

RECHERCHES SUR L'EVOLUTION DE LA MATIERE ORGANIQUE DANS
LES SOLS DES PLAINES ATLANTIQUES
(Plaine calcaire et Bas-Bocage Vendéens, France)

par

Jawad MOUCAWI

(Thèse d'état)

INTRODUCTION

Le Laboratoire de Pédologie de l'Université de Poitiers (E.R.A. 220 du C.N.R.S. "Pédologie des Pays Atlantiques") a effectué un certain nombre d'études sur les sols de la Plaine et du Bas-Bocage Vendéens.

Tout d'abord, les chercheurs du laboratoire ont dressé la carte pédologique au 1/100.000ème de cette zone (Feuille de Fontenay). Cela a permis de préciser la nature des sols, leur répartition dans le paysage et leurs caractéristiques physico-chimiques essentielles.

Par ailleurs, Ducloux (1970, 1971, 1973.b, 1976, 1978) et Ducloux et Ranger (1975, 1977) se sont attachés à dégager le rôle et la dynamique des processus impliqués dans l'évolution et la différenciation des sols de cette région. Ils ont précisé les phénomènes pédologiques anciens et actuels affectant les matériaux limoneux qui recouvrent en grande partie la Plaine et le Bas-Bocage vendéens. Ainsi, ils ont pu montrer que la rubéfaction, le lessivage et la dégradation hydromorphe sont les principaux processus qui contribuent à la différenciation des sols tant que ceux-ci n'ont pas été tronqués par l'érosion.

D'une manière générale, ces auteurs ont surtout étudié la dynamique de la fraction minérale du sol. Pour compléter leurs travaux, nous nous sommes proposé de suivre l'évolution de la matière organique dans les principaux types de sols. Nous avons l'avantage de trouver là un milieu climatiquement homogène, dont l'environnement physico-chimique était bien connu.

Nous avons eu pour but de suivre l'évolution de la matière organique en fonction des conditions du milieu telles que pH, nature des cations libres ou échangeables, intensité de l'assèchement estival des horizons humifères. Nous avons dû aussi préciser la nature et suivre le devenir des bioconstituants (lignine, polysaccharides, lipides, composés aminés) apportés aux sols par les débris végétaux ou produits *in situ* par les microorganismes.

Le taux de matière organique résidant dans le sol dépend de l'équilibre qui s'établit entre, d'une part, les apports et, d'autre part, les phénomènes de minéralisation qui se traduisent par des pertes sous forme de composés gazeux. L'évaluation des apports est difficile à réaliser de façon précise. Par contre, nous pourrons suivre, en fonction des saisons, l'intensité de la minéralisation du carbone organique.

Enfin, l'humification est un processus important : il conduit à la formation de composés relativement stables, donc plus difficilement minéralisables que les débris végétaux non transformés. C'est pourquoi nous nous sommes proposé d'évaluer l'importance de ce phénomène et de caractériser les produits qui en résultent dans les principaux types de sols de la Plaine et du Bas-Bocage vendéens.

Au total, nous aurons donc à aborder le problème de l'évolution de la matière organique dans les sols sous de nombreux aspects en utilisant à la fois des moyens analytiques et expérimentaux.

Il s'agit là de phénomènes importants en raison de l'influence déterminante que la biodynamique de la matière organique exerce sur l'évolution de l'ensemble des sols.

PREMIÈRE PARTIE



L'ENVIRONNEMENT ET LES SOLS DE LA VENDÉE MÉRIDIONALE



Nous allons présenter le cadre géographique, les principaux facteurs écologiques qui contribuent à l'évolution des humus ainsi qu'à la répartition des sols dans le paysage.

CHAPITRE I : CADRE GEOGRAPHIQUE ET FACTEURS DU MILIEU

A - ASPECTS GEOGRAPHIQUES

La région étudiée se situe au Sud du département de la Vendée. On y distingue nettement deux unités naturelles : la Plaine et le Bas-Bocage (Figure 1).

1 - La Plaine

La Plaine vendéenne au substratum de calcaires jurassiques, forme une bande de quatre-vingts kilomètres de long environ sur dix kilomètres de large. Elle s'étend depuis la région de Talmont à l'Ouest, jusqu'au-delà de Niort vers l'Est. Au Sud, elle est limitée par le Marais Poitevin qu'elle domine. Au Nord, elle est séparée du Bas-Bocage par une dépression creusée dans les sédiments liasiques argilo-marneux.

Son relief général n'est que peu accentué. Faiblement ondulée, elle est cependant coupée par des vallées encaissées (Troussepoil, Vendée, Autise, Lay), orientées approximativement Nord-Sud. Dépourvue d'arbres et de haies, la Plaine vendéenne apparaît comme une vaste surface sèche et monotone contrastant avec les zones verdoyantes qui la bordent.

2 - Le Bas-Bocage

Le Bocage vendéen est une région naturelle, sur socle ancien (précambrien et primaire) s'étendant autour de La Roche-sur-Yon. C'est une région faiblement ondulée, qui s'abaisse régulièrement vers la Plaine. Toute la région du Bas-Bocage serait déformée par bombement à grand rayon de courbure d'axe Est-Ouest (Ters, 1961). Son relief consiste en une série de plateaux interfluves en pente douce, dominant les dépressions de faible profondeur. Ces dépressions sont quelquefois encaissées lorsqu'un cours d'eau suit leur talweg (Graon, Yon, Lay, Vendée). A côté des vastes étendues nues de la Plaine, le Bas-Bocage, divisé en petites parcelles de haies vives, apparaît comme un pays très fermé.

B - FACTEURS DU MILIEU

Les résidus organiques d'origine végétale ou animale subissent, dès leur arrivée au sol, des transformations dont l'intensité et l'orientation dépendent des conditions physico-chimiques du milieu. Certains de ces facteurs peuvent agir directement : on sait, par exemple, que des alternances de dessiccation et d'humectation favorisent la polymérisation des composés humiques. Mais les conditions du milieu interviennent surtout par leur influence sur l'activité biologique dont dépend l'évolution de la matière organique du sol.

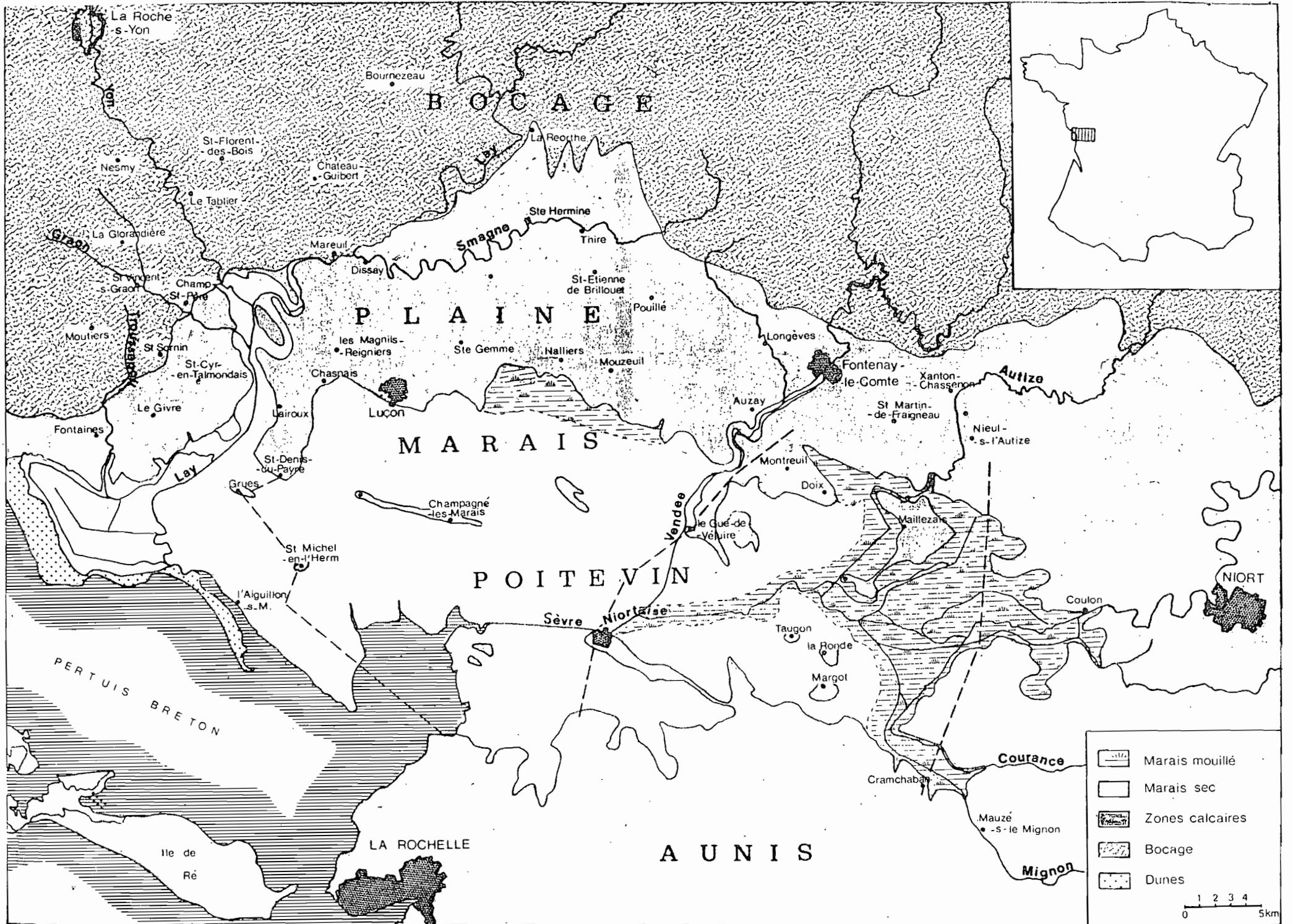


Fig.1 — CADRE GEOGRAPHIQUE

Nous les envisagerons donc brièvement.

1 - Roches-mères

Dans la Plaine vendéenne, le substratum calcaire appartient aux formations du Jurassique moyen : Bajocien et, surtout, Bathonien. Les formations marneuses du Callovien ne persistent qu'à l'état de lambeaux en bordure du Marais Poitevin, au Sud.

Un manteau de limons d'origine éolienne et non calcaires, recouvre ces formations jurassiques. L'épaisseur de ce manteau est très variable, l'érosion l'ayant quelquefois réduit à une mince pellicule.

Les dépôts limoneux se prolongent en couverture discontinue sur le Bas-Bocage vendéen. Ils reposent alors, le plus souvent, sur un substratum schisteux, généralement attribué au Briovérien. Bien qu'elles se superposent à des roches variées, les formations limoneuses présentent une grande homogénéité dans leurs caractères (Ranger, 1974). Notons cependant que les dépôts limoneux reposant sur substratum calcaire présentent seuls des signes de rubéfaction. On observe alors des teintes allant de brun rougeâtre (Munsel 5 YR 4/4) à jaune rougeâtre (7,5 YR 6/6) (Ducloux, 1971).

L'ensemble des dépôts limoneux paraît être d'origine périglaciale éolienne et mis en place comme dans le Bassin de Paris, par des vents dominants d'Ouest et du Sud-Ouest, à partir de matériaux d'origine locale (Bordes, 1952 ; Cailleux, 1953 ; Ters, 1961). Ces "cailloutis de base" observés dans certains profils tendent à montrer qu'il y aurait eu plusieurs dépôts successifs.

2 - Climat

Le climat joue un rôle essentiel dans l'évolution de la matière organique des sols.

Ranger (1974) a étudié le climat de la région en utilisant les données des stations météorologiques de La Roche-sur-Yon (Bocage) et de Sainte-Gemme-la-Plaine (Plaine vendéenne). Selon cet auteur, le secteur est soumis au climat atlantique et, plus précisément, à son type girardin (Sansou, 1949), c'est-à-dire à un climat dont la température annuelle est comprise entre 12 et 14°C, où les pluies fournissent une hauteur d'eau variant de 800 mm à plus d'un mètre et dont la durée d'insolation est voisine de 2.000 heures par an.

L'assèchement temporaire du sol favorise la polymérisation des substances humiques. Un excès d'eau peut provoquer un lessivage des composés solubles. Pour préciser les périodes de sécheresse ou d'excès d'humidité, nous avons calculé les valeurs mensuelles de l'indice d'aridité de De Martonne (1926) :

$$I_m = \frac{P \times 12}{T + 10}$$

P : pluviométrie moyenne annuelle
T : température moyenne annuelle

Pour Sainte-Gemme-la-Plaine, les résultats sont les suivants :

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$\frac{P \times 12}{T + 10}$	60,4	58,4	33,5	29,3	26,7	22,0	16,5	22,0	31,0	38,6	56,8	58,9

Pour De Martonne :

- un indice inférieur à 20 indique une période sèche. C'est le cas pour le mois de juillet ;
- un indice supérieur à 50 caractérise une période humide. C'est le cas pour les mois de novembre, décembre, janvier et février.

Pour évaluer l'intensité et la durée de la saison sèche, nous avons tracé les courbes ombrothermiques de Bagnouls et Gausson (1957), à partir des données pluviométriques et thermiques (Figure 2).

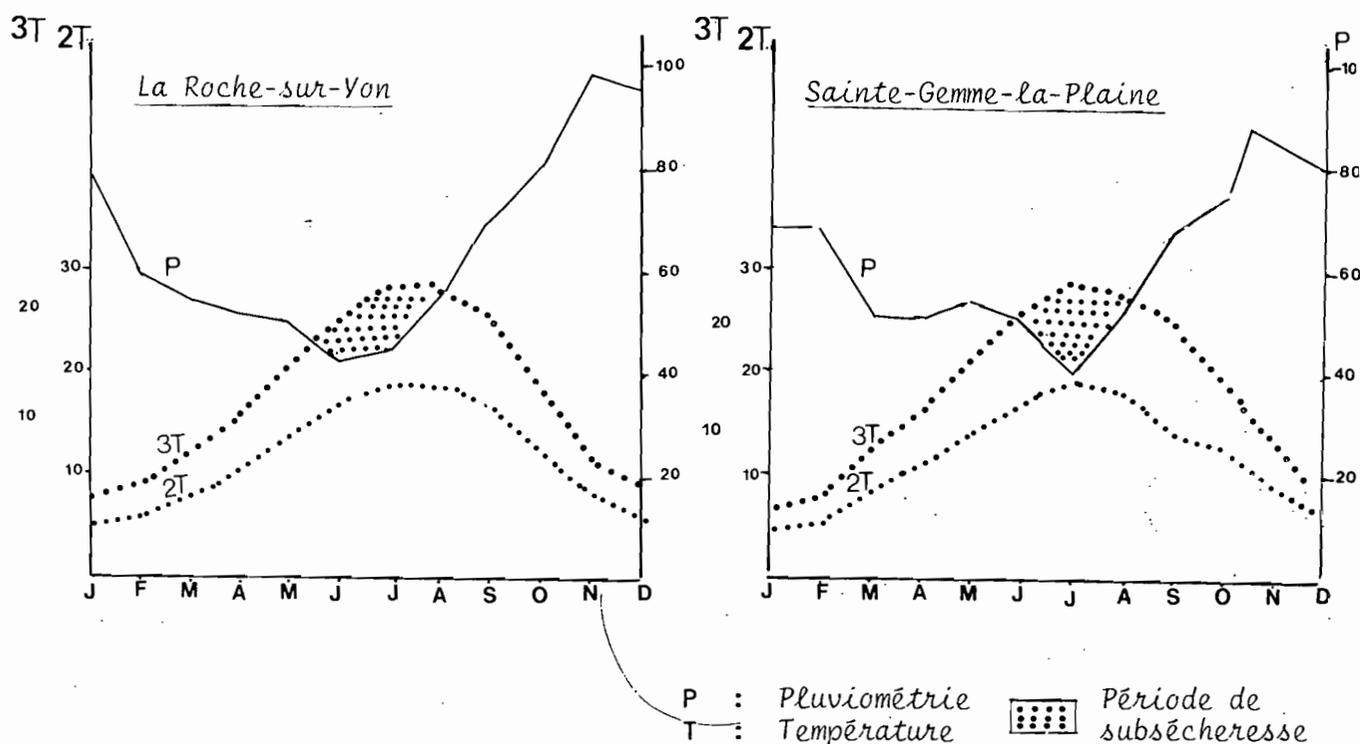


Figure 2 - Courbes ombrothermiques de Bagnouls et Gausson

A Sainte-Gemme-la-Plaine, on n'observe pas de saison sèche à proprement parler, mais les courbes de pluviométrie et de température (2 T) arrivent en tangence. Pour les années, les plus sèches, cette période existe nettement, même si elle est de faible durée.

La période de subsécheresse est représentée par la zone comprise entre l'intersection des courbes de pluviométrie et la température si l'on porte 3 T en ordonnée (Walter, 1955).

A La Roche-sur-Yon, on n'observe pas de période de sécheresse. Les courbes de pluviométrie et de température (2 T) sont nettement espacées. La saison de subsécheresse est bien individualisée.

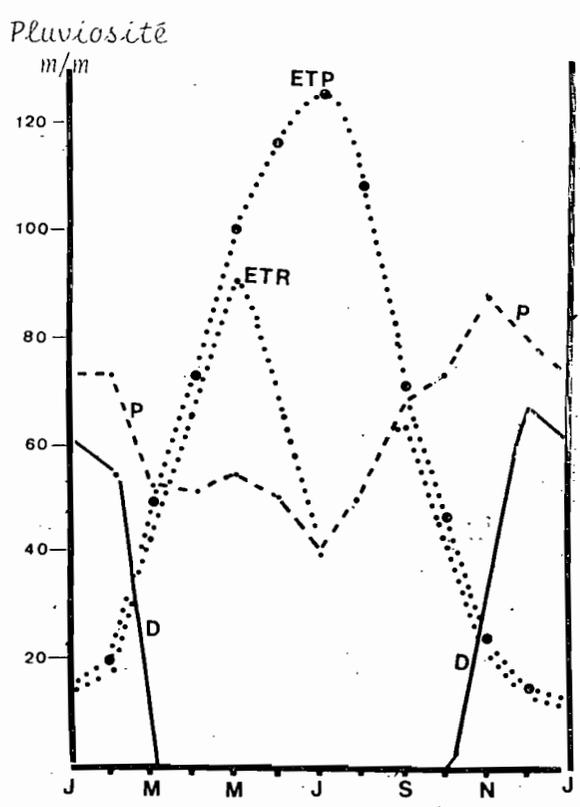
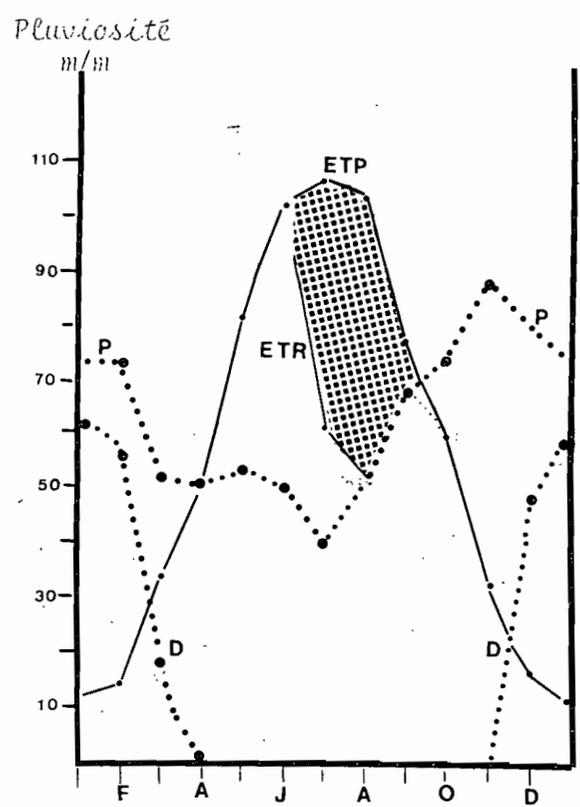
Ranger (1974) a calculé pour cette région le drainage théorique et établi un bilan hydrique selon différentes formules. Les résultats sont résumés dans le tableau 1 et la figure 3.

Auteurs	Drainage (en mm)	ETP annuelle (en mm)	ETR annuelle (en mm)
Hénin et Aubert (1945)	194,5		
Turc (1953)	239,0		
Turc (1961-1963)	225,0	757,0	534,5
Thorntwaite (1948)	187,5	683,5	567,5

Tableau 1 - Valeurs calculées du drainage, de l'évapotranspiration potentielle et réelle.

Bilan hydrique saisonnier (méthode Thornthwaite)

Bilan hydrique du sol (méthode Turc)



 Déficit estival

ETP : Evapotranspiration potentielle
 ETR : Evapotranspiration réelle

D : Drainage
 P : Pluviosité

Figure 3.

On voit que l'ordre de grandeur du drainage ne varie pas beaucoup ; on peut considérer qu'il a une valeur voisine de 200 mm par an.

Le climat atlantique fait apparaître d'une façon très générale un excédent hivernal et un déficit estival. Ranger (1974) a montré que ce dernier est cependant moins marqué dans le Bocage que dans la Plaine vendéenne.

Les caractéristiques stationnelles, notamment l'état de la structure, peuvent augmenter ou diminuer ces inégalités. Dans le cas présent, l'instabilité des agrégats liée à une texture limoneuse tendraient à les amplifier. L'excès d'eau hivernal conduira, dans certains sols, à une hydromorphie temporaire, tandis que les réserves estivales seront faibles.

En conclusion, le climat du Bocage est légèrement plus humide que celui de la Plaine voisine. La saison de subsécheresse existe dans les deux cas (juin, juillet, août), mais elle est plus prononcée dans la Plaine.

3 - Couvert végétal

La Plaine a été dépouillée de toute végétation arbustive et arborescente. La production agricole est dominée par les céréales, le maïs, le tournesol, alternant avec la luzerne ; par endroits, on trouve de petits vignobles. La mise en culture des sols bouleverse l'équilibre des horizons de surface et influence la quantité et la qualité des matières organiques.

A l'opposé, le Bocage est découpé en petits parcelles : tout le pays est enclos de haies vives de chênes, chataigniers et ormes. Les prairies alternent avec les terres cultivées (maïs, choux, betteraves). Des parcelles restent boisées et exploitées en taillis (chênes) à courte révolution, dont on connaît l'action dégradante sur le sol.

CHAPITRE II : PROFILS PEDOLOGIQUES DES STATIONS D'ETUDE

Les sols que nous allons étudier se développent à partir de limons correspondant à plusieurs dépôts d'âge différent. Dans la Plaine, où les sols ont été longtemps considérés comme autochtones (Riffault, 1837), Ducloux (1978) a montré que ceux-ci ne paraissent pas issus, du moins pour l'essentiel, de l'altération des calcaires qui les portent. Ils se développent aux dépens du manteau limoneux mis en place dès la période glaciaire Riss et remanié au cours du Würm.

Dans le Bas-Bocage, les sols se différencient dans des dépôts limoneux superposés : il existerait un cycle anté-rissien, un cycle rissien et un cycle superficiel würmien. Les profils développés dans ces manteaux présentent des caractères relictuels et polygéniques. Leur évolution actuelle est fortement influencée par l'héritage géo-pédologique et des actions climatiques anciennes.

Pour ces deux régions, nous allons préciser la répartition des sols dans le paysage.

