sont enregistrées à l'aide d'un micro-analyseur combiné (ATD-ATC) M T B-10-8, SETARAM M 4.

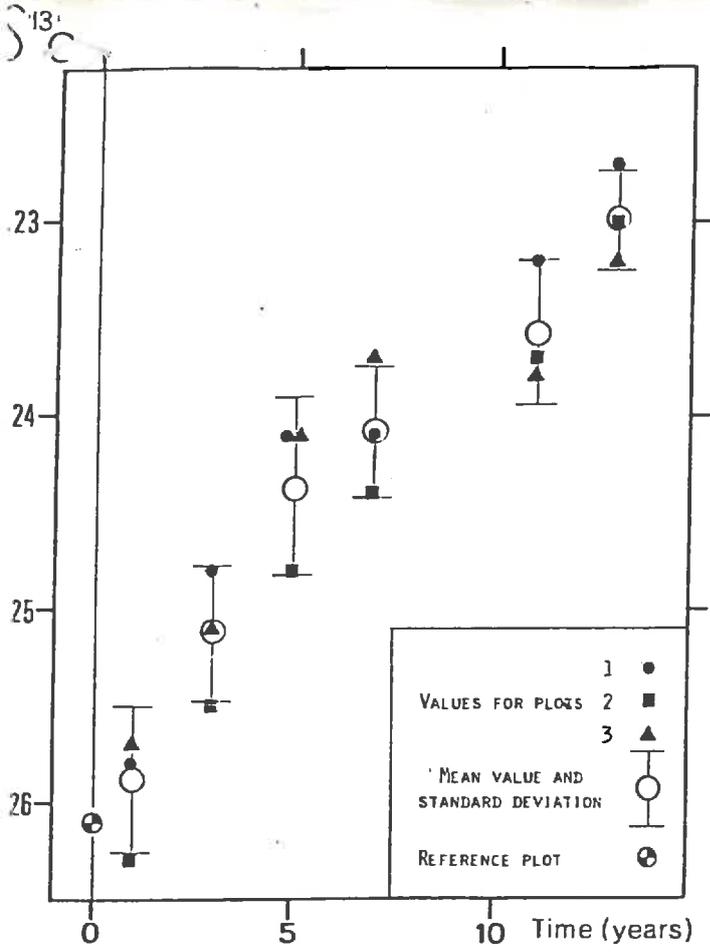


Figure 1

Figure 2

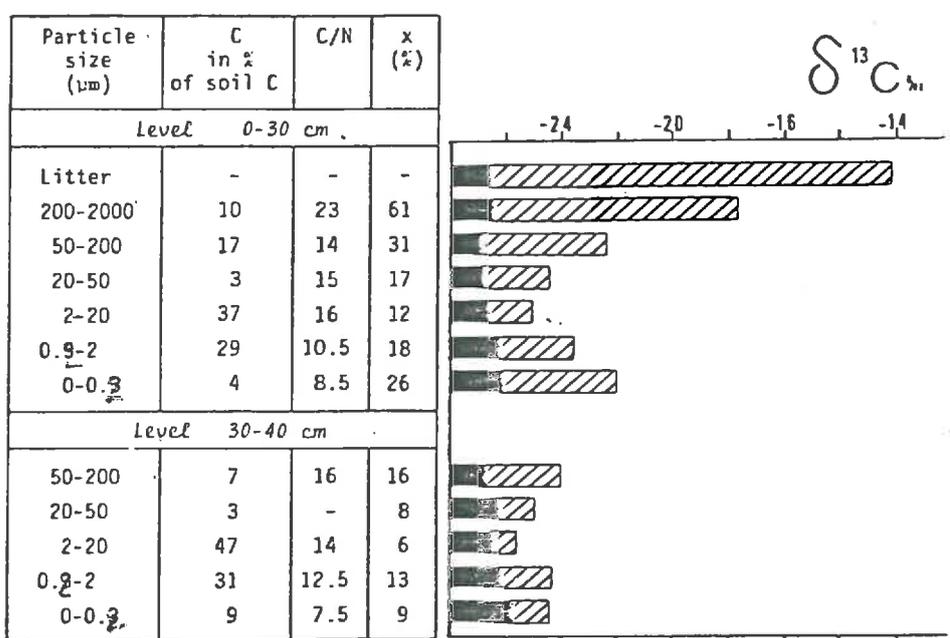
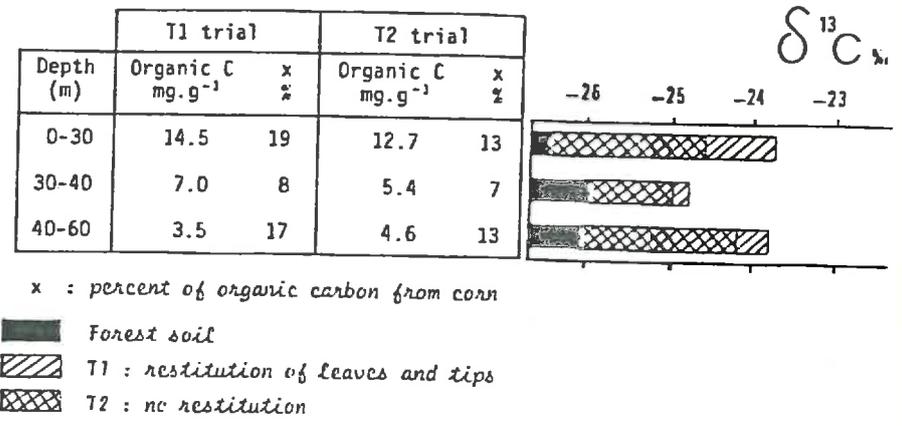