A - SOLS DE LA PLAINE

Dans ces paysages calcaires, la répartition des sols est intimement liée à l'évolution (géomorphologique quaternaire) En effet, la couverture limoneuse a été soumise à une érosion dont l'intensité a varié en fonction du modelé de détail. Ainsi, peut-on définir une toposéquence régionale (Figure 4) :

1 - Sur les plateaux, là où l'érosion a respecté le manteau limoneux, se développent des sols lessivés rubéfiés. Ces sols ont généralement une épaisseur supérieure à un mètre (1,20 m en moyenne) ; on y distingue plusieurs horizons (voir Profil 1 NAL décrit en annexe).

En surface, l'horizon Ap est intensément soumis aux façons culturales ; il présente une texture limoneuse et une structure grumelleuse à polyédrique sub-angulaire. Il est de teinte brun jaunâtre (10 YR). L'horizon A₂ est généralement absent ; on l'observe cependant dans certains profils relevés sous forêt près de Sainte-Gemme-la-Plaine. Les horizons texturaux Bt sont assez fortement rubéfiés ; leur structure est prismatique grossière avec infiltration de limons sus-jacents entre les éléments structuraux. La texture est argilo-limoneuse. Enfin, à la base du solum, au contact du calcaire, apparaissent des horizons β, minces, plus foncés, plus argileux et plus riches en matière organique que l'horizon sus-jacent (Ducloux, 1970).

2 - Sur les gradins immédiatement inférieurs aux plateaux, où une partie de la couverture limoneuse a été enlevée par l'érosion, se développent des sols bruns calciques, localement désignés sous le terme de "Terres de Groie", issu du Charentais "gravois" désignant les graviers (Coquand, 1860). En effet, ces sols présentent une charge caillouteuse calcaire dont l'importance varie avec les façons culturales.

Bruns
calcaires ?

Sous
l'horizon
A₂ calcique
H₀ A
Craie de l'union Nua

S

N

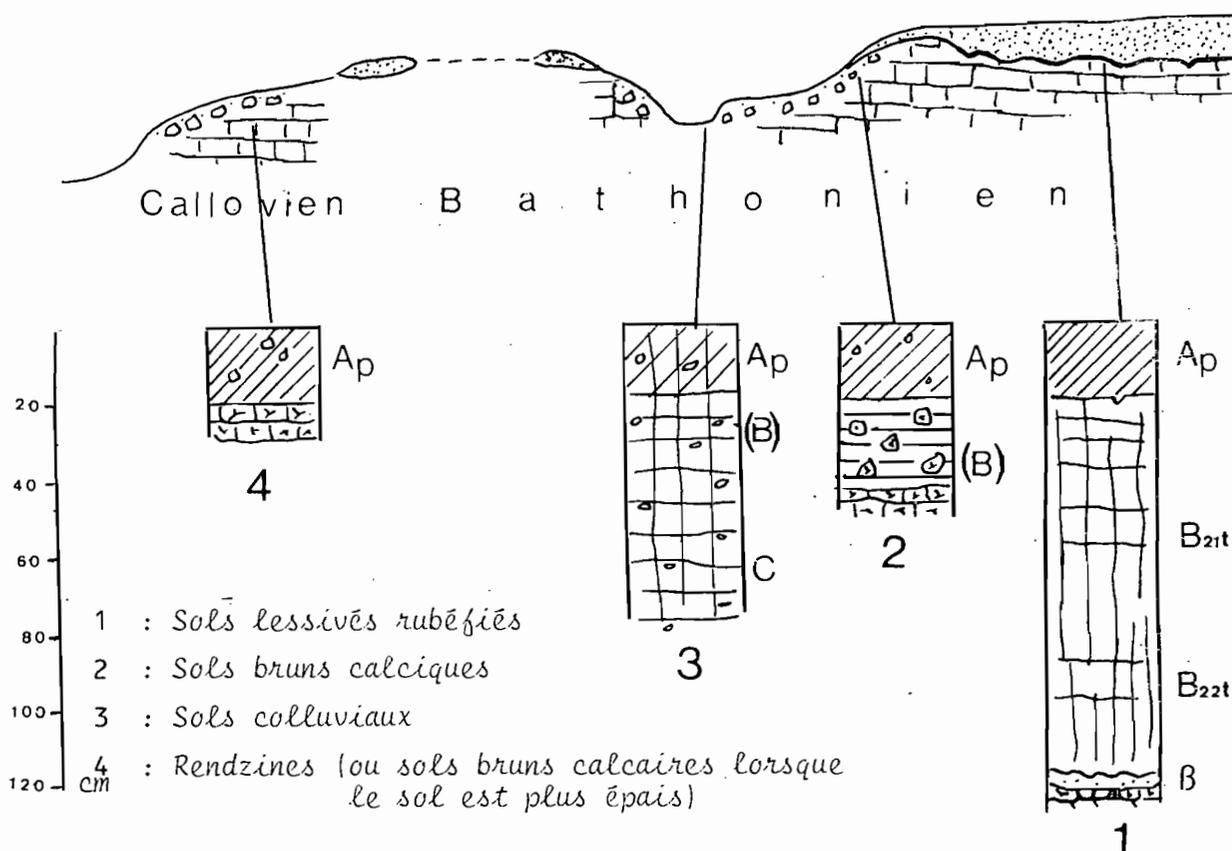


Figure 4 - Séquence pédologique sur calcaire de la Plaine vendéenne.

Le profil 1 MTR (Ducloux 1978) est très représentatif de ce type de sol (voir description en annexe). L'ensemble du profil présente une teinte brun rouge (7,5 YR). Les horizons Ap sont plus lourds que ceux des sols lessivés et les horizons (B) présentent une texture argileuse. Ces sols bruns calciques ne résulteraient pas de la formation d'un horizon structural par décalcarification du calcaire sous-jacent, mais plutôt de l'érosion des horizons superficiels de sols lessivés.

3 - Dans les parties basses et essentiellement sur la bordure méridionale de la Plaine vendéenne, les sols minces dominent (10 à 25 cm d'épaisseur). C'est pourquoi l'ensemble du solum est généralement intéressé par les façons culturales. La teneur en cailloux calcaires est variable car la recharge s'effectue essentiellement par remontée et fragmentation d'éléments grossiers lors des labours. Parmi ces sols minces, on peut en distinguer deux types :

- l'un correspond à des terres de groie minces, à texture limono-argileuse à argileuse. Ces sols sont généralement brun rouge (7,5 YR). Développés au-dessus de calcaires durs, ils correspondent à ce que l'on appelait autrefois les rendzines rouges (voir profil 4 SEB en annexe). A ce titre, ils devraient normalement être pauvres en calcaire fin. Mais avec une mise en culture intensive, ils se sont fortement recalcarifiés et contiennent une quantité notable de calcaire fin. En ce sens, on pourrait les qualifier de rendzines anthropiques. On peut les considérer comme le résultat de remaniements cumulés des sols lessivés de plateaux, aussi bien par les agents naturels (cryoturbation, par exemple) que par l'intervention humaine (érosion liée au défrichement, façons culturales).

- l'autre type de sol se développe sur les lambeaux de Callovien qui apparaissent çà et là en bordure du Marais Poitevin. Il correspond à des rendzines modales passant parfois à des sols bruns calcaires lorsque le solum est un peu plus épais. Ces sols (voir profil 1 CHA en annexe) se différencient nettement des précédents par leur teinte moins vive (10 YR) ; par contre, leur charge en cailloux, leur teneur en calcaire fin et leur texture sont semblables.

4 - Au fond des vallées sèches, sortes de couloirs où s'accumulent les produits d'érosion, se développent des sols d'apports que nous n'étudierons pas ici en raison de leur faible extension. De plus, ils possèdent certainement un héritage en composés organiques non négligeables et d'origines diverses. Cet héritage peut gêner lorsque l'on veut dégager l'évolution des produits en place.

B - SOLS DU BAS-BOCAGE

Nous n'étudierons que les sols développés sur les dépôts limoneux discontinus observés dans cette région.

Là encore, la répartition des sols dans le paysage est intimement liée à leur position géomorphologique (Figure 5).

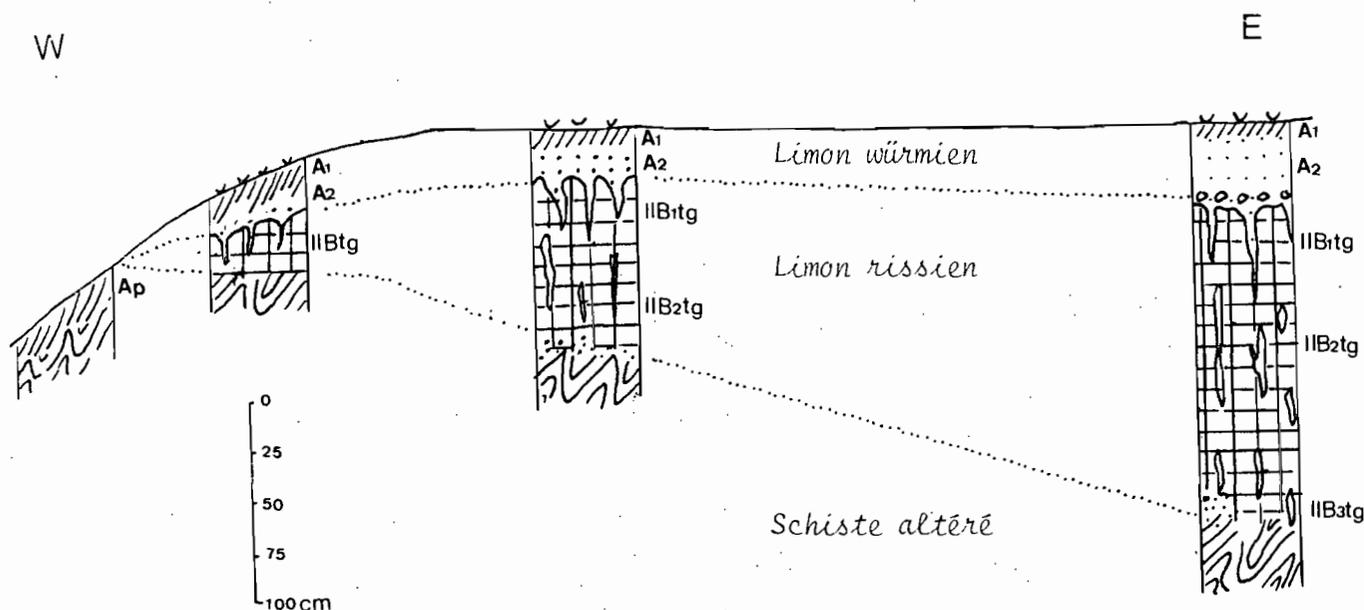


Figure 5 - Toposéquence des sols du Bas-Bocage - Région de Saint-Sornin

1 - Sur les plateaux et interfluves, où les dépôts limoneux sont épais, se développent des sols lessivés glossiques (voir profil 3 SOR décrit en annexe) (Ranger, 1974 ; Ducloux, 1978). Dans le profil, les horizons éluviaux grisâtres, sablo-limoneux, mal structurés, pénètrent sous forme de langues dans les horizons illuviaux. Ces derniers contrastent avec les précédents par leur teinte générale ocre, avec des zones blanchies, une texture argileuse et une structure prismatique. Certains horizons profonds ayant une sous-structure lamellaire quelquefois bien exprimée, accompagnée d'un compactage avec diminution de la

macroporosité, présentent des caractères de fragipan. Par ailleurs, des signes nets d'hydromorphie (taches rouille et nodules) apparaissent dès la base de l'horizon A₂.

2 - A la rupture de pente, par suite de l'érosion, on observe des sols lessivés tronqués.

3 - Sur les fortes pentes, les dépôts limoneux disparaissent ; il se développe alors des sols peu évolués sur schistes.

C - CONCLUSION

La diversification des sols apparaît liée à la présence de dépôts limoneux discontinus et d'épaisseur variable. Elle dépend également de la nature du substratum (calcaires tendres, calcaires durs, roches cristallines) sur lequel reposent les limons.

Dans la Plaine, lorsque les dépôts limoneux sont très érodés et deviennent très minces, le calcaire fragmenté et l'argile de décalcification se mélangent en proportions variables aux limons ; il apparaît alors des sols calcaires ou calciques, alors que les dépôts limoneux eux-mêmes ne sont pas calcaires.

La répartition des principaux types de sols dans le paysage dépend, dans la Plaine comme dans le Bas-Bocage, de l'évolution géomorphologique quaternaire qui a conditionné le maintien ou l'érosion plus ou moins poussée des dépôts limoneux.

De la Plaine au Bas-Bocage, les sols peuvent se regrouper en quatre ensembles pédologiques que nous classerons par ordre d'acidité croissante :

- sols bruns calcaires et rendzines)
- sols bruns calciques)
- sols lessivés rubéfiés)
- sols lessivés glossiques

Nous regrouperons donc dans un même ensemble les terres de groies minces, les rendzines modales et les sols bruns calcaires. En effet, au niveau de l'horizon Ap, l'environnement physico-chimique ne diffère pas considérablement.

CHAPITRE III : CARACTERISATION DES HORIZONS HUMIFERES DE SURFACE (A₁ ou Ap)

Une part très importante des transformations subies par la matière organique du sol s'effectue au niveau des horizons superficiels A₀, A₁ ou Ap. Aussi, allons-nous préciser, pour chaque ensemble pédologique décrit ci-dessus, les conditions physico-chimiques et biologiques dans lesquelles évoluent les résidus organiques atteignant le sol.

A chaque fois que cela sera possible, nous calculerons des valeurs moyennes.

A - ANALYSES PHYSIQUES

1 - pF et variation saisonnière de l'humidité

Les mesures n'ont été effectuées que sur trois sols : une rendzine modale de Saint-Martin-de-Fraigneau, un sol lessivé rubéfié de Nalliers et un sol lessivé glossique de Saint-Sornin.

La quantité d'eau retenue à différentes valeurs de pF est donnée sur le tableau 2.

Types de Sols	Horizons	pF 1,3	pF 1,6	pF 1,9	pF 2,5	pF 3	pF 4,2
Rendzine modale St-Martin-de-Fraigneau	Ap	70,2	65,7	55,5	41,2	30,0	19,0
Sol lessivé rubéfié Nalliers 1	Ap	48,3	45,6	42,1	31,6	24,0	9,0
Sol lessivé glossique Saint-Sornin 3	A ₁	80,6	71,8	57,0	46,1	32,3	23,0

Résultats exprimés en g d'eau/100 g de terre séchée à 105°C

Tableau 2 - Teneur en eau des horizons humifères à différentes valeurs de pF

Ces mesures renseignent sur la porosité du sol. En effet, selon Duchaufour (1970), la microporosité correspond au volume des pores capillaires de diamètre inférieur à 8 μ (pF 2,5) qui retiennent l'eau après ressuyage. De même, la macroporosité correspond au volume des pores > 8 μ occupés par l'air après ressuyage.

Selon les résultats donnés dans le tableau 3, les termes extrêmes, c'est-à-dire les sols calcaires et les sols lessivés dégradés, ont sensiblement la même répartition des micropores et des macropores. Par contre, ces deux types de porosité diminuent nettement au niveau des sols lessivés rubéfiés. En conséquence, leur stock d'eau à écoulement lent est plus faible et la circulation de

L'air y est ralentie. Remarquons cependant, en ce qui concerne les sols lessivés glossiques, que les mesures ont été effectuées sous forêt. Leur porosité ne serait certainement pas aussi bonne s'ils étaient cultivés comme les précédents.

Sols	Horizons	Microporosité $pF \geq 2,5$ Pores $< 8 \mu$	Macroporosité $1,3 < pF < 2,5$ Pores $> 8 \mu$
Rendzine modale Saint-Martin-de-Fraigneau	Ap	41,2	29,0
Sol lessivé rubéfié Nalliers 1	Ap	31,6	16,7
Sol lessivé glossique Saint-Sornin 3	A ₁	46,1	34,5

Tableau 3 - Répartition de la taille des pores dans les horizons A₁ ou Ap des sols de la séquence (d'après les mesures de pF).

Par ailleurs, nous avons suivi les variations saisonnières de l'humidité au niveau des horizons humifères (Tableau 4). On remarque que ceux-ci peuvent subir une forte dessiccation en été et/ou en automne (pF bien supérieur à 4,2). Cependant, les phénomènes de dessiccation sont atténués sous couvert forestier dans le sol lessivé glossique.

Sols	Hor.	Nov. 1978	Jan. 1979	Mars 1979	Mai 1979	Jan. 1980	Mars 1980	Mai 1980	Juil. 1980	Sept. 1980	Nov. 1980
Rendzine modale St-Martin-de-F.	Ap	9,5	30,0	29,1	17,1	31,4	33,5	14,7	22,0	8,0	27,0
Sol lessivé rubéfié Nalliers 1	Ap	5,8	20,0	21,3	19,4	18,0	21,0	9,8	15,0	4,0	22,3
Sol lessivé glossique Saint-Sornin 3	A ₁	10,2	45,0	47,2	40,9	43,0	50,0	46,0	43,5	34,0	42,1

Résultats exprimés en g. d'eau/100 g de terre séchée à 105°C

Tu humid

Tableau 4 - Variation saisonnière de l'humidité au niveau des horizons humifères de surface.

2 - Stabilité structurale

Les matières organiques stabilisent les agrégats du sol en diminuant leur mouillabilité ; mais les très longues molécules organiques peuvent également améliorer la cohésion des particules en servant de ponts entre les micelles d'argile (Hénin, 1976). D'autre part, en stabilisant la structure (ce qui améliore la circulation de l'air et de l'eau), on peut influencer l'évolution de la matière organique du sol.

Il nous a donc paru important de déterminer la stabilité structurale au niveau des horizons humifères de surface. Pour cela, nous avons utilisé la technique préconisée par Hénin et al. (1958, 1969). Nous n'avons fait que le test

au benzène car c'est lui qui met le mieux en évidence le rôle de la matière organique dans la stabilisation de la structure (Monnier, 1965). Les résultats sont donnés dans le tableau 5.

Types de Sols	Taux agrégats stables - 0,9 sables grossiers %		I _s	
	Sous culture	Sous forêt	Sous culture	Sous forêt
Rendzine modale St-Martin-de-Fraigneau	19,7		0,86	
Sols bruns calciques Ste-Gemme-la-Plaine 4	11,1		2,28	
Sols lessivés rubéfiés Nalliers 1 Ste-Gemme-la-Plaine 1	8,5	29,5	4,53	0,86
Sols lessivés glossiques Saint-Sornin 6 Saint-Sornin 3	11,1	62,8	2,41	0,12

Tableau 5 - Stabilité de la structure des divers sols de la séquence
Résultats du test au benzène.

On remarque que la stabilité structurale est toujours meilleure en milieu forestier où le taux de matière organique de l'horizon humifère superficiel est toujours plus élevé. D'autre part, certaines façons culturales peuvent détruire une partie des agrégats du sol.

Le long de la séquence, la stabilité structurale des agrégats varie sensiblement comme le taux de polysaccharides (Tableau 30). En accord avec le test de porosité, nous constatons qu'elle est minimum au niveau des sols lessivés rubéfiés. Notons cependant que, sous culture, les sols lessivés glossiques sont également très battants. Ranger (1974) a montré que l'indice de battance y atteint la valeur de 5.

Au total, des phénomènes d'anaérobiose au moins temporaire sont susceptibles de se produire dans les horizons de surface des sols lessivés (lessivés rubéfiés et lessivés glossiques), leur intensité étant en relation inverse avec la teneur en matière organique. La présence d'un couvert forestier atténue ces phénomènes.

3 - Granulométrie et minéralogie des argiles (Figure 6)

Nous avons porté les résultats des analyses mécaniques sur un diagramme de texture (Jamagne, 1967). Sur celui-ci (Figure 6), on voit que la texture varie d'un ensemble à l'autre. Les horizons Ap des sols bruns calcaires et des rendzines se rangent dans la classe des argiles limoneuses et même parfois dans la classe des argiles lourdes lorsque le sol repose sur du calcaire callovien. Les horizons A₁ ou Ap des sols bruns calciques ont une texture allant des limons argileux aux argiles limoneuses. Ceux des sols lessivés rubéfiés se placent dans la classe des limons argileux et ceux des sols lessivés glossiques dans la classe des limons sableux.

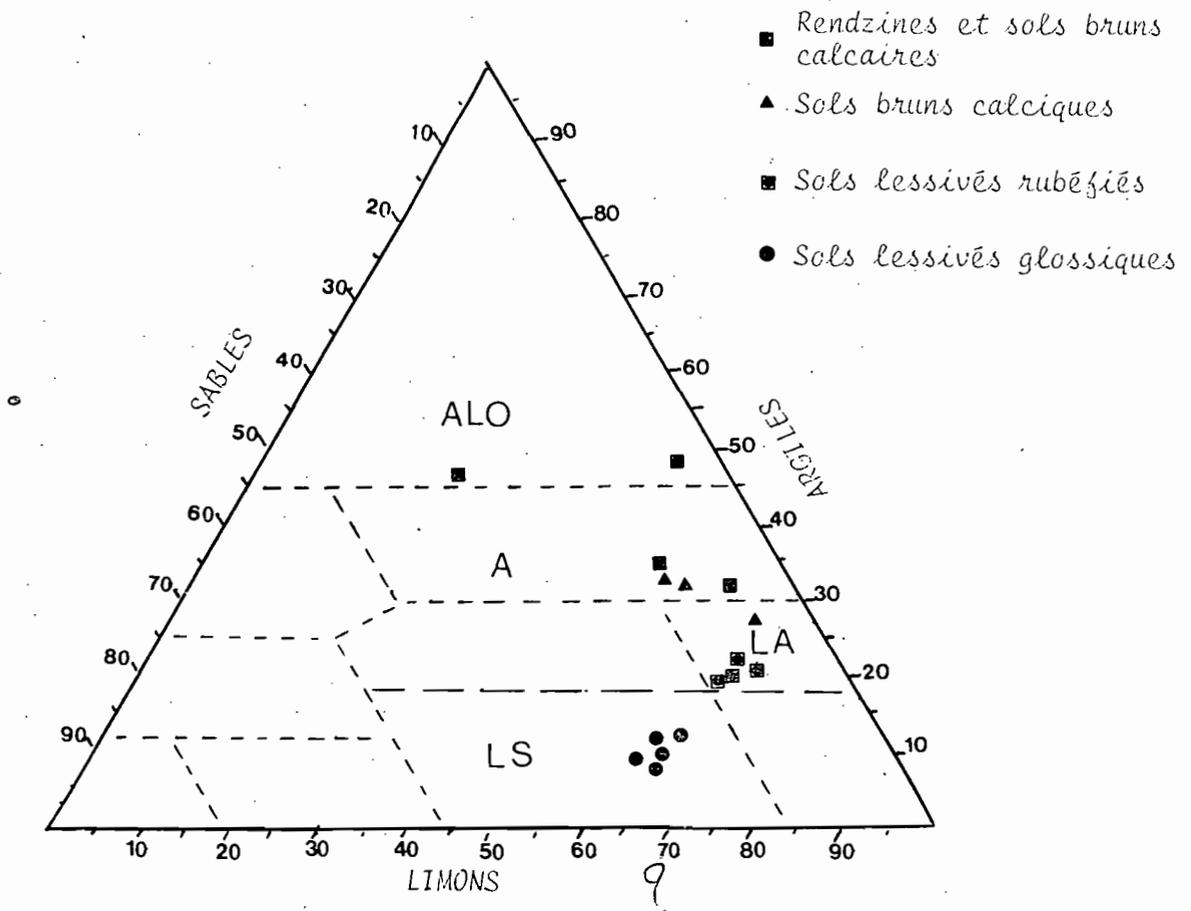


Figure 6 - Diagramme de texture des horizons humifères de surface.

On voit donc que le taux d'argile varie d'une extrémité à l'autre de la séquence (Tableau 6). En milieu calcaire ou calcique, la richesse en colloïdes minéraux est liée à une remontée anthropique d'argile de décalcification ou à des phénomènes d'érosion. Dans ce dernier cas, le sol actuel se développe à partir d'un ancien horizon d'accumulation de sol lessivé (Ducloux, 1978). A l'autre extrémité de la séquence, l'appauvrissement en argile des horizons de surface est en rapport avec les phénomènes de lessivage.

Dans les sols de la Plaine (sols calciques et sols lessivés rubéfiés), la kaolinite et l'illite constituent la majorité du stock argileux. Ces mêmes minéraux sont également abondants dans le Bocage ; à leur côté, on trouve un peu de vermiculite et des interstratifiés de type (10 I - 14 V) IR et (10 I - 14 C) IR, qui sont très peu représentés.

Au total, les minéraux argileux dominants sont les mêmes dans tous les sols : partout la kaolinite et l'illite dominant largement. On peut considérer les smectites comme absentes des horizons A₁ ou A_p. Ducloux (1978) en a cependant identifiées en profondeur au niveau des horizons β.

B - ANALYSES CHIMIQUES

1 - Fer et aluminium libres (Tableau 6)

Dans les sols de la Plaine, la teneur en fer libre est relativement importante. Celui-ci résulterait de l'altération de glébulles ferrugineux hérités des formations sédimentaires locales (Ducloux, 1978). La teneur en fer libre est particulièrement élevée au niveau des sols bruns calciques ; cela tient au fait que ces sols se développent souvent à partir d'horizons illuviaux de sols lessivés tronqués par l'érosion.

Types de sols	Argile	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃
Sols bruns calcaires et rendzines	29,9	2,9	-
Sols bruns calciques	28,4	4,9	-
Sols lessivés rubéfiés	19,9	2,6	-
Sols lessivés glossiques	11,5	0,9	0,3

Moyenne des résultats obtenus à partir de 2 à 5 sols exprimés en % de terre séchée à 105°C.

Tableau 6 - Teneur en argile, fer et aluminium libres

2 - pH

Les ensembles de sols que nous avons déterminés se répartissent approximativement entre les limites suivantes, en fonction du pH de surface (pH eau) :

8,1	Sols bruns calcaires et rendzines	7,8	Sols bruns calciques	7,1	Sols lessivés rubéfiés	5,4	Sols lessivés glossiques	4,1
-----	-----------------------------------	-----	----------------------	-----	------------------------	-----	--------------------------	-----

En ce qui concerne les deux ensembles de sols lessivés, on peut observer des variations liées au mode d'exploitation (Tableau 7). En effet, dans ce cas les horizons humifères des sols forestiers sont toujours plus acides que ceux des sols cultivés. Il n'en est pas de même lorsque le milieu contient du calcaire actif.

Sols	Cultivés	Forestiers
Sols bruns calcaires et rendzines	8,1	-
Sols bruns calciques	7,5	-
Sols lessivés rubéfiés	6,5	5,1
Sols lessivés glossiques	5,4	4,1

Tableau 7 - Valeurs moyennes du pH eau dans les horizons humifères de surface (2 à 5 sols pour chaque ensemble)

Au total, les différents ensembles définis se répartissent selon une séquence théorique d'acidification progressive.

3 - Calcaire total et actif

La teneur en CaCO_3 dans la terre fine des sols bruns calcaires et des rendzines est très variable (3 à 30 %) ; près de la moitié de ce calcaire est à l'état actif.

Les sols bruns calciques contiennent quelquefois un peu de calcaire dans la terre fine (0 à 2 % avec 0 à 0,9 % de calcaire actif). La présence de CaCO_3 dans la terre tamisée à 2 mm peut, dans ce cas, être liée à la fragmentation des cailloux calcaires du sol lors des façons culturales.

4 - Taux de saturation - Cations échangeables

Les chiffres donnés dans le tableau 8 correspondent à des moyennes. Parmi les cations occupant les sites d'échange, la proportion du magnésium, du potassium et du sodium ne varie pas de manière significative d'un ensemble à l'autre. Seul le taux de calcium diminue régulièrement des sols calcaires aux sols acides. Tout se passe comme si la désaturation correspondait à une élimination progressive du calcium échangeable.

Les sols de la Plaine restent saturés ou proches de la saturation. Par contre, ceux du Bocage (sols lessivés glossiques) sont fortement désaturés.

Types de sols	Ca*	Mg*	K*	Na*	S/T
Sols bruns calcaires et rendzines	91,4	4,9	2,6	1,1	saturé
Sols bruns calciques	88,2	8,0	2,8	1,0	saturé
Sols lessivés rubéfiés	78,4	6,7	2,5	1,0	88,6
Sols lessivés glossiques	15,3	8,8	2,5	1,3	27,9

* Exprimés en % de T

au 1/100 du 1/10

Tableau 8 - Garniture moyenne du complexe absorbant.
Taux de saturation (S/T)

C - ACTIVITE BIOLOGIQUE DES SOLS

La numération des germes sert de test pour comparer l'activité biologique globale des sols. Celle-ci a été faite selon la technique de Pochon et Tardieux (1962), pour les termes extrêmes et un terme moyen de la séquence. Les résultats donnés ci-dessous (Tableau 9) ont été obtenus à partir de prélèvements effectués en janvier 1979. Bien que le nombre de germes varie considérablement en fonction des saisons et de l'humidité du milieu, ces résultats permettent cependant de comparer les sols entre eux.

On remarque surtout que le nombre de germes totaux, important en milieu calcaire, diminue nettement avec l'acidification du milieu. Dans tous les cas, les bactéries sont dominantes mais l'importance des champignons augmente dans les sols lessivés ; elle est maximum dans les sols lessivés rubéfiés où se développe un mull acide.

Sols	Microflore* totale	Champignons*	$\frac{\text{Champignons}}{\text{microflore totale}} \%$
Rendzine modale Saint-Martin-de-Fraigneau	$3\,500 \cdot 10^6$	$400 \cdot 10^3$	0,07
Sol lessivé rubéfié Nalliers 1	$450 \cdot 10^6$	$800 \cdot 10^3$	0,17
Sol lessivé glossique Saint-Sornin 3	$300 \cdot 10^6$	$300 \cdot 10^3$	0,10

* Résultats exprimés en nombre de germes par g de terre séchée à 105°C

Tableau 9 - Détermination des populations microbiennes

D - CONCLUSION

D'après les caractères analytiques que nous venons de mettre en évidence, les sols de la Plaine et du Bas-Bocage vendéens peuvent se regrouper selon une séquence théorique d'acidification progressive. Cette acidification va de pair avec une désaturation de plus en plus poussée du complexe absorbant liée à l'élimination par lessivage d'une part de plus en plus grande du calcium échangeable.

Les horizons humifères de surface se développent dans le manteau limoneux qui couvre la région. On assiste cependant à une variation progressive de leur texture : d'une part, en milieu calcaire ou calcique, il y a enrichissement en argile (remontée du substratum, tronquage d'anciens sols lessivés) et, d'autre part, en milieu acide, il y a appauvrissement en colloïdes minéraux par lessivage. (Voir pour ce sol lessivé rubéfié).

Au total, on observe une évolution continue des conditions du milieu le long de la séquence.

DEUXIÈME PARTIE

=====

CARACTÉRISATION DE LA MATIÈRE ORGANIQUE DES SOLS :

NATURE, STRUCTURE, ÉVOLUTION EN FONCTION DU MILIEU

Si l'on fait abstraction des débris végétaux, il convient de distinguer, avec Schnitzer (1972), deux groupes de substances dans la matière organique du sol :

- des substances non humiques
- des substances humiques

Les substances non humiques sont généralement héritées des débris végétaux ou synthétisées par les microorganismes. Parmi celles-ci, on peut citer les glucides, les lipides, les protéines et les pigments. Ces divers composés sont souvent considérés comme facilement biodégradables et n'auraient qu'un temps de résidence dans le sol relativement court. En fait, leur taux de décomposition peut varier énormément en fonction de leur nature propre et d'un sol à l'autre.

Les substances humiques sont beaucoup plus stables et forment fréquemment l'essentiel de la matière organique du sol. C'est pour cette raison que l'on désigne souvent sous le terme d'"humus" au sens large l'ensemble de la matière organique (y compris d'ailleurs les débris végétaux). L'humus au sens strict est issu de l'évolution des résidus végétaux, animaux ou microbiens du sol. Ceux-ci subissent des transformations (humification) dont la nature et l'intensité varient avec le milieu. Dans certains cas, au contraire, les résidus organiques subissent une dégradation poussée avec libération de "précurseurs" solubles. Ces derniers peuvent d'ailleurs avoir d'autres origines et provenir de synthèses microbiennes. Les précurseurs peuvent donc différer nettement d'un milieu à l'autre (Duchaufour, 1973).

Dans le sol, ces divers précurseurs se transforment ultérieurement en composés humiques par polymérisation ou polycondensation et insolubilisation progressive.

Le mode d'humification, la diversité des précurseurs, l'intensité de la polymérisation et le degré d'insolubilisation, ce dernier dépendant lui-même de la nature des cations métalliques présents dans le sol, conduisent à des composés humiques très différents d'un milieu à l'autre.

Au total, la matière organique du sol présente de nombreuses possibilités de variations en fonction du milieu. A chacun des ensembles pédologiques que nous venons de définir pourrait donc correspondre un type de matière organique dont nous allons essayer de préciser la nature, la structure et l'évolution. De plus, à l'intérieur de certains ensembles, nous comparerons les humus développés sous culture et sous forêt.

CHAPITRE I : MATIERE ORGANIQUE TOTALE

Le taux de matière organique du sol traduit l'équilibre qui s'établit entre les apports de débris frais, d'une part, et les pertes par minéralisation, d'autre part.

Les apports ne sont généralement évalués que très approximativement. Sous forêt de feuillus en pays tempéré, on peut estimer que les débris végétaux apportés au sol sont de l'ordre de deux à quatre tonnes par hectare et par an (Dommergues, 1963). Sous culture céréalière (blé), Hénin et al. (1969) donnent des chiffres analogues. Si l'on se réfère à ces chiffres, les apports en matière organique fraîche seraient sensiblement les mêmes sous culture et sous forêt. Cependant, la répartition dans le sol diffère d'un milieu à l'autre.

Il n'en est pas de même de la minéralisation. En effet, sous culture, après incorporation au sol par les façons culturales, 60 à 70 % de la matière organique se minéralisent en deux ans (Duchaufour, 1970). Par contre, en milieu forestier, dans une ambiance ombragée et humide, la minéralisation est nettement ralentie.

Nous allons donc regrouper les résultats non seulement en fonction des ensembles pédologiques, mais également en fonction du mode d'exploitation.

A - CARBONE ORGANIQUE

Sous culture comme sous forêt, le taux de carbone organique passe par un minimum au niveau des sols lessivés rubéfiés, où la minéralisation devrait être intense, ce que nous vérifierons plus loin. A côté de cela, le taux de matière organique augmente en milieu calcaire où le carbonate de calcium réduit sa décomposition en l'enrobant partiellement (Chouliaras, 1976). Il augmente également à l'autre extrémité de la séquence, au niveau des sols lessivés glossiques. Dans ce milieu désaturé, les conditions sont défavorables à l'activité biologique. Il en résulte un freinage de la minéralisation du carbone organique.

Par ailleurs, si l'on compare, à l'intérieur de chaque ensemble pédologique, le milieu cultivé et le milieu forestier, on remarque que le taux de matière organique est toujours plus élevé sous forêt (Tableau 10). Si l'on calcule la différence pour chaque groupe de sol, on obtient les résultats suivants (exprimés en g de C organique pour 100 g de terre séchée à 105°C :

Sols calcaïques	Sols lessivés rubéfiés	Sols lessivés glossiques
1,44	0,56	4,34

On voit que l'écart s'accroît aux deux extrémités de la séquence, où la minéralisation est freinée. Il semble donc que l'intensité de ce freinage soit plus grande sous forêt que sous culture.

Sols	Culture			Forêt		
	C	N	C/N	C	N	C/N
Sols calcaires (rendzines et bruns calcaires)	2,38	0,31	7,7	-	-	-
Sols calciques "Terre de groie"	1,81	0,24	7,5	3,25*	0,37*	8,8*
Sols lessivés rubéfiés	1,47	0,16	9,2	2,03*	0,20*	10,1*
Sols lessivés glossiques	1,64	0,14	11,7	5,98	0,30	19,9

* Résultats ne correspondant pas à des moyennes, les forêts étant exceptionnelles sur ces types de sols

Tableau 10 - Variations moyennes du taux de carbone et d'azote et du rapport C/N.

B - AZOTE ORGANIQUE

1 - Azote total

L'évolution de l'azote peut être comparée à celle du carbone en suivant les variations du rapport C/N (Tableau 10). D'un type de sol à l'autre, on constate que celui-ci varie sensiblement comme l'acidification du milieu. A bas pH, la diminution de la proportion d'azote peut correspondre, au moins partiellement, à une diminution de sa fixation par les microorganismes. En effet, les *azotobacter* sont très sensibles à l'acidification du milieu et ne sont actifs qu'à des pH > 6 (Pochon et de Barjac, 1958). Les *clostridium* restent actifs à bas pH, mais leur rendement de fixation est bien inférieur à celui des *azotobacter* (Dommergues et Mangenot, 1970).

Par ailleurs, pour un même type de sol, le rapport C/N est toujours plus élevé sous forêt. Cela tient essentiellement à la nature des débris végétaux apportés au sol et à la vitesse de minéralisation du carbone organique.

2 - Etude des différentes formes d'azote

L'étude des différentes formes d'azote renseigne sur l'activité biologique du milieu et sur la stabilité de l'azote organique. En effet, les formes aminées sont plus facilement biodégradables que les formes hétérocycliques. L'importance de la fraction aminée renseigne indirectement sur le degré de polymérisation des substances humiques car, selon Jacquin (1963), cette forme devient minoritaire dans les molécules les plus condensées. ? (résultat)
 en

Les connaissances actuelles concernant les formes et la répartition de l'azote dans les composés humiques sont basées principalement sur l'étude des composés azotés libérés par hydrolyse acide. On détermine trois formes d'azote :

- l'azote non hydrolysable contenu dans le résidu d'hydrolyse ; une partie de celui-ci est engagée dans des hétérocycles ;
- l'azote hydrolysable contenu dans la solution ; une partie de celui-ci peut être déplacée par une base forte et distillée : c'est l'azote ammoniacal. Le reste, évalué par différence, correspond à l'azote aminé.

Les résultats du fractionnement de l'azote sont donnés dans le tableau 11.

Sols	N hydro- lisé	N ammo- niacal	N aminé	N non hydrolysé
Sols bruns calcaires et rendzines	81,9	23,2	58,7	18,1
Sols bruns calcaïques	86,3	26,6	59,7	13,7
Sols lessivés rubéfiés	84,2	27,4	56,8	21,5
Sols lessivés glossiques	78,5	19,8	58,6	21,5

Résultats exprimés en p. cent de l'azote total

Tableau 11 - Répartition des différentes formes d'azote dans les horizons A₁ ou Ap (Moyennes de 2 à 3 sols pour chaque ensemble)

D'un type de sol à l'autre, on constate une très grande homogénéité dans la répartition des fractions azotées. Dans tous les cas, la forme hydrolysable est largement dominante et représente environ 80 % de l'azote total ; parmi ces 80 %, 55 à 60 % correspondent à de l'azote aminé et le reste à de l'azote ammoniacal. Il apparaît donc que les formes les moins évoluées sont toujours nettement majoritaires, l'azote non hydrolysable, souvent considéré comme hétérocyclique, ne représentant que 15 à 20 % de l'azote total. Ces résultats peuvent donc être considérés comme un indice du faible degré d'évolution des composés humiques dans les différents ensembles de sols étudiés. (L'ordre max Sols bruns calcaïques sur sol engazonné)

Par ailleurs, nous avons recherché dans quelle mesure la répartition quantitative et relative des différentes formes d'azote est liée au taux de l'azote total. La dépendance des teneurs en azote aminé, ammoniacal et non hydrolysable à l'égard de la teneur en azote total apparaît de premier abord comme évidente puisque l'on a :

$$N \text{ total} = N \text{ ammoniacal} + N \text{ aminé} + N \text{ non hydrolysable}$$

Mais cela n'implique pas l'existence de relations étroites entre l'azote total et chaque forme d'azote. Pour préciser ce point, nous avons porté sur la figure 7 les teneurs en azote aminé en fonction des taux d'azote total.

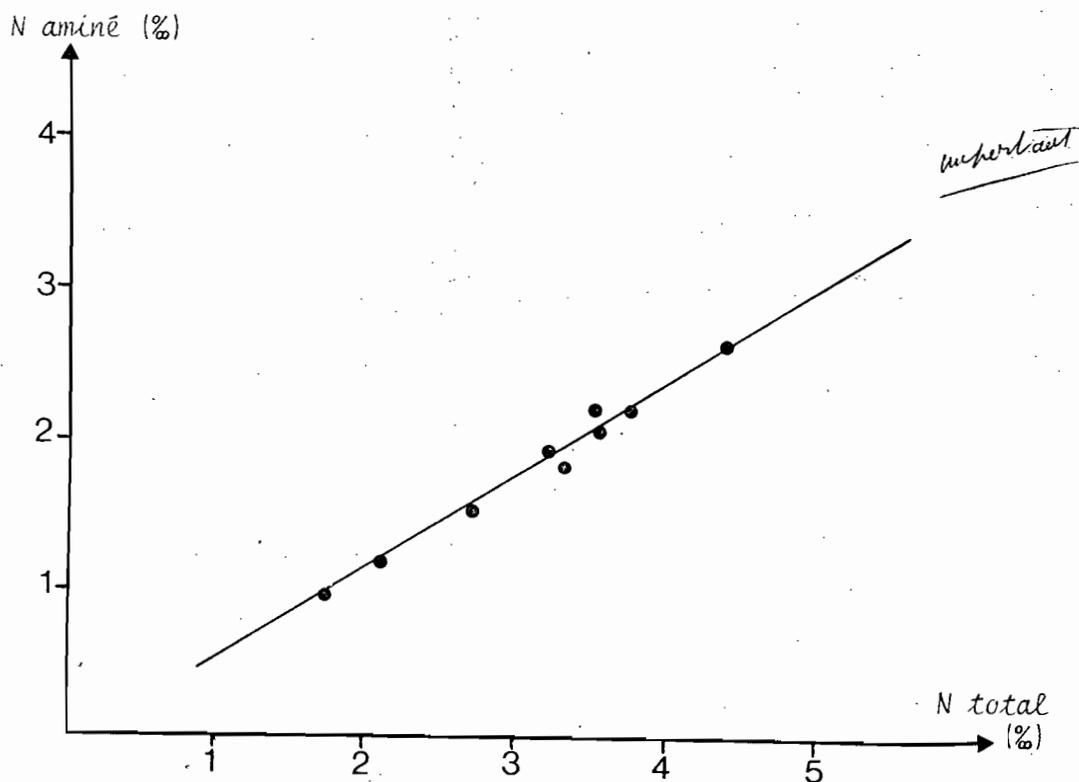


Figure 7 - Relations entre l'azote aminé et l'azote organique total (exprimés en % de sol).

Nous pouvons constater qu'il y a une relation linéaire entre les deux coordonnées. La proportion d'azote aminé est donc une fonction croissante de la teneur en azote total. Decau (1968) a obtenu la même relation à partir des divers types de sols, à l'exclusion des podzols. Au contraire, Cheng et van Hove (1964) notent des variations faibles et irrégulières de la proportion d'azote aminé avec la teneur en azote total. Finalement, comme le suggère Decau (1968), cette corrélation traduit peut-être l'existence d'une relation entre degré d'humification et répartition des formes de l'azote.

C - CONCLUSION

A la suite des observations de terrain et après avoir étudié successivement au niveau des horizons humifères :

- les propriétés physico-chimiques et biologiques
- la teneur en carbone, azote et les variations du rapport C/N

nous sommes maintenant en mesure de définir les divers types d'humus que l'on peut rencontrer le long de la séquence, en passant du milieu calcaire au milieu acide. :

Mull calcaire (Rendzines et sols bruns calcaires)	→	Mull calcique (Sols bruns calciques)	→	Mull acide (Sols lessivés rubéfiés)	→	Mull-moder à moder (Sols lessivés glossiques)
---	---	--	---	---	---	---

CHAPITRE II : SUBSTANCES HUMIQUES (au sens strict)

Nous les avons étudiées au niveau des horizons A_1 ou A_p qui contiennent l'essentiel de la matière organique du sol.

A - FRACTIONNEMENT

Le fractionnement des substances humiques a été effectué selon la méthode de Duchaufour et Jacquin (1966), puis Perraud et al. (1971). Nous pouvons ainsi isoler la matière organique libre peu transformée de la matière organique humifiée (matière organique liée). Au sein de la fraction humifiée, on peut distinguer :

- Les composés directement extractibles par les solutions alcalines : acides fulviques et acides humiques.
- Les composés indirectement extractibles qui ne sont solubilisables qu'après élimination du fer et destruction des argiles ; on les désigne quelquefois par le terme "d'humines solubilisables". Ce sont des acides fulviques et des acides humiques liés à la matière minérale (fer et argiles).
- Les humines non solubilisables qui restent dans le culot d'extraction. Elles restent associées à un peu de matière organique non transformée qui n'a été éliminée qu'incomplètement par la densimétrie. On élimine cette dernière par un traitement au bromure d'acétyle (Jambu, 1971). Ce produit est réputé solubiliser sélectivement les substances non humiques. Des essais effectués au laboratoire ont montré qu'il respecte parfaitement les acides humiques des sols calcaires, mais attaque partiellement les acides humiques des podzols, peut-être plus proches de la lignine. ^{avec}

1 - Résultats du fractionnement

A l'intérieur de chaque ensemble pédologique, le fractionnement a été effectué sur deux à trois sols. Les taux de carbone libre et lié et la composition de l'humus directement extractible sont donnés dans le tableau 13. La répartition des humines solubilisables (acides fulviques et humiques extractibles après élimination du fer et destruction des argiles) est portée dans le tableau 14. Nous avons regroupé dans le tableau 15 l'ensemble des formes extractibles. Le reste de l'humus correspond aux humines non solubilisables. Ces dernières restent dans les culots de centrifugation après solubilisation des formes extractibles. Remarquons cependant que dans les sols lessivés glossiques, l'humine non solubilisable se répartit entre les fractions libres et liées lors de la séparation densimétrique (Tableau 12).

Echantillons	Forme libre	Forme liée
Saint-Vincent-sur-Graon	17,5	37,6
Saint-Sornin 3	24,3	31,3

Résultats exprimés en p. cent du carbone de la fraction humifiée

Tableau 12 - Répartition des humines non solubilisables dans les sols lessivés glossiques.

Dans chaque ensemble pédologique, les résultats du fractionnement varient très peu d'un échantillon à l'autre. Le groupe des sols calcaires donne des résultats particulièrement homogènes bien que les analyses portent à la fois sur des rendzines et des sols bruns calcaires.