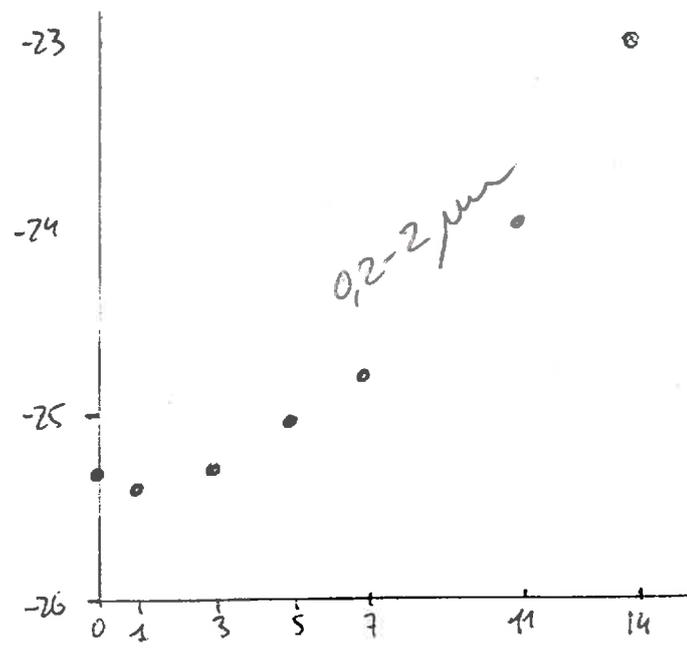
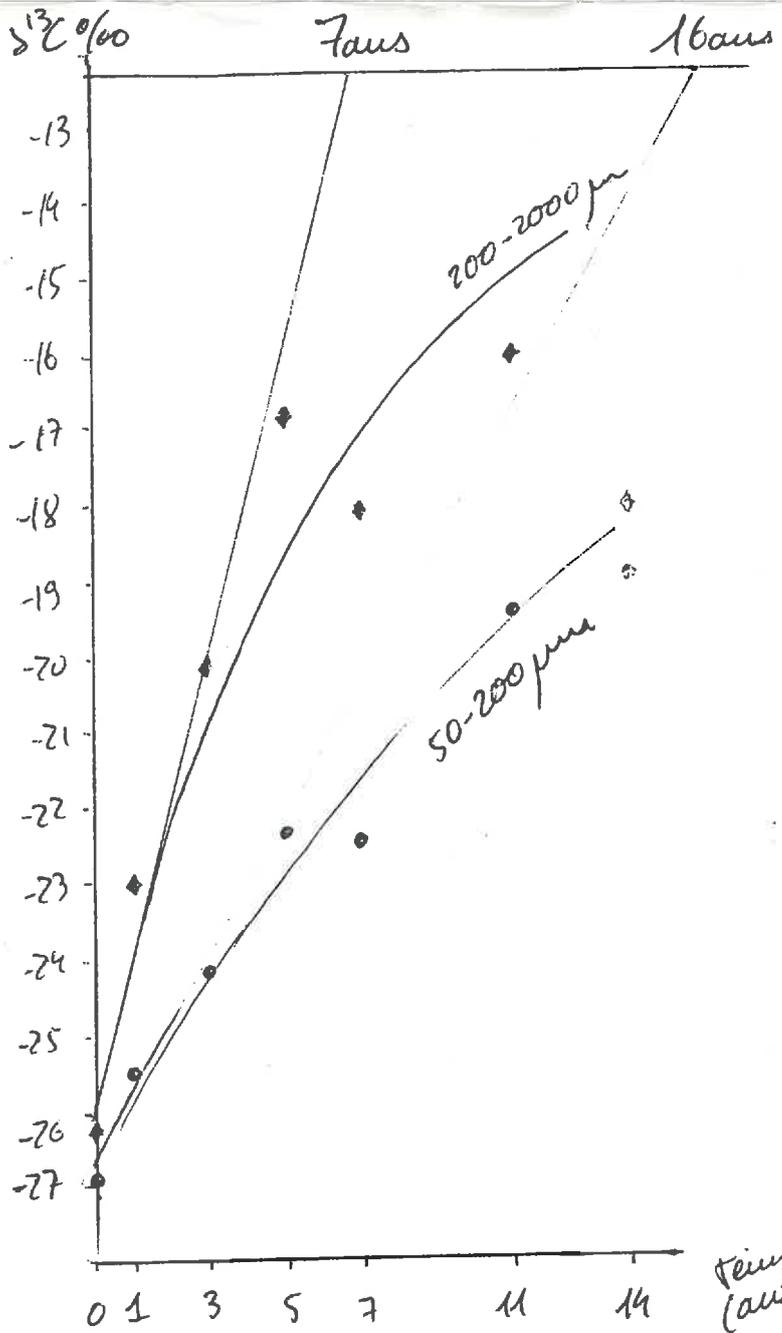
Figure 3