Dans la suite, nous allons surtout raisonner à partir de moyennes établies pour les différentes fractions de chaque ensemble.

2 - Evolution de l'humus en fonction du type de sol

Nous allons essayer de dégager l'influence du milieu sur la nature des substances humiques formées.

a - Taux de carbone lié et taux d'humification

Le taux de carbone lié reste constant des sols calcaires aux sols lessivés rubéfiés (Tableau 13). Il ne devrait pas en être ainsi car Chouliaras (1976) signale qu'il se forme un enrobage cristallin de carbonate de calcium autour des débris végétaux. Dans le cas présent, cet enrobage, s'il existe, ne peut être que très limité. Cela tient peut-être au fait que nous sommes ici en milieu cultivé alors que les observations de Chouliaras ont été faites sous forêt.

Dans les sols plus acides, où un mull-moder apparaît, le taux de carbone lié diminue nettement. En conséquence, une partie de la matière organique humifiée passe dans la fraction libre ; ce n'était pas le cas dans les mulls. La diminution du degré de liaison correspond à un ralentissement de l'activité biologique, une dégradation de la structure, une diminution du taux d'argile et de fer libre.

La figure 8 donne les variations du taux d'humification. Lorsque l'humus est de type mull, on peut assimiler le taux statique d'humification au taux de carbone lié. Nous avons cependant mis en évidence la présence, en faible quantité, de débris végétaux finement divisés dans les culots obtenus par densimétrie. Ceux-ci peuvent être éliminés par solubilisation dans le bromure d'acétyle. En présence d'un moder, on détermine le taux d'humification en ajoutant au carbone lié l'insoluble dans le bromure d'acétyle de la fraction libre.

Maclean

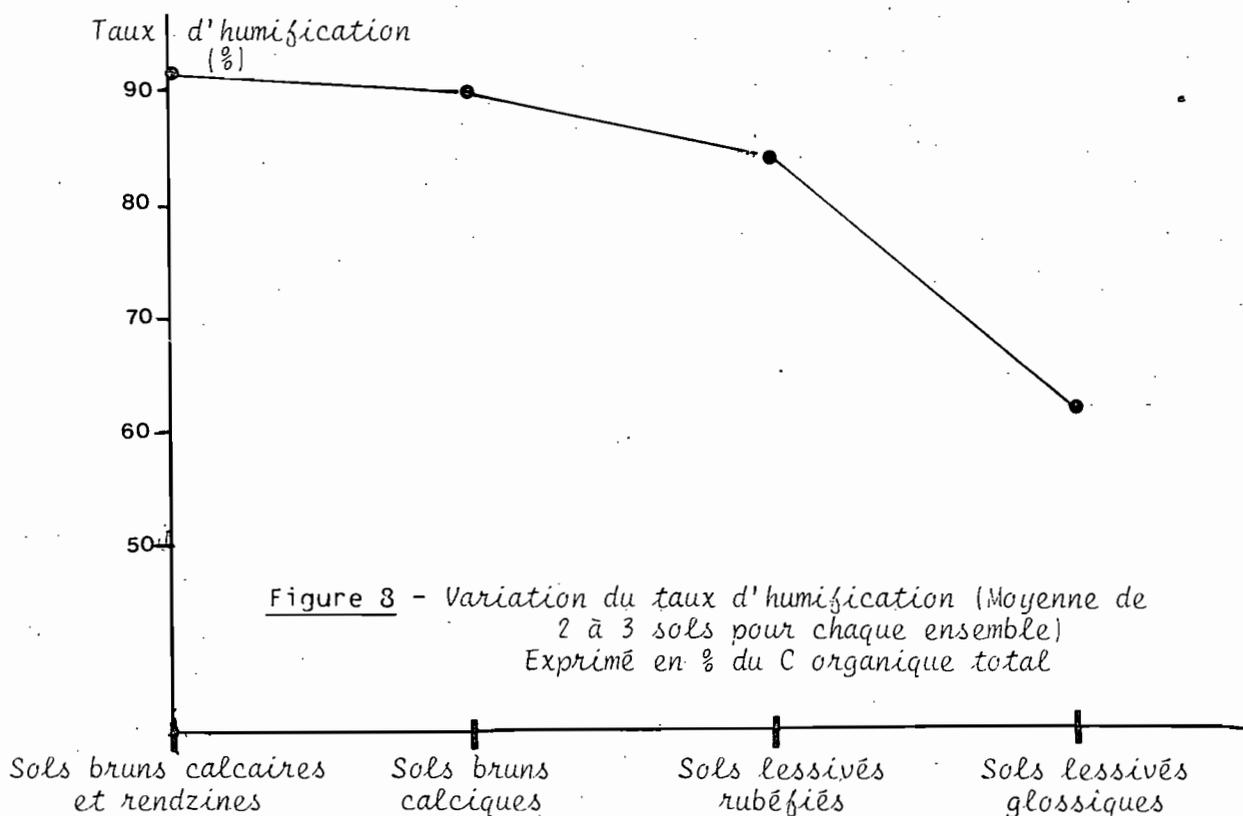
Echantillons	C total (1)	C libre (2)	C lié (2)	Humus directement soluble en milieu alcalin				
				Taux d'ex- traction (3)	AF (3)	AH (3)	AF/AH	$\frac{A.H. \text{ mob.}}{A.H. \text{ immob.}}$
Sols calcaires								
Rendzine modale : St-Martin-de-F.	2,4	7,7	92,2	33,2	23,8	9,4	2,5	0,3
Sol brun calcaire : Nalliers 5	2,1	8,7	91,2	31,3	21,0	10,1	2,1	0,5
Terre de groie mince : St-Etienne- de Brillouet	2,7	8,4	91,6	35,6	27,6	8,0	3,5	0,5
Sols bruns calciques								
Sainte-Gemme-la-Plaine 4	2,4	6,0	94,0	34,5	26,8	7,7	3,5	0,6
Sainte-Gemme-la-Plaine 3	3,4	14,1	85,8	38,8	28,1	10,7	2,6	0,6
Sols lessivés rubéfiés								
Nalliers 1	1,3	8,3	91,7	39,8	27,1	12,7	2,1	0,3
Sainte-Gemme-la-Plaine 1	2,1	20,0	79,9	46,5	32,3	14,2	2,3	0,3
Sols lessivés glossiques								
Saint-Vincent-sur-Graon	6,1	46,1	53,3	30,5	16,9	13,6	1,2	1,6
Saint-Sornin 3	8,3	60,3	39,7	31,6	17,2	14,4	1,2	2,1

(1) Résultats exprimés en p. cent de sol

(2) Résultats exprimés en p. cent du carbone organique total

(3) Résultats exprimés en p. cent du carbone de la fraction humifiée

Tableau 13 - Fractionnement densimétrique et solubilisation de l'humus directement extractible en milieu alcalin (horizons A₁ et Ap)



b - Substances humiques directement extractibles en milieu alcalin

Les teneurs en composés humiques directement extractibles par les solutions alcalines résultent de trois processus évolutifs : la biodégradation, le lessivage des composés organique soluble ou pseudosolubles et la polymérisation (Védy et Jacquin, 1972). Dans le cas présent, le taux d'extraction augmente des sols calcaires aux sols lessivés rubéfiés, puis diminue dans les sols lessivés glossiques (Figure 9). La diminution du taux d'extraction constatée aux deux extrémités de la séquence peut s'expliquer de la manière suivante :

- d'une part, en milieu saturé en calcium, celui-ci insolubilise une partie des substances humiques. Cette insolubilisation porte de préférence sur les plus grosses molécules telles que les acides humiques (Dupuis et Jambu, 1972). Cela se traduit par une augmentation du taux d'acides humiques extractibles lorsqu'on passe du milieu calcique au milieu lessivé.
- d'autre part, en milieu acide, il y a certainement une perte d'acides fulviques par lessivage. En effet, nous montrerons plus loin qu'au niveau des sols lessivés rubéfiés, il se produit déjà une légère migration d'acides fulviques qui s'accumulent en profondeur au niveau de l'horizon Béta.

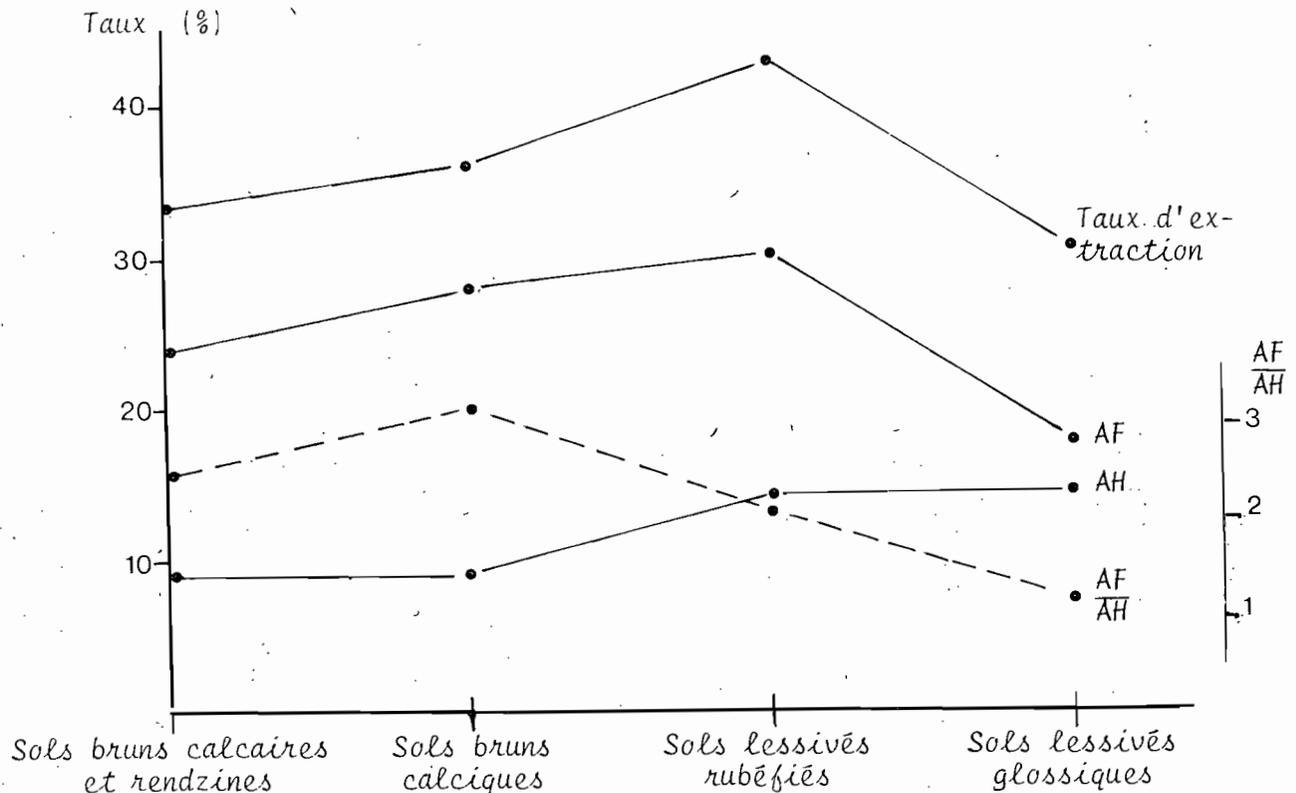
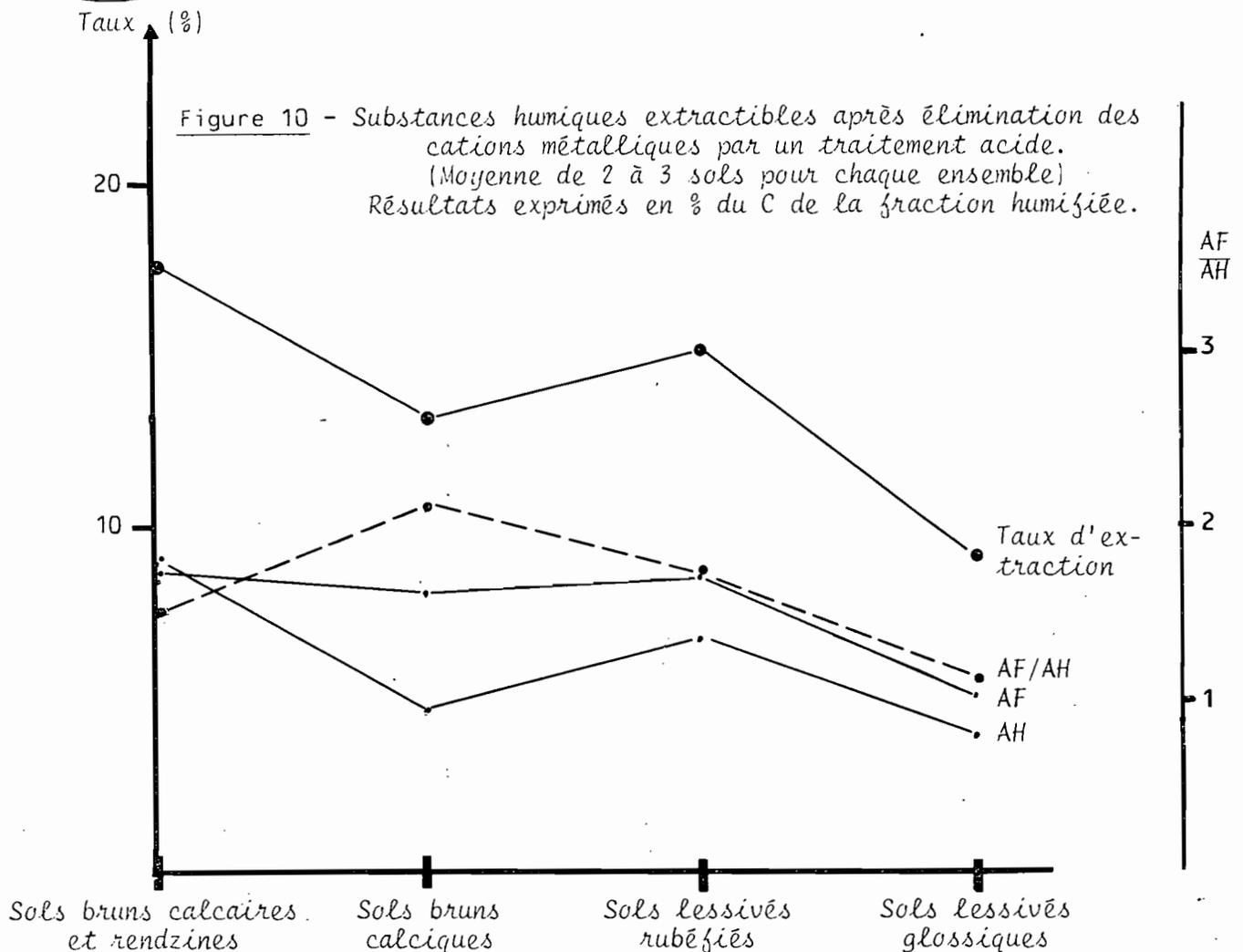


Figure 9 - Substances humiques directement extractibles par une solution alcaline (Moyenne de 2 à 3 sols pour chaque ensemble) Résultats exprimés en % du C de la fraction humifiée.

c - Humines solubilisables

D'autres substances humiques deviennent solubles en milieu alcalin après élimination des cations métalliques du sol par un traitement acide. Leur taux d'extraction varie parallèlement à celui des substances humiques directement extractibles (Figure 10). Cependant, on observe un maximum supplémentaire en milieu calcaire. Celui-ci correspond manifestement à la libération, par le traitement acide, des acides humiques insolubilisés par le calcium dont nous

venons de parler. Or, on désigne souvent la matière organique solubilisable après un traitement acide par le terme "humine liée au fer". Si une partie de celle-ci peut être insolubilisée par d'autres cations (Ca, Al), il serait préférable d'utiliser la dénomination plus générale d'"humine liée aux cations métalliques".



Après attaque fluorhydrique, on peut encore extraire des substances humiques du sol par une solution de soude : c'est l'"humine liée aux argiles". Le taux d'extraction reste faible : inférieur à 10% de l'humus total (Figure 11). Mais les argiles identifiées (kaolinite et illite dominantes) ne sont pas aptes à former un complexe argilo-humique très stable.

L'importance de cette fraction varie peu des sols calcaires aux sols lessivés rubéfiés, mais elle décroît nettement dans les sols lessivés glossiques. Cela tient, d'une part, à la nature de l'humus : lorsque celui-ci tend vers le moder, il ne se forme pas de complexe argilo-humique stable (Duchaufour, 1970) ; d'autre part, le fer libre qui sert de cation de liaison diminue nettement dans ces sols.

Dans tous les cas, l'ensemble des humines solubilisables (liée au fer + liée aux argiles) reste supérieur à celui trouvé par d'autres auteurs dans les mêmes types d'humus (Toutain, 1974 ; Chouliaras et al., 1975). La forme liée au fer est toujours dominante et représente approximativement le double de la forme liée aux argiles. Il est vrai qu'à l'exception des milieux les plus acides, les horizons humifères sont généralement bien pourvus en fer libre.

Echantillons	Humine liée au fer					Humine liée aux argiles				
	Taux * d'extraction	AF *	AH *	AF AH	AH mob. AH immob.	Taux * d'extraction	AF *	AH *	AF AH	AH mob. AH immob.
Sols calcaires										
Rendzine modale : St-Martin-de-F.	18,1	8,6	9,5	0,9	0,3	9,0	3,7	5,3	0,7	0,3
Sol brun calcaire : Nalliers 5	18,0	9,0	9,0	1,0	0,6	12,2	4,7	7,5	0,6	0,4
Terre de groie mince : St-Etienne-de-Brillouet	16,2	8,1	8,1	1,0	0,6	8,0	3,8	4,2	0,9	0,3

Sols bruns calciques										
Sainte-Gemme-la-Plaine 4	14,5	8,7	5,8	1,5	0,4	9,5	3,7	5,8	0,6	0,5
Sainte-Gemme-la-Plaine 3	11,1	7,4	3,7	2,0	0,4	8,2	4,2	4,0	1,0	0,6

Sols lessivés rubéfiés										
Nalliers 1	17,7	9,0	8,7	1,0	0,6	11,7	5,2	6,5	0,8	0,3
Sainte-Gemme-la-Plaine 1	12,6	7,9	4,7	1,7	0,5	5,0	2,6	2,4	1,1	0,3

Sols lessivés glossiques										
Saint-Vincent-sur-Graon	9,7	5,9	3,8	1,6	0,8	4,7	1,7	3,0	0,5	0,1
Saint Sornin 3	8,7	4,6	4,1	1,1	1,3	4,1	1,0	3,1	0,3	0,3

Résultats exprimés en p. cent du carbone de la fraction humifiée

Tableau 14 - Humines solubilisables (Horizons A₁ et Ap)

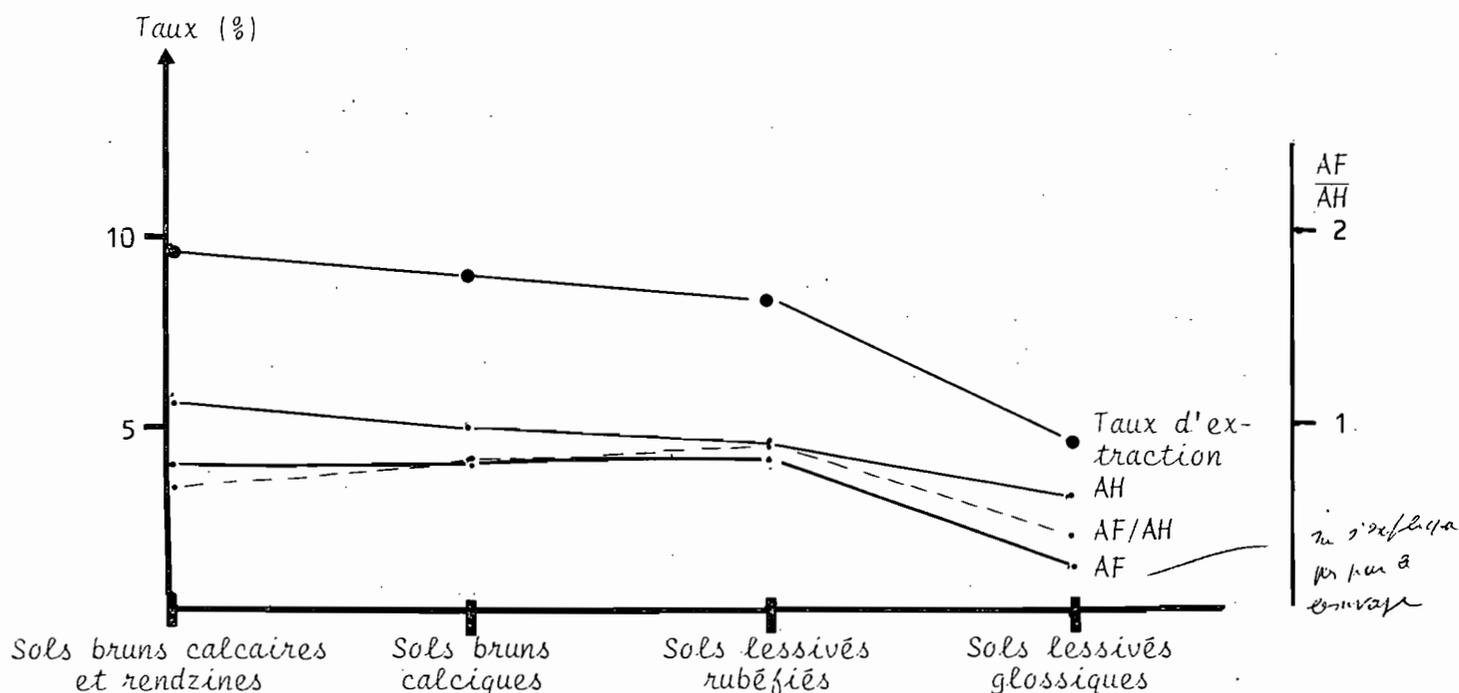


Figure 11 - Substances humiques extractibles après attaque des argiles par HF.
(Moyenne de 2 à 3 sols pour chaque ensemble)
Résultats exprimés en % du C de la fraction humifiée.

d - Total des formes extractibles (Figure 12, p. 32)

Si l'on regroupe l'ensemble des formes directement et indirectement extractibles, on obtient le taux global d'extraction (Tableau 15). Ce dernier varie avec le type d'humus : il atteint environ 60 % dans les mulls et seulement 45 % dans le cas du mull-moder. Par contre, lorsque seul le type de sol change, le taux global d'extraction reste constant. Seul le rapport entre les formes directement et indirectement extractibles varie. D'une extrémité à l'autre de la séquence, on obtient les chiffres suivants :

Sols bruns calcaires et rendzines	Sols bruns calciques	Sols lessivés rubéfiés	Sols lessivés glossiques
(1,2)	1,7	1,8	2,3

On peut en conclure que le degré de liaison entre les composés humiques et la matière minérale du sol décroît avec le pH du milieu.

Par ailleurs, si l'on examine les valeurs du rapport AF/AH de l'extrait global (Tableau 15), on remarque que, dans tous les sols, les acides fulviques dominent largement. Le taux de polymérisation des composés humiques serait donc assez faible. Signalons que nous sommes déjà arrivé à la même conclusion en étudiant la répartition des formes de l'azote organique.

Echantillons	Total des formes extractibles				Humines non solubili- sables*
	Taux d'ex- traction*	AF*	AH*	AF/AH	
Sols calcaires					
Rendzine modale : St-Martin-de-F.	60,3	36,1	24,2	1,5	39,6
Sols bruns calcaire : Nalliers 5	61,3	34,7	26,6	1,3	38,6
Terre de groie mince : St-Etienne de-Brillouet	59,8	39,5	20,3	1,9	40,0
Sols bruns calciques					
Sainte-Gemme-la-Plaine 4	58,5	39,2	19,3	2,0	41,3
Sainte-Gemme-la-Plaine 3	58,1	39,7	18,4	2,1	41,8
Sols lessivés rubéfiés					
Nalliers 1	69,1	41,4	27,9	1,5	30,7
Sainte-Gemme-la-Plaine 1	64,1	42,9	21,2	2,0	35,8
Sols lessivés glossiques					
Saint-Vincent-sur-Graon	44,9	24,5	20,4	1,2	55,1
Saint-Sornin 3	44,4	22,8	21,6	1,0	55,6

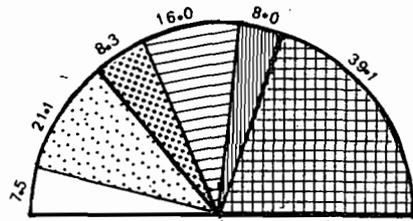
* Résultats exprimés en p. cent du carbone de la fraction humifiée

Tableau 15 - Somme des formes extractibles et humines non solubilisables
(Horizons A₁ et Ap)

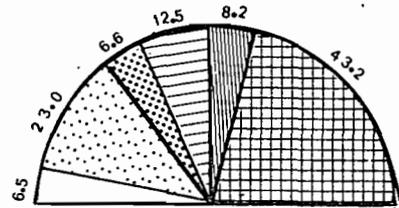
La faible polymérisation des composés humiques qui semble assez générale le long de la séquence relève de plusieurs causes. En milieu calcaire, la saturation des sites libres par le calcium limite la polycondensation des acides fulviques (Chouliaras, 1976). Par ailleurs, Duchaufour (1972) signale que, dans les sols développés sur limons, l'élimination progressive du calcium s'accompagne d'une dégradation de la structure, ce que nous avons pu mettre en évidence ici. Il en résulte, dans les terres les plus acides, une anaérobie temporaire que nous avons également constatée en Vendée. La détérioration physique du sol qui s'accompagne généralement d'une diminution de l'activité biologique favorise la persistance de molécules organiques relativement simples.

MULL CALCAIRE (St-Martin-de-Fraigneau)

MULL CALCIQUE (Ste-Gemme-la-Plaine 4)

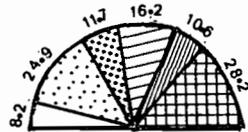


C org. total = 2400 mg/100 g sol



C org. total = 2400 mg/100 g sol

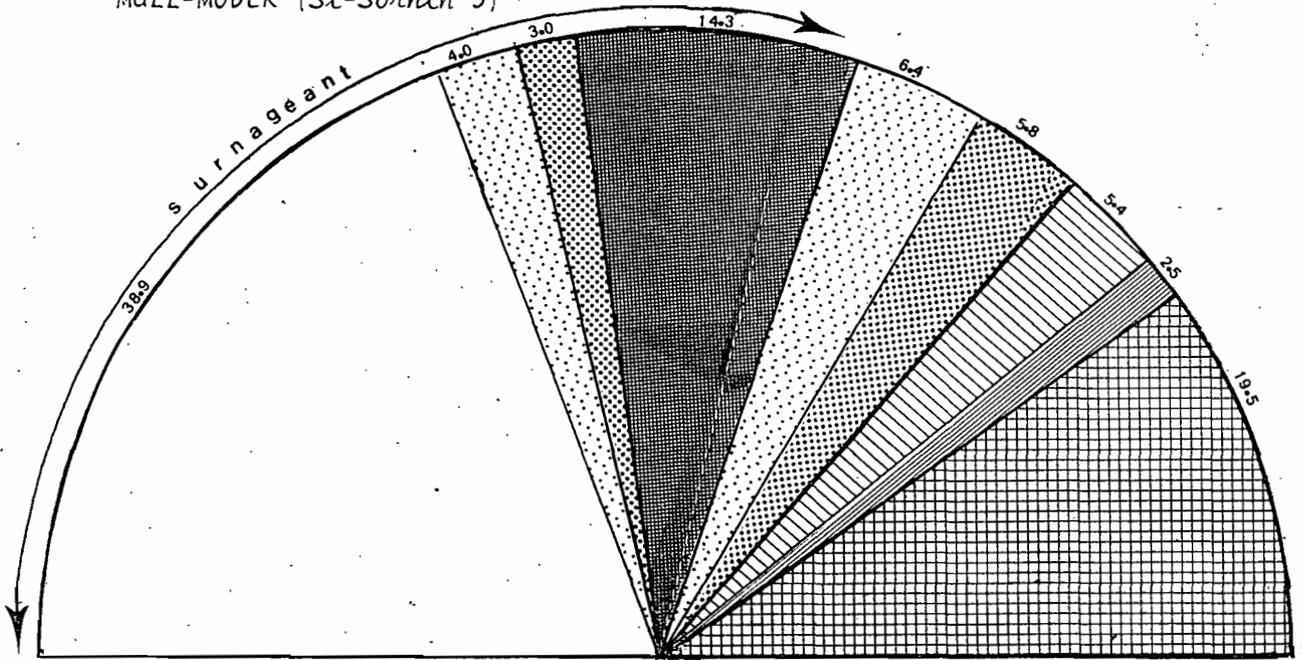
MULL ACIDE (Nalliers 1) 9



C org. total = 1300 mg/100 g sol

- Carbone libre
- Acides fulviques
- Acides humiques
- Humine liée au fer
- Humine liée aux argiles
- Humine non solubilisable libre
- Humine non solubilisable liée

MULL-MODER (St-Sornin 3)



Carbone organique total = 8300 mg/100 g sol

Figure 12 - Fractionnement des composés humiques des humus de la séquence pédologique étudiée (horizons Ap ou A₁).

Surface des demi-cercles proportionnelle à la quantité globale des composés humiques en-%.

e - Humine non solubilisable (Figure 13)

A côté des formes dispersables, il reste à examiner la fraction dite "humine non solubilisable". Selon Duchaufour (1973), celle-ci peut avoir au moins trois origines et correspondre :

- à un héritage (humine héritée), c'est-à-dire à de la lignine plus ou moins transformée ;
- à une néoformation microbienne (humine microbienne), c'est-à-dire à la synthèse de polysaccharides et d'amino-sucre qui se lient aux argiles ;
- à une insolubilisation par polymérisation des substances humiques (humine d'insolubilisation non extractible).

L'humine "héritée" n'est que peu ou pas liée à la matière minérale du sol ; on peut l'isoler par emploi simultané des ultrasons et de liqueurs denses (Védy, 1973). Elle passe alors dans la fraction légère (ou libre) avec des débris végétaux et des composés humiques. On la sépare de ces fractions par solubilisation des acides fulviques et humiques en milieu alcalin et solubilisation des débris végétaux par une attaque au bromure d'acétyle.

Nous n'avons pas identifié d'humine héritée dans les sols à mull, même en milieu calcaire. Par contre, dans les sols lessivés glossiques, où l'humus tend vers le moder, elle représente près de 40 % de l'humine non solubilisable (Figure 13). Cette humine "héritée" se caractérise par un rapport C/N élevé ; de plus, l'azote y est presque entièrement sous forme aminée (Tableau 16). Cette forme d'humine apparaît donc comme un composé très peu évolué, resté proche de la lignine.

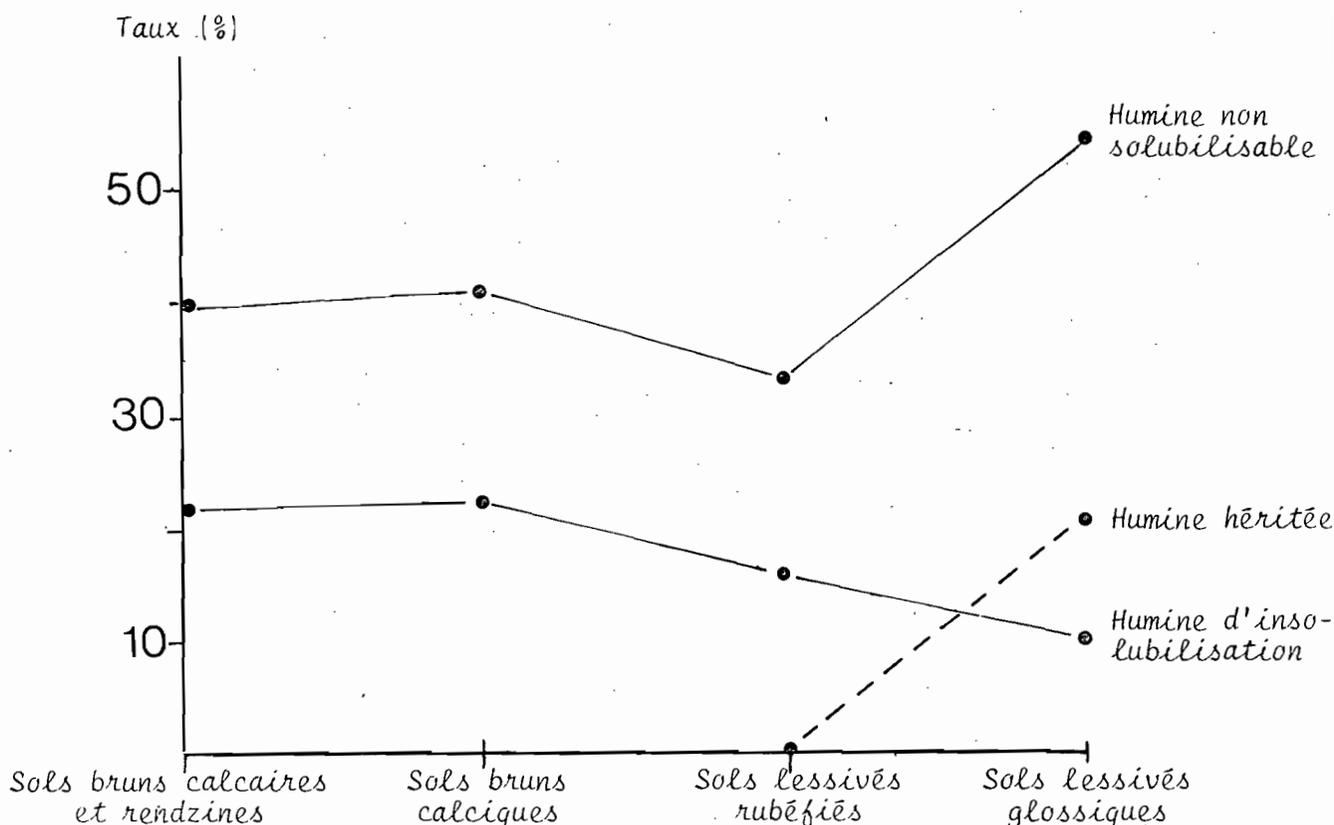


Figure 13 - Humines non solubilisables.

(Moyenne de 2 à 3 sols pour chaque ensemble)
Résultats exprimés en % du C de la fraction humifiée.

	Sols bruns calcaires & rendzines	Sols bruns calciques	Sols lessivés rubéfiés	Sols lessivés glossiques
Rapport C/N				
Fraction libre	-	-	-	16,8
Fraction liée	6,2	6,4	7,5	9,2
C polysaccharides (% C total de chaque fraction)				
Fraction libre	-	-	-	2,2
Fraction liée	1,8	1,8	1,9	2,8
N α aminé (% N total de chaque fraction)				
Fraction libre	-	-	-	89,4
Fraction liée	48,2	54,5	59,5	65,4

Moyenne des résultats obtenus à partir de 2 sols pour chaque ensemble.

Tableau 16 - Analyse des humines non solubilisables :

- libre (ou héritée)
- liée après attaque au bromure d'acétyle (ou humine d'insolubilisation).

La fraction liée de l'humine non solubilisable est contenue dans les culots obtenus après les extractions alcalines. Ce résidu d'extraction n'est certainement pas homogène et nous allons essayer d'en préciser les constituants. Tout d'abord, nous avons effectué un traitement par le bromure d'acétyle afin d'éliminer les débris végétaux qui n'auraient pas été entraînés dans la fraction légère. Mais ce traitement élimine également les polysaccharides assimilés par Duchaufour (1973) à l'humine microbienne. La fraction soluble (Tableau 17) représente selon les sols de 16 à 23 % de l'humus total. Dans ce pourcentage, il n'est pas possible de préciser la part qui revient aux humines microbiennes.

	Sols bruns calcaires & rendzines	Sols bruns calciques	Sols lessivés rubéfiés	Sols lessivés glossiques
Soluble bromure d'acétyle (Humine microbienne + matière organique non transformée)	17,0	18,4	16,7	23,6
Insoluble bromure d'acétyle (Humine d'insolubilisation)	22,4	23,1	16,5	10,8

Résultats exprimés en p. cent de C de la fraction humifiée
Moyenne de deux sols

Tableau 17 - Répartition de l'humine non solubilisable liée après attaque au bromure d'acétyle.

Ce que Duchaufour (1973) appelle "humine d'insolubilisation" doit correspondre ici à la fraction insoluble dans le bromure d'acétyle (Tableau 17). Dans la séquence, ce type d'humine, à peu près constant en milieu calcique, diminue nettement quand le pH décroît dans les sols lessivés. Ses variations ne sont peut être pas indépendantes de la teneur en fer libre du sol (Tableau 6). Par ailleurs, des polysaccharides et des protéines restent associés à ce composé. Nous les avons libérés par hydrolyse acide et dosés (Tableau 16). Enfin,

cette forme d'humine n'est pas exactement la même d'une extrémité à l'autre de la séquence et il semble que l'on soit en présence d'un composé de moins en moins évolué à mesure que le milieu s'acidifie. En effet, lorsque le pH s'abaisse, on constate une augmentation du rapport C/N et la proportion d'azote α -aminé devient de plus en plus importante.

Au total, l'évolution de la matière organique est très différente d'une extrémité à l'autre de la séquence. En milieu calcaire, la lignine se fractionne rapidement pour donner des composés humiques peu évolués et insolubilisés par le calcium alors qu'en milieu acide, la lignine évolue lentement en humine résiduelle ; dans ce cas, il apparaît peu de formes solubilisables.

3 - Evolution de l'humus en fonction du type de végétation

Pour deux ensembles de sols (sols bruns calciques et sols lessivés rubéfiés), nous avons pu comparer l'évolution de l'humus sous culture et sous forêt.

Le couvert forestier freine la dessiccation estivale du sol et provoque une baisse du pH dans l'horizon A₁. Nous avons observé que le taux de matière organique et le rapport C/N sont plus élevés sous forêt. L'évolution de l'humus n'est donc manifestement pas tout-à-fait la même dans les deux cas.

En effet, on remarque sur le tableau 18 que le taux de carbone lié (donc le degré de liaison entre la matière organique et la matière minérale) diminue en milieu forestier.

Sols	$\frac{C \text{ lié culture}}{C \text{ lié forêt}}$
	Sol brun calcique
Sol lessivé rubéfié	1,15

Tableau 18 - Rapport entre les résultats obtenus sous culture et sous forêt.

Globalement, le taux d'humus extractible ne varie pas avec le type de végétation. Par contre, l'équilibre entre les formes directement extractibles et les humines solubilisables est profondément modifié (Tableau 19).

Sols	$\frac{\text{Humus directement extractible}}{\text{Humines solubilisables}}$	
	Cult	For
Sol brun calcique	1,4	2,0
Sol lessivé rubéfié	1,7	2,6

Tableau 19 - Variation de l'équilibre entre l'humus directement extractible et les humines solubilisables en fonction du type de végétation (Horizons A₁ et Ap)

Sous forêt, la fraction directement extractible augmente aux dépens des humines solubilisables, ce qui traduit encore un moindre degré de liaison entre l'humus d'une part, les métaux (fer, calcium) et les argiles d'autre part.

Au total, le milieu forestier se caractérise par un ralentissement des phénomènes d'humification et la formation des composés humiques moins liés à la matière minérale.

B - CARACTERISATION DES SUBSTANCES HUMIQUES

Après avoir isolé et dosé les différentes fractions de l'humus, nous allons essayer de préciser la nature et la structure de chacune de ces fractions. Pour cela, nous utiliserons les moyens d'investigations suivants :

- L'adsorption sur charbon animal des acides fulviques suivie d'élutions successives par différents solvants. Cette méthode, mise au point par Forsyth (1947), a été reprise par Schlichting (1953.a & b), Stevenson (1960) et Anderson (1977).
- La filtration sur gels de dextrane qui permet de séparer les molécules humiques selon leur composition chimique et leur encombrement (Buttler et Ladd, 1969 ; Dell'Agnola et Ferrari, 1971 ; Bailly, 1976).
- La spectroscopie d'absorption infrarouge qui a déjà été utilisée par de nombreux auteurs pour caractériser et comparer les substances humiques des sols. Flaig et al. (1975) ont fait la synthèse des divers résultats déjà obtenus dans ce domaine.
- L'analyse thermique différentielle (ATD), déjà employée par Mitchell (1960), Schnitzer et Hoffman (1964), Wershaw et Bohner (1969), Dupuis et al. (1970), pour caractériser les composés humiques.
- La détermination du rapport Q 4/6 (Welte, 1955) qui renseigne sur le degré de polymérisation des substances humiques.

1 - Caractères généraux des spectres d'absorption infrarouge et des courbes ATD des substances humiques

Pour la clarté de l'exposé, nous allons dès maintenant donner l'attribution des différentes bandes susceptibles d'apparaître sur les spectres d'absorption infrarouge des substances humiques. Nous donnerons également l'interprétation des pics d'oxydation que l'on peut obtenir par combustion sous oxygène des composés humiques.

a - Spectres d'absorption infrarouge

Sur les spectres des substances humiques, l'attribution des bandes est difficile car les préparations correspondent toujours à des mélanges de molécules complexes contenant divers types de liaisons et de groupements fonctionnels. Nous allons faire un inventaire des bandes d'absorption les plus caractéristiques et nous donnerons leur attribution d'après Khan (1971), Stevenson et Goh (1971), Bellamy (1958, 1968) et Cross (1967).

Entre 3400 et 3100 cm^{-1} , on note une forte absorption due principalement aux vibrations de valence d'hydroxyles alcooliques et phénoliques plus ou moins liés. Une autre bande, faible et large, étalée entre 2680 et 2350 cm^{-1} peut être attribuée aux hydroxyles fortement liés des acides carboxyliques.

Les variations de valence C-H donnent lieu à deux bandes, vers 2920 et 2850 cm^{-1} pour les groupements CH_2 , 2960 et 2870 cm^{-1} pour les groupements CH_3 . Les vibrations de déformation correspondantes absorbent respectivement à 1460 et 1375 cm^{-1} .

Les préparations de substances humiques étant étudiées à l'état d'acides libres, on observe une forte bande à 1720 cm^{-1} attribuée à la vibration de valence de groupement C=O des acides carboxyliques ; on relève égale-

ment une large bande, maximum à 1210 cm^{-1} , due aux vibrations de valence C-O des acides carboxyliques et des phénols (ou des esters).

Les absorptions apparaissant à 1610 et 1510 cm^{-1} sont liées aux vibrations de noyaux aromatiques (Theng et Posner, 1967). Les grandes caractéristiques des liaisons C-H aromatiques à 870 , 825 et 730 cm^{-1} s'observent rarement sur les spectres des composés humiques.

D'une manière générale, les substances humiques apparaissent donc comme des acides phénols dont le squelette est formé de noyaux aromatiques portant des chaînes aliphatiques. Sur ce squelette, d'autres molécules liées à l'activité biologique du sol peuvent se fixer, notamment des protéines et des polysaccharides.

L'existence de protéines est attestée par la présence d'une large bande entre 3400 et 3100 cm^{-1} , due aux vibrations de valence des groupements NH plus ou moins liés. On observe également des absorptions plus caractéristiques propres aux fonctions amides des peptides à $1635-1660$ et 1540 cm^{-1} .

Les spectres infrarouges des polysaccharides liés aux substances humiques ont été étudiés par Mortensen (1960), Clark et Tan (1969). Les absorptions les plus fortes et les plus caractéristiques correspondent aux vibrations C-C, C-OH et C-O-C, entre 1175 et 950 cm^{-1} (maximum à 1030 cm^{-1}). L'identification des polysaccharides est difficile en présence d'argiles qui donnent des bandes dans la même région du spectre (bande Si-O des silicates à 1050 cm^{-1}).

Par ailleurs, on peut identifier sur les spectres, des structures résiduelles correspondant à la lignine plus ou moins dégradée. Celle-ci se caractérise par des bandes assez intenses et même quelquefois fortes à 2920 , 1510 et 1460 cm^{-1} , souvent accompagnées de bandes plus discrètes à 2960 et 1375 cm^{-1} . Cela traduit une structure peu condensée avec de nombreuses chaînes fixées sur des noyaux aromatiques.

Au total, les substances humiques peuvent se différencier les unes des autres par le rapport entre la fraction aliphatique et la fraction aromatique du squelette par leur teneur en fonctions acides, par la présence en quantité variable de protéines, de polysaccharides ou des résidus de lignine.

b - Courbes ATD

Les courbes ATD sous oxygène des substances humiques à l'état acide présentent essentiellement deux accidents exothermiques (Dupuis et al., 1970). Le premier débute vers 220°C et culmine vers $300-320^\circ\text{C}$; il peut être attribué à l'oxydation et au départ de la fraction aliphatique et des groupements fonctionnels des molécules humiques. Le second pic se développe à partir de 350°C et culmine vers $430-440^\circ\text{C}$. Il correspond à la combustion du squelette carboné et des derniers groupements fonctionnels.

Les substances associées à l'humus, telles que les polysaccharides, les protéines ou la lignine, s'oxydent entièrement au cours de la première étape. Cependant, lorsque la lignine est profondément altérée et qu'elle a perdu ses chaînes aliphatiques et ses groupements fonctionnels (phénols, méthoxyles), elle ne s'oxyde qu'à 400°C (Dupuis et al., 1975).

En résumé, l'ATD renseigne sur le degré d'aromaticité des substances humiques. Elle permet de déceler, à côté des composés humiques, la présence de débris végétaux plus ou moins transformés.

2 - Nature et structure des divers composés humiques isolés

Nous allons essayer de mettre en évidence les variations de composition et de structure des substances humiques liées :

- au type de fraction
- au type de sol
- au type de végétation

a - Acides fulviques

Nous avons étudié les acides fulviques extraits de sols préalablement décalcifiés, par l'hydroxyde de sodium 0,1 N. Nos observations portent essentiellement sur les termes extrêmes et sur un terme moyen de la séquence pédo-
X
logique.