FIGURE CAPTIONS

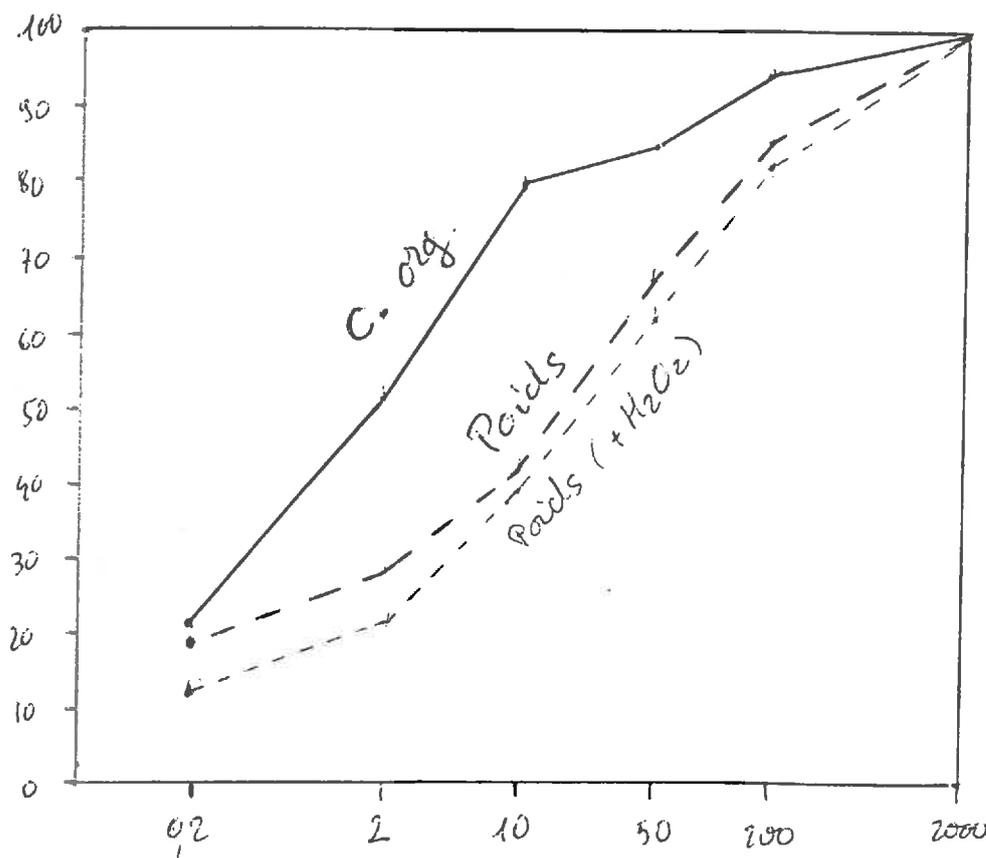
FIGURE 1 : ^{13}C enrichment of soil organic carbon under continuous corn cultivation (Auzeville experimental plots, topsoils 0-30 cm).

FIGURE 2 : Organic carbon content and $\delta^{13}\text{C}$ of 0-50 μm fractions in soils under forest (reference) and under 23 years continuous corn cultivation (Doazit experimental plots).

FIGURE 3 : Organic carbon content, C/N ratio and $\delta^{13}\text{C}$ of particle-size fractions associated organic matter in soils under continuous 23 years corn cultivation (Doazit experimental plot T1)



%



taille (µm)

Auzeville 0-30µm
dis persé par Net