L'examen direct des spectres infrarouges permet d'observer les mêmes bandes pour les acides fulviques des divers sols (Figure 14). On identifie les bandes caractéristiques des polysaccharides et des protéines. Nous avons établi des rapports entre les densités optiques mesurées aux fréquences caractéristiques, pour suivre les variations de la proportion de ces substances associées. Le rapport D.O. 1660 (bande amide I)/D.O. 1510 (bande C=C aromatiques) varie de la manière suivante :

Sols bruns calcaires et rendzines	Sols bruns calciques	Sols lessivés rubéfiés	Sols lessivés glossiques
1,8	1,7	1,6	1,5

La proportion de protéines associées aux acides fulviques décroît donc comme le pH et l'activité biologique du milieu. Pour un type de sol donné, elle ne varie pas avec le mode d'utilisation. Par ailleurs, le taux de polysaccharides associés varie parallèlement à celui des protéines. De plus, il est toujours plus faible sous forêt que sous culture (Tableau 20).

Sols	Mode d'exploitation	
	Culture	Forêt
Sols bruns calcaires et rendzines	3,2*	-
Sols bruns calciques	3,1	2,8
Sols lessivés rubéfiés	3,0	2,7
Sols lessivés glossiques	-	2,7*

* Moyenne des résultats obtenus à partir de deux sols

Tableau 20 - Rapport entre densité optiques mesurées sur le spectre infrarouge des acides fulviques : D.O. 1060/D.O. 1510 (C=O et C-OH des polysaccharides/C=C aromatiques)

Les spectres infrarouges peuvent également renseigner sur l'acidité carboxylique des acides fulviques. Pour préciser les variations de cette acidité, nous avons établi le rapport D.O. 1720/D.O. 1510 (C=O des acides/C=C aromatiques) ; ce rapport varie de la manière suivante :

Sols bruns calcaires et rendzines	Sols bruns calciques	Sols lessivés rubéfiés	Sols lessivés glossiques
1,9	1,9	1,6	1,9

Tous les lots d'acides fulviques ont donc la même acidité carboxylique, à l'exception de ceux issus des sols lessivés rubéfiés qui ont nettement moins de groupements carboxyliques libres. En conséquence, les acides fulviques de ces derniers sols auront une capacité d'échange cationique réduite et une agressivité vis-à-vis de la matière minérale du sol plus faible.

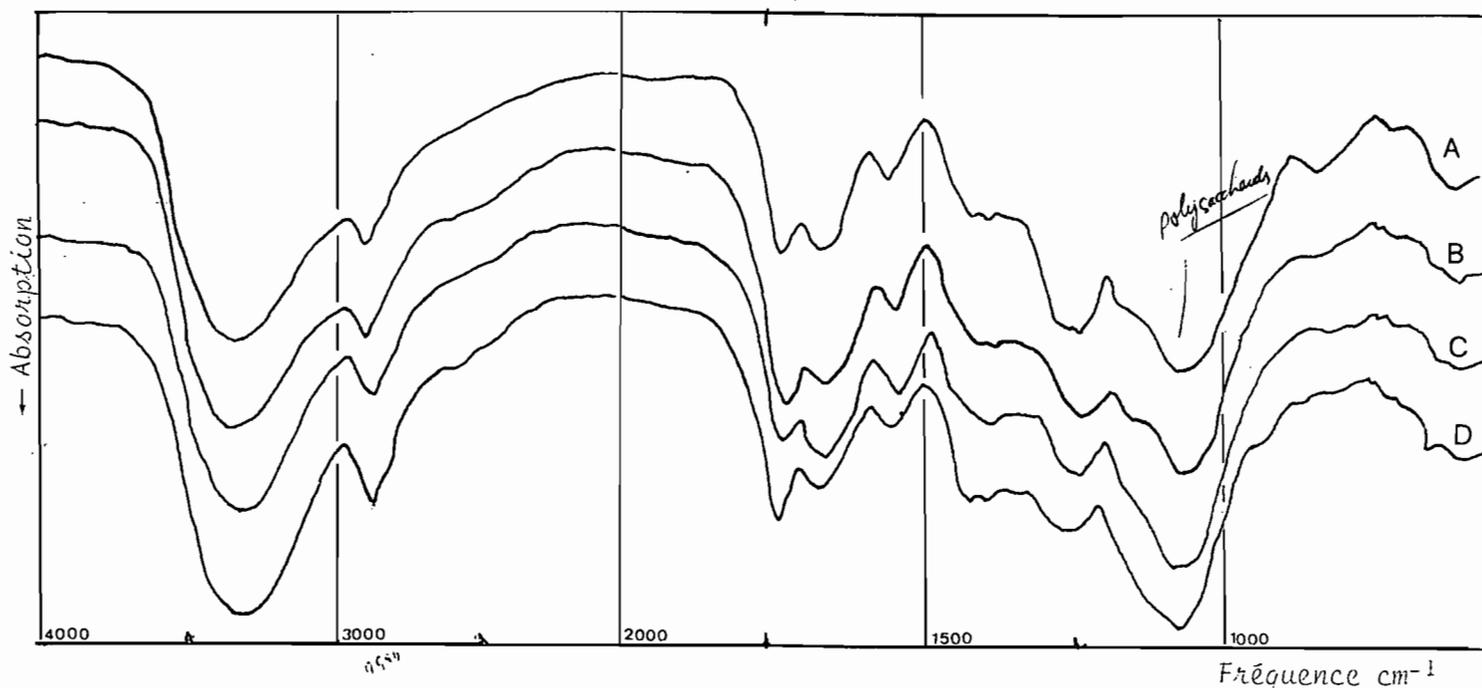


Figure 14 - Spectres d'absorption infrarouge d'acides fulviques extraits par le pyrophosphate de sodium 0,1 M à partir des horizons A₁ ou Ap.

- A : Rendzine modale (Saint-Martin-de-Fraigneau)
- B : Sol brun calcique (Sainte-Gemme-la-Plaine 3)
- C : Sol lessivé rubéfié (Ste-Gemme-la-Plaine 1)
- D : Sol lessivé glossique (Saint-Sornin 3).

Par ailleurs, nous avons entrepris le fractionnement des acides fulviques selon la méthode de Forsyth (1947) sur les termes extrêmes et un terme moyen de la séquence. Ce fractionnement montre que les acides fulviques (au sens large) sont très hétérogènes. On peut les séparer en quatre fractions (Tableau 21) de nature différente (Anderson, 1977).

Types de sols	Fractions	Fractions			
		A	B	C	D
Sol brun calcaire	Nalliers 5	0,3	10,3	0,1	89,3
Sol Lessivé rubéfié	Nalliers 1	1,9	19,4	1,9	76,8
Sol lessivé glossique	St-Vincent-sur-Graon	7,3	9,2	5,8	77,6

Résultats exprimés en p. cent du carbone total des acides fulviques

Tableau 21 - Fractionnement des acides fulviques selon la méthode de Forsyth.

- La fraction A est constituée de substances simples : acides organiques, acides aminés, sucres, purines. Son importance varie d'un sol à l'autre en fonction du pH. Dans les mulls, la production de composés organiques simples est très importante (Bruckert, 1970). Nos résultats montrent que ceux-ci sont cependant très peu représentés car ils sont rapidement biodégradés ou insolubilisés par les cations échangeables et intégrés aux composés humiques. Dans le

mull-moder, au contraire, le taux de composés simples dosés est plus important bien que leur production soit réduite (Duchaufour, 1975). Mais ceux-ci persistent dans le sol où leur polymérisation est limitée.

- La fraction B est constituée de glucosides phénoliques, ces phénols pouvant être également associés à des acides aminés. On considère que les produits isolés dans cette fraction résultent de la dégradation de la lignine et correspondent à des précurseurs des acides humiques (Anderson, 1977). Selon Duchaufour (1975), c'est dans les mulls acides que la dégradation de la lignine est à la fois la plus rapide et la plus complète car, dans les mulls calcaires comme dans le moder, la lignine reste insoluble ou partiellement insolubilisée. Il est donc normal que le taux de composés phénoliques soit deux fois plus élevé dans le terme moyen de la séquence (mull acide) que dans les termes extrêmes. Par ailleurs, la présence à côté des glucosides, de composés aminés n'a été mise en évidence, par un test à la ninhydrine, que dans le mull acide du sol lessivé rubéfié.

- La fraction C contient essentiellement des polysaccharides libres. On peut y trouver également des résidus d'acides uroniques et des composés amidiques. Ces derniers, très faiblement représentés dans les horizons superficiels, augmentent avec la profondeur. A la lecture du tableau 21, on remarque que cette fraction croît lorsque le pH du sol diminue. Elle est bien représentée dans le mull-moder où, comme nous le verrons plus loin, les polysaccharides libres peuvent représenter 15 à 30 % des polysaccharides totaux du sol.

- La fraction D correspond aux acides fulviques au sens strict. Ceux ci représentent de 75 à 90 % des acides fulviques au sens large.

Au total, à côté des acides fulviques proprement-dits, on trouve des substances dont la proportion et l'état varient selon les conditions du milieu. C'est ainsi, par exemple, que les polysaccharides sont de moins en moins abondants mais de plus en plus libres à mesure que le milieu s'acidifie.

b - Acides humiques

Parmi les acides humiques, nous avons distingué et étudié les fractions suivantes :

- Fraction I : Acides humiques extraits par le pyrophosphate de sodium 0,1 M.
- Fraction II : Acides humiques extraits par l'hydroxyde de sodium 0,1 N.
- Fraction III : Acides humiques liés au fer extraits par la soude après élimination du fer.
- Fraction IV : Acides humiques liés aux argiles extraits par la soude après destruction des argiles.

Les fractions III et IV proviennent des extraits désignés sous le nom d'humines solubilisables.

- Mise en évidence des substances associées aux acides humiques

Sur les spectres infrarouges des substances non hydrolysées par HCL 6 N (Figure 15), on décèle la présence des bandes propres aux liaisons pep-

tides. Celles-ci sont toujours visibles et fortes sur tous les spectres. Pour la fraction I, le rapport D.O. 1660/D.O. 1510 (bande amide I/bande C=C aromatique) diminue légèrement du milieu neutre au milieu acide et passe de 1,4 à 1,3. Ces variations vont donc dans le même sens que celles déjà observées pour les acides fulviques. Dans les autres fractions, le rapport reste sensiblement constant et voisin de 1,3 pour tous les sols.

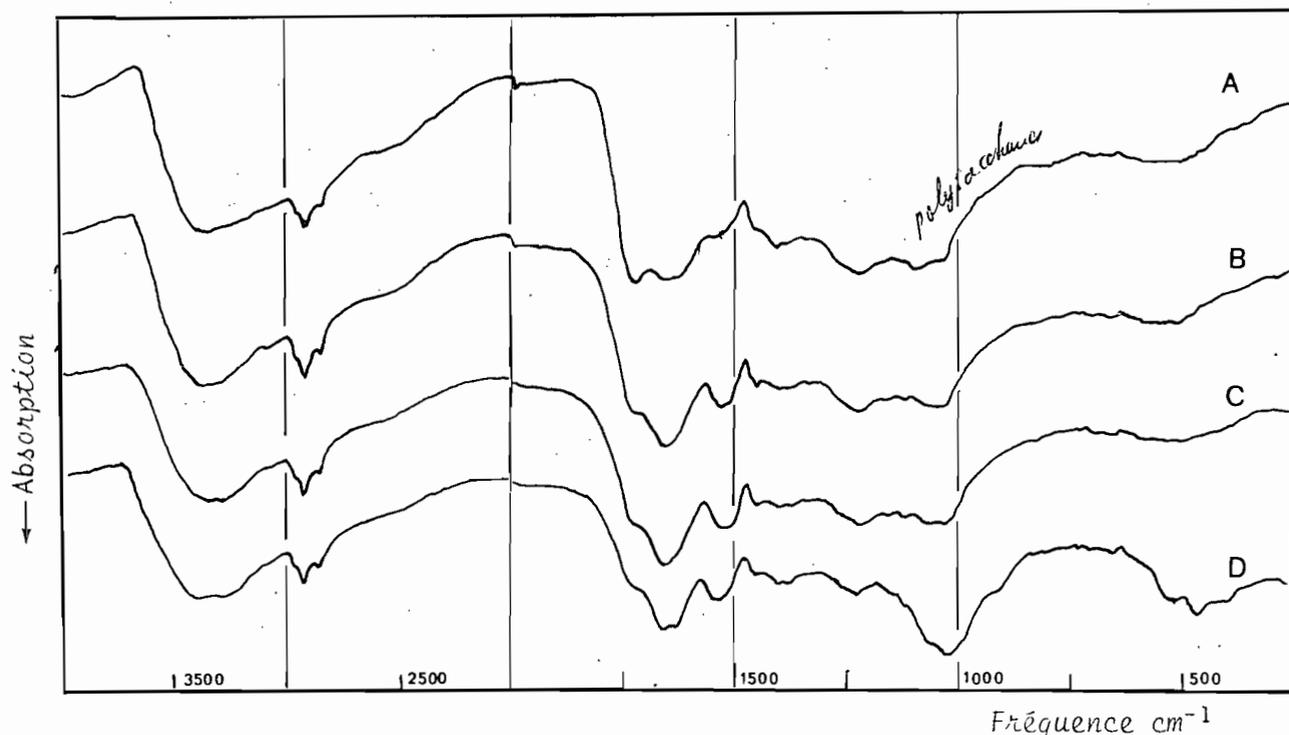


Figure 15 - Spectres d'absorption infrarouge des différentes fractions d'acides humiques extraits d'un même horizon superficiel : rendzine modale de St-Martin-de-Fraigneau (Produits non hydrolysés).

- A : Fraction I (extrait pyrophosphate)
- B : Fraction II (extrait soude)
- C : Fraction III (extrait soude après élimination du fer)
- D : Fraction IV (extrait soude après élimination des argiles).

Des bandes apparaissent également dans la zone d'absorption des polysaccharides. Celles-ci restent faibles ou inexistantes, ce qui n'était pas le cas pour les acides fulviques. De plus, les acides humiques sont quelquefois accompagnés d'argiles qui absorbent dans la même zone que les polysaccharides. Pour vérifier l'existence de ceux-ci, nous avons hydrolysé les acides humiques (HCl 6 N) et enregistré après dessiccation les spectres infrarouges de la fraction hydrolysable (Figure 16). A partir de ces spectres, il n'est pas possible d'identifier de manière sûre la présence de polysaccharides ; on y voit essentiellement les bandes caractéristiques des acides aminés libres ou salifiés selon les fractions.

Par ailleurs, comme l'ont déjà montré Posner *et al.* (1968), les différentes fractions d'acides humiques extraites par la soude (II, III et IV) ressemblent beaucoup plus à la lignine que les acides humiques solubilisés par le pyrophosphate de sodium. Cela est surtout net sur les spectres d'acides humiques hydrolysés (Figure 17). Il est possible que l'hydroxyde de sodium attaque la lignine lors des extractions ou solubilise mieux que le pyrophosphate de sodium les complexes ligno-protéiques du sol. La présence de complexes ligno-protéiques à côté d'acides humiques est tout-à-fait possible puisque, selon Waksman et Iyer (1933), ces complexes possèdent des propriétés semblables à celles des acides humiques.

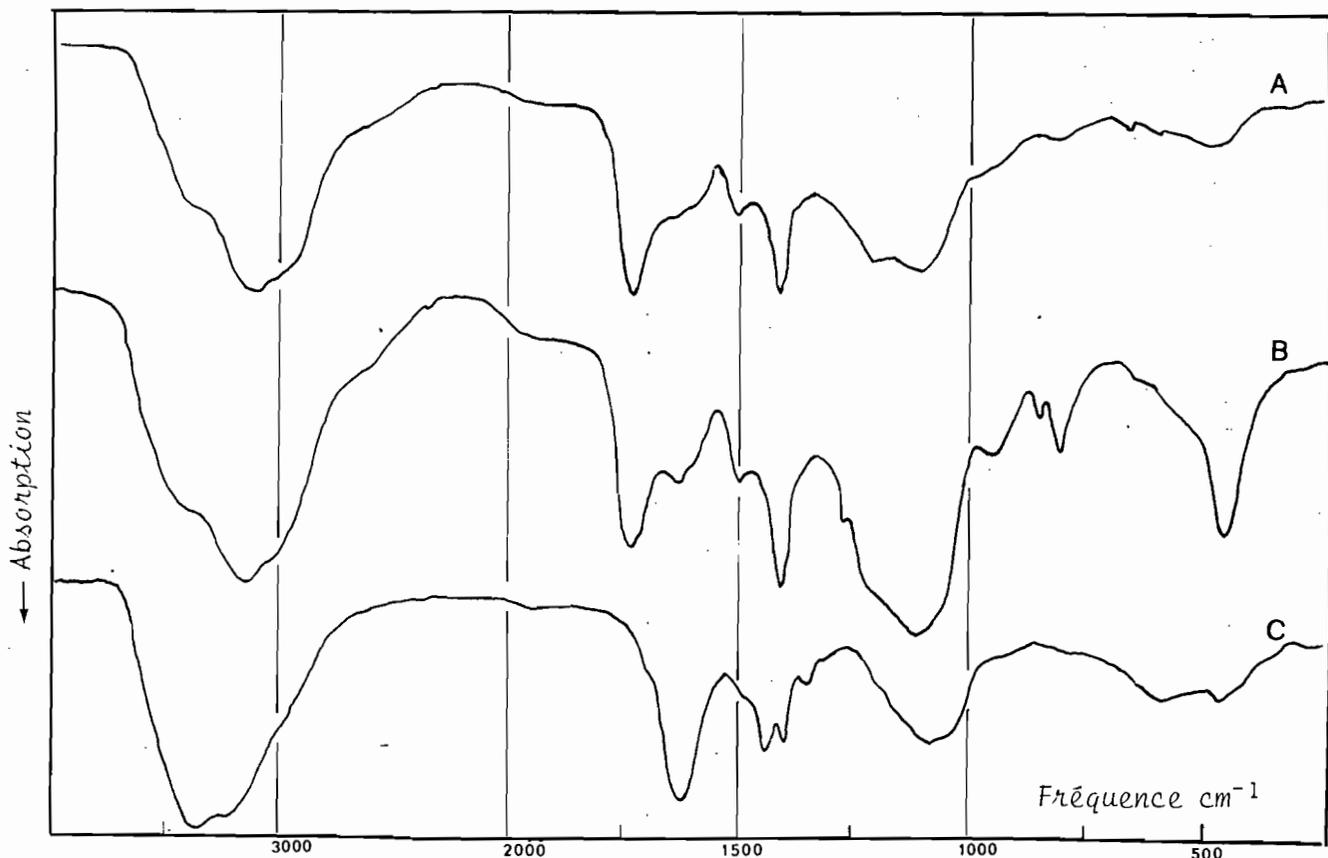


Figure 16 - Spectres d'absorption infrarouge de la fraction soluble dans HCl 6 N après hydrolyse des différentes fractions d'acides humiques.

- A : Sol brun calcique : Ste-Gemme-la-Plaine 4
Fraction I : Amino-acides libres dominants.
- B : Rendzine modale : St-Martin-de-Fraingean
Fraction II : Mélange d'acides aminés libres et salifiés.
- C : Sol brun calcaire : Nalliers 5 Fraction IV : Amino-acides salifiés.

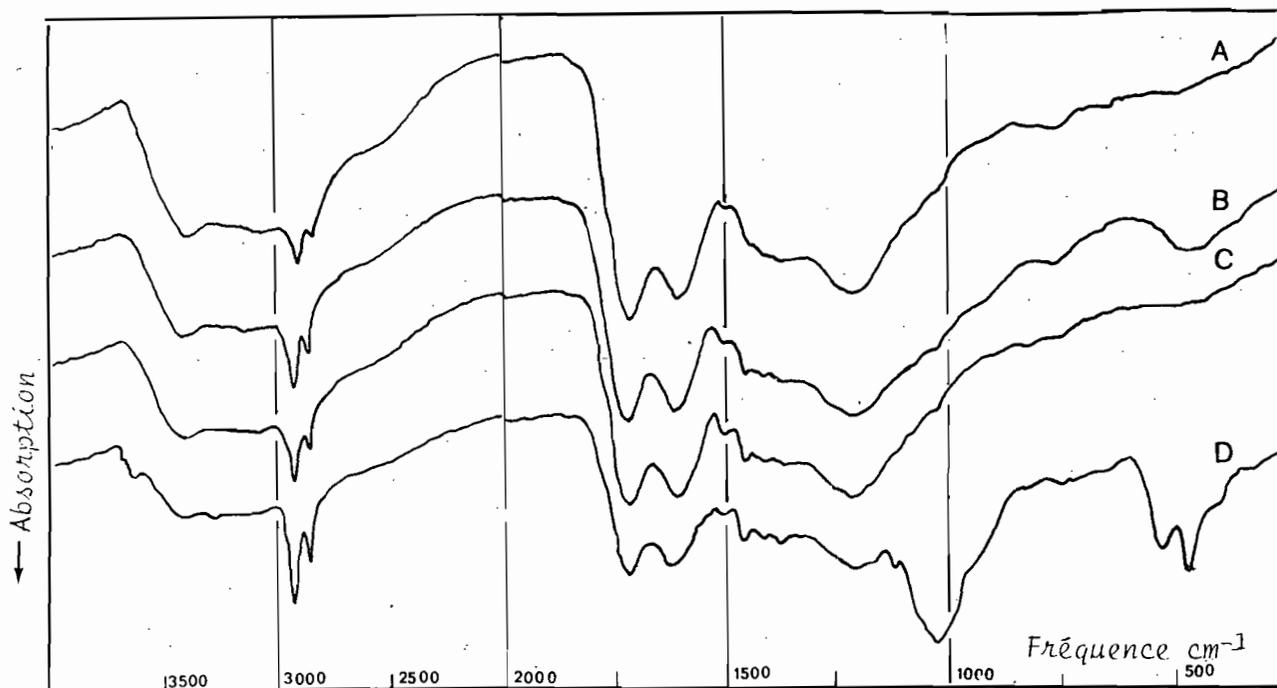


Figure 17 - Spectres d'absorption infrarouge des différentes fractions des acides humiques extraits d'un même horizon superficiel (rendzine modale de St-Martin-de-Fraingean) et hydrolysés par HCl 6 N.

- A : Fraction I (extrait pyrophosphate)
- B : Fraction II (extrait soude)
- C : Fraction III (extrait soude après élimination du fer)
- D : Fraction IV (extrait soude après élimination des argiles)

- Variation de la structure des acides humiques en fonction du type de sol

Le rapport D.O. 2920/D.O. 1510 (C-H aliphatiques/C=C aromatiques) traduit l'importance des chaînes aliphatiques par rapport au noyau aromatique (Tableau 22). Pour la fraction I, ce rapport varie nettement en fonction du milieu : il est plus élevé dans les sols saturés que dans les sols lessivés. Les acides humiques de cette fraction seraient donc moins polymérisés en milieu calcaire qu'en milieu acide. Ces différences peuvent être liées à l'action des ions calcium qui, selon Duchaufour et Jacquin (1975), inhibent la polycondensation des substances humiques en saturant les sites acides.

Pour les fractions II, III et IV, au niveau des mulls, on n'observe pas de variation aussi nette du degré d'aliphaticité en fonction du type de sol ; mais lorsqu'on passe au moder, les fractions III et IV deviennent beaucoup plus aliphatiques. Ces observations sont à rapprocher de celles faites par Bilong (1979) qui constate qu'en milieu acide et légèrement podzolisant, les humines solubilisables (liées au fer et aux argiles) sont très proches de la lignine.

	Sols bruns calcaires & rendzines	Sols bruns calcaïques	Sols lessivés rubéfiés	Sols lessivés glossiques
<u>Acides humiques non hydrolysés</u>				
- Directement extractibles				
. Fraction I extraits pyro.	1,10	1,00	0,90	0,90
. Fraction II extraits soude	0,90	0,90	0,85	0,90
- Indirectement extractibles				
. Fraction III (liés au fer)	0,80	0,80	0,80	1,00
. Fraction IV (liés aux argiles)	0,95	0,90	0,95	1,00
<u>Acides humiques hydrolysés HCl 6 N</u>				
- Directement extractibles				
. Fraction I extraits pyro.	1,30	1,30	1,20	1,20
. Fraction II extraits soude	1,30	1,35	1,05	1,20
- Indirectement extractibles				
. Fraction III (liés au fer)	1,30	1,25	1,20	1,50
. Fraction IV (liés aux argiles)	1,60	1,90	1,40	1,60
<u>Humine d'insolubilisation</u> hydrolysée HCl 6 N	1,40	1,30	1,20	1,40

Tableau 22 - Variations du rapport D.O. 2.920/D.O. 1.510 cm^{-1}
(C-H aliphatiques/C=C aromatiques) pour les différentes
fractions d'acides humiques et de l'humine d'insolubilisation
(Moyenne de résultats obtenus à partir de 2 sols pour chaque ensemble)

D'autre part, nous avons fractionné les acides humiques des différents lots en fonction de leur encombrement moléculaire. A partir des résultats donnés dans le tableau 23, on peut faire les constatations suivantes :

- pour les acides humiques directement solubilisables (fractions I et II), la répartition des poids moléculaires apparents varie peu des sols calcaires aux sols lessivés rubéfiés, mais la proportion de très grosses molécules augmente nettement (+ 20 % environ) au niveau des sols lessivés glossiques.

	Fractions			
	I	II	III	IV
<u>Rendzine (Saint-Martin-du-Fraigneau)</u>				
Inclus G 50 PM < 10.000	44,0	46,0	45,0	52,0
Inclus G 75 10.000 < PM < 50.000	14,0	7,0	9,0	15,0
Exclu G 75 PM > 50.000	42,0	47,0	46,0	33,0
<u>Sols lessivés rubéfiés (Nalliers)</u>				
Inclus G 50 PM < 10.000	43,0	36,0	38,0	47,0
Inclus G 75 10.000 < PM < 50.000	12,0	13,0	12,0	5,5
Exclu G 75 PM > 50.000	45,0	51,0	50,0	47,5
<u>Sols lessivés glossiques (Saint-Sornin)</u>				
Inclus G 50 PM < 10.000	29,0	27,5	25,0	48,0
Inclus G 75 10.000 < PM < 50.000	3,0	9,5	22,5	3,5
Exclu G 75 PM > 50.000	68,0	63,0	52,5	48,5

Tableau 23 - Résultats du fractionnement des acides humiques sur gel Séphadex (en %).

- Pour les acides humiques liés au fer et aux argiles (fractions III et IV), on ne trouve pas d'évolution aussi nette en fonction du type de sol : dans tous les cas, on a sensiblement la même proportion de molécules de poids moléculaire inférieur et supérieur à 50.000. Signalons cependant que les acides humiques de rendzine (fraction IV) présentent une répartition un peu différente, avec prédominance des molécules les plus petites.

Au niveau des sols lessivés glossiques, nous avons constaté, à partir des spectres infrarouges, que les humines solubilisables (fractions III et IV) étaient beaucoup plus aliphatiques que les acides humiques directement solubilisables (fractions I et II). Au niveau du fractionnement sur gel, ces différences se traduisent par une diminution de la proportion des molécules de grande taille (- 15 % environ) dans les humines solubilisables.

Dans l'ensemble, les résultats obtenus par fractionnement sur gel dextrane confirment et précisent les conclusions auxquelles nous étions arrivé par examen des spectres infrarouges.

Parallèlement au fractionnement sur gel Séphadex, nous avons déterminé le rapport Q 4/6 de Welte (1955) qui est d'autant plus faible que le degré de polymérisation est plus élevé. Nous avons obtenu les résultats suivants pour les acides humiques de la fraction II :

Rendzine modale St-Martin-de-Fraigneau	Sol lessivé rubéfié Nalliers 1	(Sol lessivé glossique Saint-Sornin 3
2,4	2,4	1,7

(Là encore, on constate que les molécules très polymérisées se situent au niveau des sols lessivés glossiques.

Au total, en milieu calcaire, la polycondensation des molécules humiques apparaît freinée par la présence des ions calcium. Tant qu'une grande partie du complexe absorbant est saturée par ce cation, la taille des molécules

augmente peu. Mais, en milieu nettement acide, au niveau des sols lessivés glossiques, on trouve une proportion importante de grosses molécules avec peu de chaînes aliphatiques.

Par ailleurs, nous avons suivi les variations de l'acidité carboxylique en établissant, à partir des spectres infrarouges, le rapport D.O. 1720/D.O. 1510 (C=O des acides/C=C aromatiques). Le tableau 24 montre que ce rapport varie d'un sol à l'autre. Pour les fractions I et II des acides humiques dialysés, il est minimum au niveau des sols lessivés rubéfiés, comme c'était le cas pour les acides fulviques. Par contre, ce rapport ne varie pas pour les fractions III et IV.

	Sols bruns calcaires & rendzines	Sols bruns calcaïques	Sols lessivés rubéfiés	Sols lessivés glossiques
<u>Acides humiques non hydrolysés</u>				
- A.H. directement extractibles				
Fraction I (extraite pyro.)	1,4	1,3	1,2	1,3
Fraction II (extraite soude)	1,1	1,1	1,0	1,1
- A.H. indirectement extractibles				
Fraction III (liée au fer)	1,0	1,0	1,0	1,0
Fraction IV (liée aux argiles)	1,0	1,0	1,0	1,0
<hr/>				
<u>Acides humiques hydrolysés HCl 6 N</u>				
- A.H. directement extractibles				
Fraction I (extraite pyro.)	2,0	2,1	1,8	1,5
Fraction II (extraite soude)	1,5	1,7	1,7	1,4
- A.H. indirectement extractibles				
Fraction III (liée au fer)	1,5	1,6	1,4	1,3
Fraction IV (liée aux argiles)	1,4	1,6	1,3	1,3
<hr/>				
<u>Humine d'insolubilisation</u>				
hydrolysée HCl 6 N	1,2	1,2	1,1	1,2

Tableau 24 - Variation du rapport D.O. 1720/D.O. 1510 cm^{-1} (C=O des acides/C=C aromatiques) pour les différentes fractions d'acides humiques et de l'humine d'insolubilisation (moyenne des résultats obtenus à partir de 2 sols pour chaque ensemble)

Après avoir libéré la totalité des fonctions carboxyliques, par hydrolyse acide, on remarque que le rapport varie de manière un peu différente : il est maximum en milieu calcique et minimum au niveau des sols les plus acides de la séquence. Comme l'avait déjà constaté Jambu (1971) à partir de sols très différents (sols hydromorphes), l'acidité carboxylique varie dans le même sens que l'importance de la fraction aliphatique des acides humiques. Cela laisse supposer que la plupart des fonctions carboxyliques ne sont pas fixées directement sur le noyau, mais plutôt portées par les chaînes aliphatiques.

- Variation de la structure des acides humiques en fonction du mode d'occupation du sol

Ce n'est seulement qu'après hydrolyse acide que les différences apparaissent (Figure 18). Les acides humiques extraits des sols forestiers présentent sur leur spectre des bandes fines et nettes à 1540 et 1570 cm^{-1} , révélant la présence de substances proches de la lignine. Ces absorptions sont accompagnées d'une bande moyenne à 1510 cm^{-1} . Les acides humiques extraits des terres cultivées ne présentent, dans cette région du spectre, qu'une bande, faible, à 1510 cm^{-1} . On constate donc, en accord avec Orlov et al. (1962), que les acides humiques formés sous forêt sont plus proches de la lignine que ceux des sols cultivés.

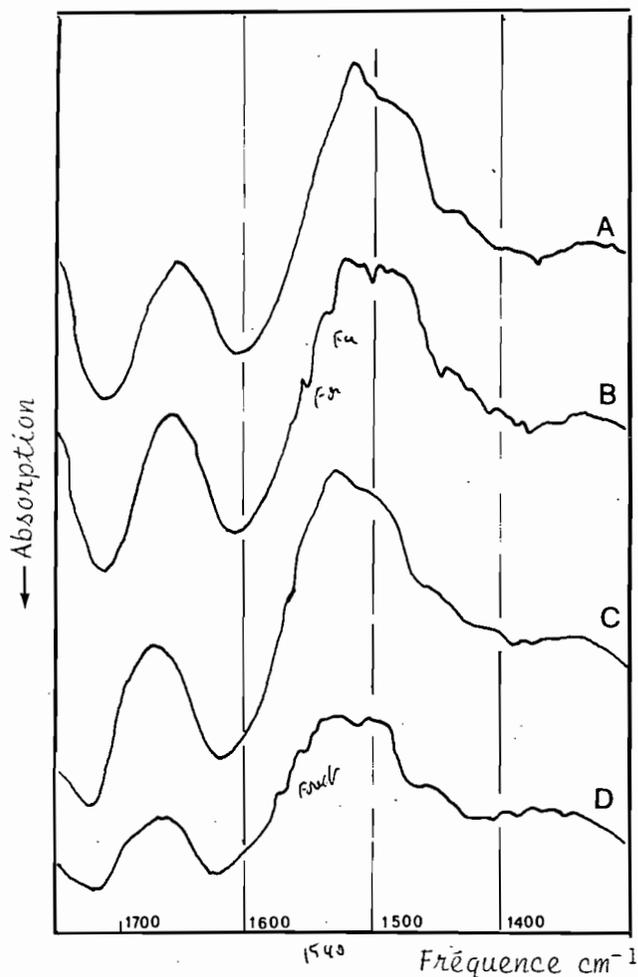


Figure 18 - Spectres d'absorption infrarouge d'acides humiques extraits d'horizons superficiels des sols par le pyrophosphate de sodium et hydrolysés par HCl 6 N

Sols bruns calciques

- A : Sainte-Gemme-la-Plaine 4 (culture)
 B : Sainte-Gemme-la-Plaine 3 (forêt)

Sols lessivés rubéfiés

- C : Nalliers 1 (culture)
 D : Sainte-Gemme-la-Plaine 1 (forêt)

c - Humines non solubilisables

Nous allons étudier successivement la fraction libre et la fraction liée.

- Fraction libre (humine héritée)

Comme nous l'avons déjà signalé, il est généralement admis que l'humine non solubilisable, qui passe dans la fraction légère au cours de la séparation densimétrique, dérive de la lignine. Les observations que nous avons pu faire le confirment.

En effet, après traitement par le bromure d'acétyle et hydrolyse acide, son spectre infrarouge (Figure 19) présente, comme celui de la lignine, une bande C=O double, avec des maximums à 1730 et 1715 cm^{-1} . Ces bandes sont trop fortes pour correspondre à des acides carboxyliques libres et doivent être attribuées à des liaisons esters. On note aussi, comme sur le spectre de la lignine, une absorption C=C forte à 1510 cm^{-1} .

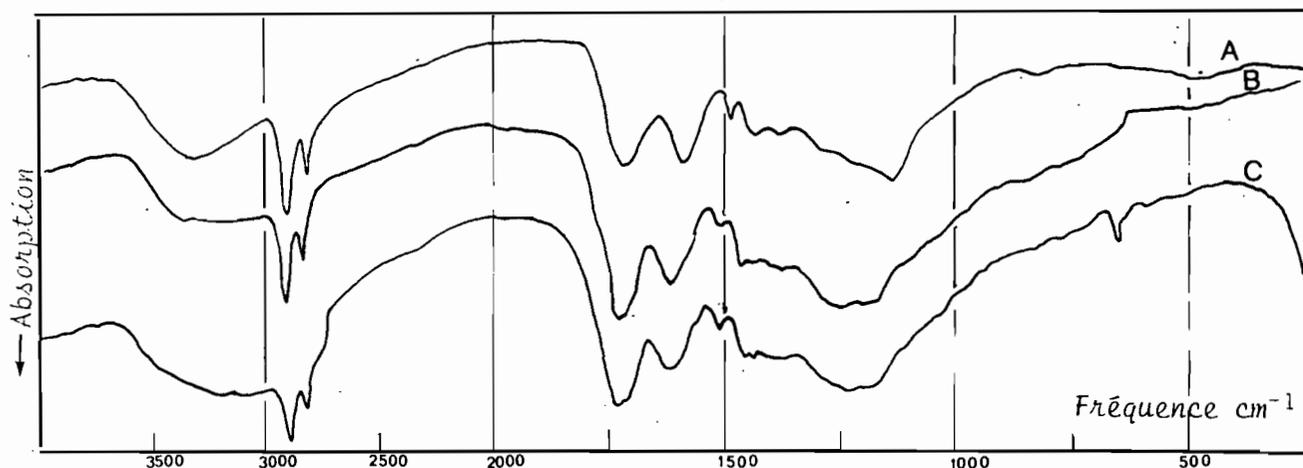


Figure 19 - Spectres d'absorption infrarouge

A : Lignine isolée à partir de la callune

Humine non solubilisable libre (humine héritée) St-Vincent-sur-Graon

B : Déminéralisée, traitée par le bromure d'acétyle et hydrolysée par HCl 6 N

C : Déminéralisée, traitée par le bromure d'acétyle et chauffée à 200°C.

Contrairement à ce que l'on observe pour les acides humiques (Wood et al., 1961), le spectre infrarouge de l'humine chauffée à 200°C ne présente pas les bandes caractéristiques des anhydrides d'acides. Il en est de même à partir de résidus de lignine Klason ayant subi le même traitement (Dupuis et al., 1975). Cela indique encore qu'il y a une parenté entre ce type d'humine et la lignine.

Enfin, nous avons enregistré les courbes ATD sous oxygène de cette humine (Figure 20). Le pic culminant à 300°C, attribué à l'oxydation de la fraction aliphatique, est toujours beaucoup plus intense que le second qui est maximum vers 400°C et qui correspond à la combustion du squelette carboné. Ces résultats concordent avec ceux déjà obtenus par infrarouge et confirment le caractère très aliphatique de l'humine héritée.

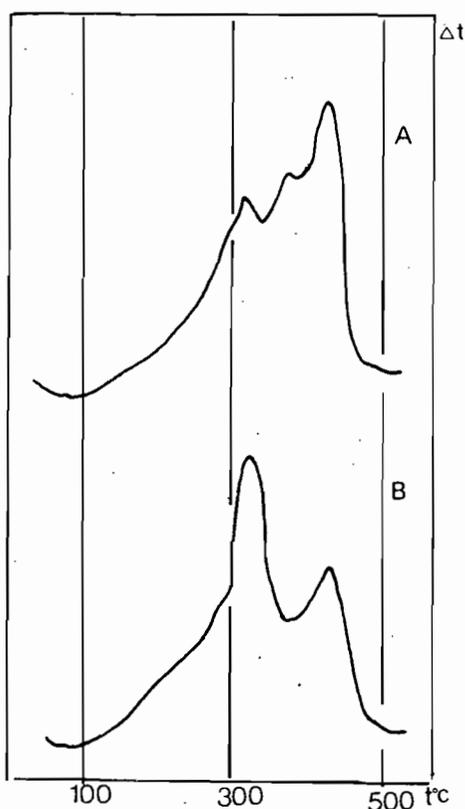


Figure 20 - Courbes ATD sous oxygène

- A : Humine d'insolubilisation (rendzine modale)
 Saint-Martin-de-Fraigneau
 Préparations traitées par le bromure d'acé-
 tyle et hydrolysées par HCl 6 N
- B : Humine héritée (sol lessivé glossique)
 Saint-Vincent-sur-Graon

- Humine non solubilisable liée

Les humines non solubilisables liées ont subi les traitements succes-
 sifs suivants :

- 1ère étape : déminéralisation par chauffage en milieu fluorhydrique et la-
 vage du résidu à l'acide chlorhydrique dilué ;
- 2ème étape : solubilisation de la matière organique non humifiée par le
 bromure d'acétyle ;
- 3ème étape : hydrolyse par HCl 6 N ;
- 4ème étape : chauffage à 200°C

Nous avons enregistré un spectre infrarouge après chaque étape.

Par rapport à celui des acides humiques, le spectre obtenu après la
 première étape (Figure 21.A) ne présente pas de nouvelles bandes ; on constate
 seulement des différences dans l'intensité de celles-ci.

Parmi les substances susceptibles de s'associer à cette humine, nous
 n'avons pas identifié les bandes propres aux polysaccharides. Des absorptions ca-
 ractéristiques des liaisons peptides apparaissent, mais restent faibles. En fait,
 ces substances, déjà mises en évidence par dosage (Tableau 16, p. 34), ont dû
 être hydrolysées au cours du traitement de déminéralisation.

La forte intensité des bandes relatives aux groupements CH_2 indique
 que les humines non solubilisables doivent contenir des résidus végétaux peu ou
 pas transformés. C'est pourquoi nous les avons traitées par le bromure d'acétyle
 (2ème étape). Sur le spectre infrarouge enregistré ensuite, on remarque que l'in-
 tensité des bandes maximums à 2920, 2850 et 1460 cm^{-1} a beaucoup diminué (Figure
 21.B). Cela montre bien que ce qu'on appelle l'humine non solubilisable liée con-
 tient encore des débris végétaux non humifiés malgré l'emploi simultané des li-
 queurs denses et des ultrasons.

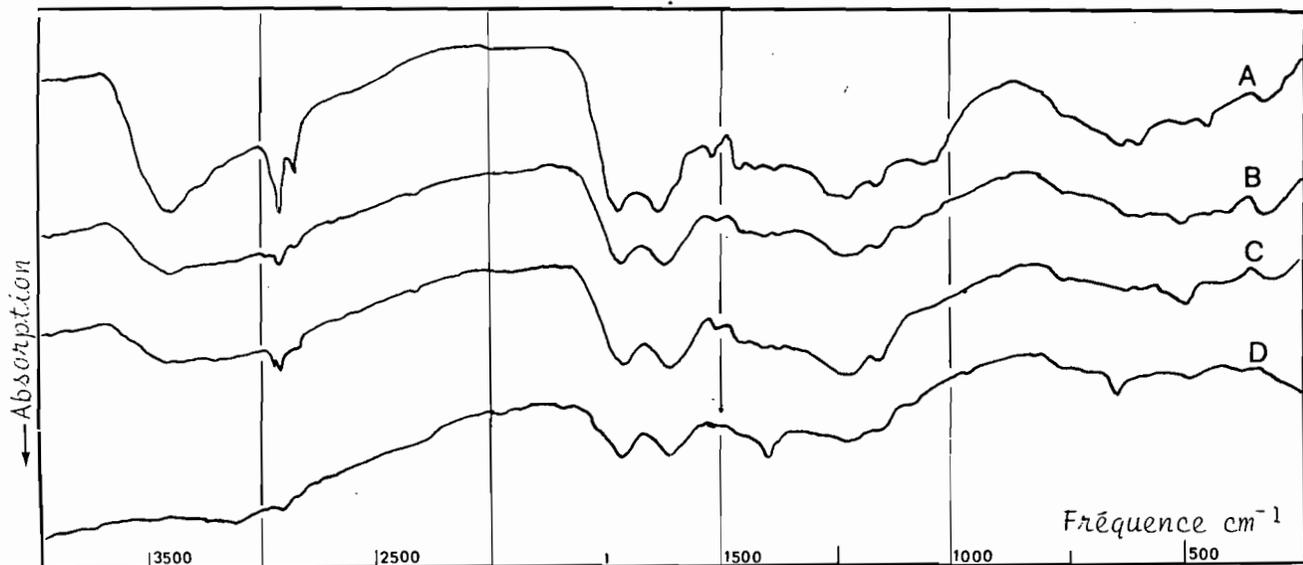


Figure 21 - Humines non solubilisables liées (humine d'insolubilisation)

- A : Déminéralisées
- B : Déminéralisées et traitées par le bromure d'acétyle
- C : Déminéralisées et traitées par le bromure d'acétyle et hydrolysées par HCl 6 N
- D : Déminéralisées et traitées par le bromure d'acétyle, hydrolysées et chauffées à 200°C.

A la suite de la troisième étape du traitement, qui élimine le reste de protéines, on isole l'humine d'insolubilisation. C'est à partir du spectre infrarouge de ces substances purifiées que nous avons mesuré les densités optiques aux fréquences caractéristiques et établi des rapports (Tableau 25) permettant de comparer l'humine d'insolubilisation à l'humine héritée.

Types d'humine et de sols	D.O. 2920/D.O. 1510
<u>Humine d'insolubilisation</u>	
Rendzine	1,40
Sol brun calcique	1,30
Sol lessivé rubéfié	1,25
Sol lessivé glossique	1,40
<u>Humine héritée</u>	
Sol lessivé glossique	1,50

Tableau 25 - Variations du rapport D.O. 2920/D.O. 1510 (C-H aliphatiques/C=C aromatiques).

Il apparaît que l'importance des structures aliphatiques par rapport aux structures aromatiques est plus grande dans l'humine héritée que dans l'humine d'insolubilisation.

Après chauffage à 200°C (quatrième étape), les spectres infrarouges de l'humine d'insolubilisation présentent deux bandes à 1840 et 1770 cm^{-1} , indiquant la formation d'anhydrides d'acides. Cela différencie encore cette humine de l'humine héritée, mais la rapproche des acides humiques qui présentent toujours ces bandes sur leur spectre après chauffage (Wood et al., 1961 ; Wagner et Stevenson, 1965).

Par ailleurs, les courbes ATD sous oxygène apportent quelques précisions supplémentaires sur la constitution des humines d'insolubilisation (Figure 20.A, p. 48). En chauffant les poudres issues de la troisième étape, on constate

qu'il apparaît trois pics d'oxydation sur toutes les courbes. Ceux-ci culminent respectivement à 310-320°C, 390-400°C et 440°C. Le premier correspond au départ des chaînes aliphatiques, les deux suivants à l'oxydation de la fraction aromatique et de certains groupements fonctionnels. La courbe ATD de l'humine d'insolubilisation est donc intermédiaire entre celle de l'humine héritée, dont la fraction aromatique s'oxyde en une seule étape vers 400°C, et celle des acides humiques, dont l'oxydation de la fraction aromatique se fait également en une seule étape, maximum vers 440°C (Dupuis et al., 1970).

Enfin, si l'on compare l'intensité des pics d'oxydation sur les courbes ATD de l'humine d'insolubilisation et celles de l'humine héritée, on confirme les résultats déjà obtenus par spectroscopie infrarouge, à savoir, que l'humine héritée est celle qui présente le caractère aliphatique le plus marqué.

- Origine de l'humine d'insolubilisation. Causes de son insolubilisation

On admet généralement que la formation d'humine d'insolubilisation est due à la polymérisation progressive des acides humiques (Duchaufour et Jacquin, 1975). Cependant, Aleksandrova (1972) a constaté que le poinds moléculaire d'acides humiques jeunes, formés aux dépens de débris végétaux, peut être d'emblée très élevé et rester élevé pendant toute la période d'humification. Ces observations sont en contradiction avec le mécanisme de condensation - polymérisation couramment admis.

C'est pourquoi nous allons étudier comparativement :

- les acides humiques directement extractibles par des solutions alcalines (pyrophosphate de sodium, puis hydroxyde de sodium) ;
- les acides humiques qui ne sont extractibles qu'après élimination du fer (acides humiques liés au fer) ou des argiles (acides humiques liés aux argiles) ;
- l'humine d'insolubilisation non extractible, c'est-à-dire celle que l'on isole après élimination de l'humine héritée par densimétrie avec application des ultrasons et de l'humine microbienne par hydrolyse acide.

A l'intérieur de chaque ensemble de sol, nous allons comparer ces différentes fractions entre elles quant à leur degré d'aromaticité, leur encombrement moléculaire et leur acidité carboxylique.

Dans un premier temps, nous avons suivi les variations du rapport $D.O. 2920/D.O. 1510 \text{ cm}^{-1}$ (C-H aliphatiques/C=C aromatiques) établi à partir des spectres infrarouges de substances préalablement hydrolysés par HCl 6 N.

D'une fraction à l'autre, ce rapport met en évidence les variations du degré d'aromaticité. Pour un même échantillon de sol, ce rapport reste sensiblement constant pour toutes les fractions d'acides humiques et de l'humine d'insolubilisation (Tableau 22), à l'exception des acides humiques liés aux argiles. Dans ce cas, les valeurs plus élevées du rapport traduisent un degré d'aromaticité plus faible. Khan (1971) a également constaté que les acides humiques liés aux argiles, extraits de chernozem et de solonetz, présentent un caractère aliphatique plus marqué que les autres fractions d'acides humiques. Dans le cas présent, nous avons montré, précédemment, que ce caractère plus aliphatique est lié à la présence de structures résiduelles proches de la lignine.

Nous n'avons pu déterminer l'encombrement moléculaire par filtration sur gel Séphadex que pour les fractions solubles (Tableau 23, p. 44). Dans tous les extraits, on constate une polydispersion des poids moléculaires. Pour un même sol, les divers lots d'acides humiques présentent, à quelques fluctuations près, la même répartition des tailles de molécules, à l'exception des acides humiques liés aux argiles. Dans ce dernier cas, le taux plus élevé de petites molécules peut être relié, comme précédemment, à la présence de substances résiduelles dérivées de la lignine. Mais notons également que les argiles se lient préférentiellement aux substances humiques de petite taille (Sakun, 1942).

Enfin, le rapport D.O. 1720/D.O. 1510 (C=O des acides/C=C aromatiques) établi à partir des spectres infrarouges de substances humiques préalablement hydrolysées par HCl 6 N, permet de comparer les différentes fractions quant à leur acidité carboxylique (Tableau 24, p. 45). On remarque, en accord avec Posner (1966) et Posner *et al.* (1968), que le pyrophosphate de sodium disperse préférentiellement les acides humiques à forte teneur en COOH. Par ailleurs, toutes les fractions extraites par la soude, soit directement, soit après élimination du fer ou des argiles, ont sensiblement la même acidité carboxylique. Les fractions totalement insolubles de l'humine présentent le taux d'acidité carboxylique le plus faible.

*Plus humic
de la lignine*
ou

Au total, pour un même sol, les acides humiques liés aux argiles ont à la fois une taille plus petite et une partie aliphatique plus importante que les autres fractions. Ces acides devraient donc être facilement extractibles s'ils n'étaient fortement liés à la matière minérale. Cette fraction mise à part, toutes les autres sont très semblables en ce qui concerne la taille des molécules et leur degré d'aromaticité. Elles se différencient cependant par leur taux d'acidité carboxylique, maximum au niveau des fractions les plus facilement extractibles et minimum au niveau des fractions totalement insolubles.

à 70 % de l'acidité de l'humine provenant de la lignine et de la matière minérale ?

Pour chaque terme de la séquence, l'insolubilisation progressive des acides humiques conduisant à la formation d'humine n'apparaît donc pas liée à l'augmentation de taille des molécules. Cette insolubilisation semble avoir au moins deux causes :

- un degré de liaison très fort avec la matière minérale du sol ; dans ce cas, l'humine redevient soluble après élimination de la fraction minérale.
- une diminution du caractère hydrophile des molécules humiques par décarboxylation progressive de celles-ci. *(à x précipitent plutôt l'humine)
Soit une association avec un type de solubilité*

Comme nous l'avons vu dans la première partie, la plupart des sols étudiés sont très bien pourvus en fer libre. Selon Duchaufour (1977), le fer favorise la formation d'humine d'insolubilisation non extractible, même après élimination du fer par le dithionite. On peut donc se demander si le fer ne provoquerait pas une décarboxylation partielle des acides humiques, comme cela a été observé pour les acides aminés (Andreux, 1978). On trouve, en effet, le taux maximum d'humine d'insolubilisation dans les sols bruns calciques où l'on dose également le maximum de fer libre. En milieu lessivé, où une partie du fer est éliminée par migration, le taux d'humine d'insolubilisation baisse nettement.

C - RELATION ENTRE LES COMPOSES HUMIQUES ET LA MATIERE MINERALE DU SOL : COMPLEXES ORGANO-MÉTALLIQUES

La formation de composés organo-minéraux est une étape fondamentale de l'évolution des substances humiques : leur stabilisation et leur insolubili-

sation dans le sol en dépendent (Aleksandrova, 1975 ; Duchaufour, 1976). Par ailleurs, la formation de ces complexes joue un rôle essentiel dans la formation des sols et la différenciation des profils.

C'est pourquoi nous avons cherché à mettre en évidence et à préciser la nature des complexes organo-métalliques présents dans les horizons humifères (A₁ ou Ap).

1 - Etude quantitative

a - Calcium lié à la matière organique

Pour extraire les complexes de calcium, nous avons utilisé une solution de soude N/10 bien que ce soit un dispersant peu efficace en milieu saturé. Le pyrophosphate de sodium serait un bien meilleur dispersant, mais il n'est pas possible de l'utiliser car il insolubilise le calcium à l'état de phosphate (Aleksandrova, 1967).

Nous avons ensuite dosé les ions calcium dispersés en milieu alcalin en même temps que les acides humiques et fulviques (Tableau 26). Les résultats sont difficiles à interpréter car on ignore si les complexes obtenus existaient bien dans le sol ou s'ils ont été formés ou transformés au cours de l'extraction (Kononova, 1972).

Types de sols	Sans prétraitement acide				Avec traitement acide	
	1ère extraction		2ème extraction		1ère extract.	2ème extract.
	Ca	Fe	Ca	Fe	Ca	Ca
<u>Sols calcaires</u>						
Rendzine modale : St-Martin-F.	209	80	305	283	63	140
Sol brun calcaire : Nalliers	244	50	288	328	85	129
<u>Sols bruns calciques</u>						
Ste-Gemme-la-Plaine 4	173	161	245	355	19	22
Ste-Gemme-la-Plaine 3	180	326	296	601	15	29
<u>Sols lessivés rubéfiés</u>						
Nalliers 1	101	359	230	237	18	20
Ste-Gemme-la-Plaine 1	45	1 365	150	464	7	25

Résultats exprimés en mēq p. cent g de carbone

Tableau 26 - Extraction des complexes organo-métalliques du sol par la soude N/10 avec ou sans prétraitement acide.

Lorsque l'on effectue deux extractions successives, la seconde disperse toujours des composés plus riches en calcium, donc moins facilement dispersables, que la première. Si les extractions sont précédées d'une décarbonatation, le taux de matière organique solubilisée est deux à trois fois plus important (Tableau 28, p. 54), mais les dosages montrent qu'une grande partie des complexes humo-calciques a été détruite par le traitement acide. L'hydroxyde de sodium solubilise donc d'autant mieux les substances humiques qu'elles sont moins saturées en calcium. Du fait de cette sélection, le taux de calcium lié dosé à partir des extraits sera donc sous-estimé. Malgré cela, les variations observées d'un sol à l'autre (Tableau 26) reflètent bien l'évolution des complexes

organo-métalliques du sol: Aussi, nous remarquons que la teneur en calcium des complexes diminue régulièrement lorsque l'on passe du milieu calcaire au milieu lessivé. L'évolution du rapport Ca/C traduit donc bien la désaturation progressive du milieu.

b - Fer lié à la matière organique

Nous avons également dosé le fer dans les extraits sodiques bien que l'on puisse faire les remarques suivantes :

- les complexes du fer se détruisent progressivement au-dessus de pH 10 (Kononova, 1967) ;
- en milieu calcique, l'hydroxyde de sodium disperse les complexes anioniques mais pas les complexes d'adsorption (Jambu et al., 1975).

A partir des résultats obtenus, on peut faire les remarques suivantes :

Lorsque l'on effectue deux extractions successives, la seconde disperse mieux le fer que la première (Tableau 26), car l'essentiel du calcium échangeable, inhibant la dispersion des complexes de fer, est libéré au cours de la première extraction. C'est pourquoi la composition du deuxième extrait peut seule renseigner sur l'importance des complexes de fer dans le sol. En n'examinant que ces derniers résultats, on constate que le taux de fer complexé varie sensiblement comme celui du fer libre : il est maximum au niveau des sols bruns calciques.

Types de sols	Extractions à pH 10		Extractions à pH 12	
	1ère ext.	2ème ext.	1ère ext.	2ème ext.
<u>Sols calcaires</u>				
Rendzine modale : St-Martin-de-F.	196	593	154	388
Sol brun calcaire : Nalliers 5	238	920	170	441
<u>Sols bruns calciques</u>				
Sainte-Gemme-la-Plaine 4	203	556	106	308
Sainte-Gemme-la-Plaine 3	161	402	152	331
<u>Sols lessivés rubéfiés</u>				
Nalliers 1	1 330	1 712	531	1 120
Sainte-Gemme-la-Plaine 1	1 420	2 980	1 939	2 082

Résultats exprimés en mēq de Fe III p. cent g de carbone

Tableau 27 - Extraction des complexes organo-métalliques de fer par le pyrophosphate de sodium à pH croissants.

Le pyrophosphate de sodium est certainement un meilleur dispersant des complexes de fer que la soude. Cependant, une partie du fer extrait peut provenir de la mise en solution d'hydroxydes libres. On limite cet inconvénient en utilisant des solutions de pH ≥ 10 (Bascomb, 1968). Les résultats obtenus (Tableau 27) tendent à montrer que l'on n'a extrait que des complexes anioniques en milieu calcaire ou calcique (rapport Fe/C faible), auxquels s'ajoutent des complexes d'adsorption en milieu lessivé (rapport Fe/C élevé).

Types de sols	Soude 0,1 N		Pyrophosphate de sodium 0,1 M	
	Sans traitement acide	Avec traitement acide	pH 10	pH 12
<u>Sols calcaires</u>				
Rendzine modale : St-Martin-de-F.	10,0	21,0	12,2	14,5
Sol brun calcaire : Nalliers 5	10,0	20,0	10,2	13,0
<u>Sols bruns calciques</u>				
Sainte-Gemme-la-Plaine 4	11,5	28,5	10,6	13,5
Sainte-Gemme-la-Plaine 3	9,5	27,0	12,0	13,0
<u>Sols lessivés rubéfiés</u>				
Nalliers 1	21,0	38,0	13,5	19,0
Sainte-Gemme-la-Plaine 1	33,5	39,0	19,0	22,0

Résultats exprimés en p. cent du carbone total

Tableau 28 - Variations du taux de carbone dispersé (2 extractions successives) en fonction des conditions d'extraction.

2 - Etude qualitative

L'étude qualitative des complexes organo-métalliques du sol a été effectuée par analyse thermique différentielle. En effet, Jambu et Dupuis (1975) ont montré qu'en associant divers éléments métalliques à des acides fulviques ou humiques purs, il apparaît, sur leur courbe ATD sous oxygène, un ou plusieurs pics exothermiques. Ceux-ci culminent à des températures qui dépendent, dans une certaine mesure, de l'ion minéral introduit, de son mode de liaison et du site sur lequel il se fixe.

Ces mêmes auteurs ont montré que la mise en pseudosolution des complexes (action des liqueurs alcalines) s'accompagne toujours de modifications profondes. C'est pourquoi nous avons préféré identifier les complexes uniquement par pyrolyse directe des échantillons de sols humifères. Pour interpréter les courbes obtenues, nous nous sommes référés aux travaux de Jambu et al. (1975), Jambu et Dupuis (1975), Dupuis et al. (1975).

Par pyrolyse de l'échantillon total de terre, on obtient deux types de courbes (Figure 22). Les courbes du premier type correspondent aux sols calcaires ; elles présentent deux pics d'oxydation culminant respectivement à 300-310°C et 520°C. Le premier est toujours intense et correspond à la fois à l'oxydation de la matière organique non humifiée et à celle des complexes organo-métalliques flocculés avec les argiles ou les hydroxydes de fer. Le second pic, d'intensité moyenne à faible, peut être attribué à la destruction d'un complexe humo-calcaire.

Les courbes du deuxième type correspondent aux sols calciques et aux sols lessivés. Elles se différencient des premières par l'apparition d'un pic supplémentaire, d'intensité moyenne, culminant à 380-390°C. Ce pic doit correspondre à l'oxydation d'humine résiduelle dérivée de la lignine (Dupuis et al., 1975). Ainsi, l'ATD montre que ce type d'humine déjà mis en évidence dans les sols lessivés glossiques existe également dans les sols lessivés rubéfiés, mais en très faible proportion.

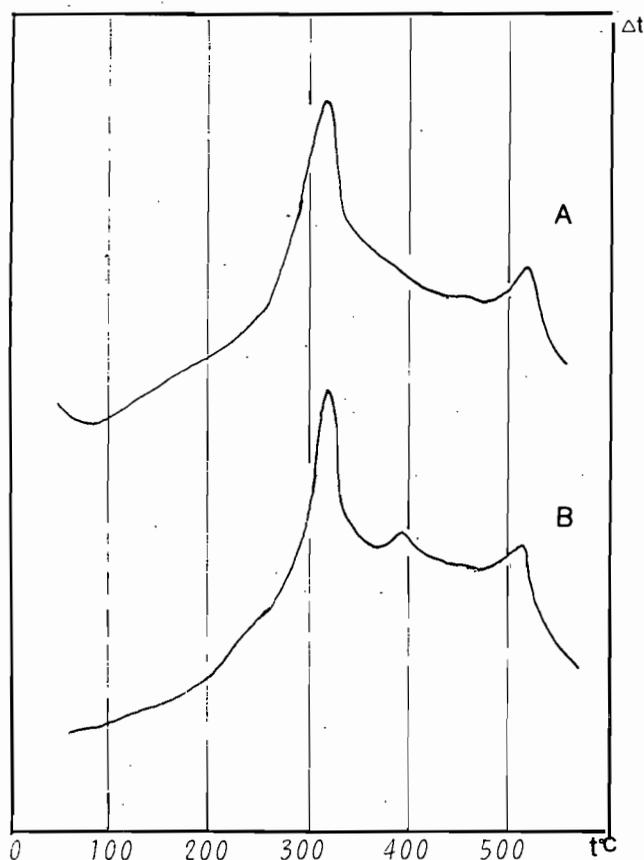


Figure 22 - Courbes ATD obtenues par pyrolyse directe de la terre

A : Rendzine modale (St-Martin-de-F.)

B : Sol lessivé rubéfié (Nalliers 1)

A la suite des travaux de Richter *et al.* (1975), nous avons tenté de fractionner les complexes organo-minéraux du sol par flottation dans des mélanges bromoforme - alcool de densité variable (1,8 ; 2,0 ; 2,2 ; 2,4). Nous avons ensuite enregistré la courbe ATD de chaque fraction. Les résultats sont donnés dans le tableau 29.

Densités	$d < 1,8$	$1,8 < d < 2$	$2 < d < 2,2$	$d > 2,2$
Maximum des pics d'oxydation	300°C	300, 380 & 520°C	270 & 520°C	290 & 305°C
Nature des complexes identifiés	Débris végétaux libres	Complexes Humo-calciques floclés	Associations colloïdales avec $Fe(OH)_3$ et/ou Ca floclés	Complexe argilo-humique

Tableau 29 - Nature des composés organo-minéraux des sols identifiés par ATD après un fractionnement densimétrique.

Au total, les résultats font apparaître l'existence de complexes calciques libres (non liés aux colloïdes minéraux) dans les divers sols. Le fer formerait, au moins dans certains cas, des complexes anioniques avec la matière organique, mais l'ATD montre que ceux-ci n'existent jamais à l'état libre (absence de pic d'oxydation vers 470-480°C). Dans tous les cas, l'essentiel de la matière organique apparaît floclé avec l'hydroxyde ferrique et/ou les argiles.

CHAPITRE III : POLYSACCHARIDES

Les polysaccharides du sol proviennent des microorganismes et des tissus végétaux, ceux issus des plantes supérieures étant en grande partie remaniés par les microorganismes (Gupta et Sowden, 1964). Ce sont des composés carbonés aliphatiques constitués de polymères, de sucres simples, d'acides uroniques ou de sucres aminés.

Il est important de connaître leur répartition dans les sols de la séquence car leur présence modifie les propriétés physiques du milieu. En effet, les polysaccharides stabilisent les agrégats du sol qui devient plus perméable à l'air et à l'eau. Cependant, leur présence rend quelquefois le sol difficilement réhumectable après une période de sécheresse (Russel, 1961).

La teneur en polysaccharides du sol dépend de quatre mécanismes de protection (Cortez, 1977) :

- L'adsorption sur les argiles. Dans la séquence, c'est au niveau des sols neutres que le taux de colloïdes minéraux est le plus important.
- La complexation avec les ions métalliques. Dans le cas présent, celle-ci sera plus importante en milieu neutre qu'en milieu lessivé, légèrement acide et désaturé.
- La condensation de leurs groupements carbonyles avec les dérivés aminés. Dans tous les sols étudiés ici, environ 60 % de l'azote sont sous forme de composés aminés.
- Leur inaccessibilité par insertion dans les micropores du sol. Nous avons vu précédemment que la microporosité est plus importante aux deux extrémités de la séquence et diminue au niveau des sols lessivés rubéfiés.

Les résultats des dosages sont donnés dans le tableau 30.

	Sols bruns calcaires & rendzines	Sols bruns calciques	Sols lessivés rubéfiés	Sols lessivés glossiques
<u>Polysaccharides extraits à l'eau</u>				
C polysaccharides (*)	27,4	26,1	34,0	70,5
C polys./C lié	1,2	1,0	2,2	2,5
<u>Polysaccharides extraits en milieu acide</u>				
C polysaccharides .(*)	272,4	323,0	155,4	217,5
C polys./C lié	12,0	12,1	10,1	7,8
<u>Polysaccharides totaux</u>				
C polysaccharides (*)	299,8	349,1	189,4	288,0
C polys./C lié	13,2	13,0	12,3	10,4

(*) Résultats exprimés en mg/100 g de terre séchée à 105°C.

Tableau 30 - Dosages des polysaccharides dans les horizons humifères A₁ ou Ap (Moyennes obtenues à partir de 2 à 3 sols pour chaque ensemble).

En examinant ces résultats, on remarque d'abord que, d'un sol à l'autre, les polysaccharides représentent une fraction sensiblement constante du taux de carbone lié (10 à 13 %). Il existe donc une corrélation linéaire entre le taux de polysaccharides et le taux de carbone lié (Figure 23). Les résultats obtenus ici sont du même ordre de grandeur que ceux cités par Mehta et al. (1961), puis Guckert (1973). Ces auteurs estiment, en effet, que les hydrates de carbone représentent généralement de 5 à 20 % du carbone organique du sol.

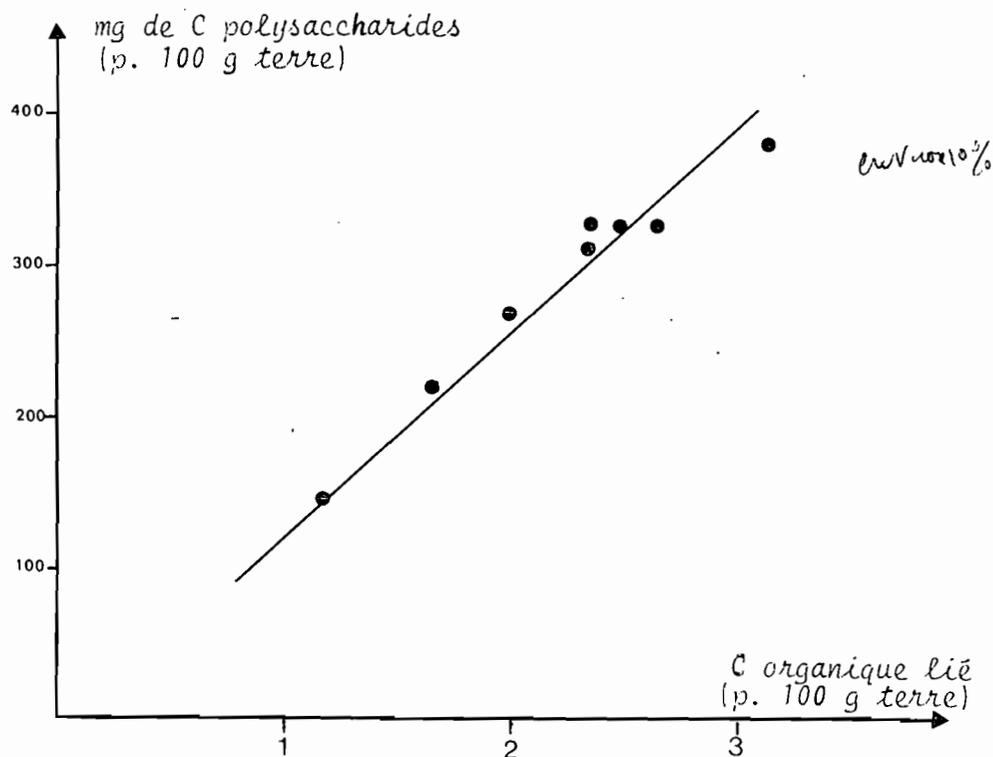


Figure 23 - Variation de la teneur en polysaccharides en fonction du carbone organique lié du sol.

On note également des variations en fonction du type de sol. Pour plusieurs raisons déjà citées, le taux de polysaccharides est maximum en milieu neutre. Il diminue dans les sols lessivés rubéfiés où, comme nous le verrons plus loin, la cellulolyse est maximum ; il augmente ensuite à nouveau dans les sols lessivés glossiques, car il y a peu de microorganismes cellulolytiques en milieu acide (Remacle, 1964).

Par ailleurs, remarquons que l'état des polysaccharides évolue à mesure que le pH s'abaisse. En effet, les formes solubles dans l'eau ne représentent que 7 à 9 % du total en milieu neutre, contre 15 à 30 % en milieu acide. Les polysaccharides sont donc plus facilement mobilisables dans les sols acides que dans les sols saturés. Enfin, comme nous l'avons vu, les formes hydrosolubles facilement dispersables passent dans la fraction fulvique lors du fractionnement de l'humus.

Enfin, les polysaccharides sont généralement considérés comme des conditionneurs de structure. Dans les sols étudiés ici, la teneur en polysac-

charides varie sensiblement comme la stabilité structurale des agrégats du sol. On constate, en effet, un effondrement partiel de la structure, s'accompagnant d'une baisse de la porosité dans les sols lessivés rubéfiés où la cellulolyse est particulièrement active. Mais, il n'est pas certain que l'augmentation de la quantité de polysaccharides présents dans le sol puisse expliquer à elle seule l'amélioration de la structure observée en milieu nettement plus acide dans le sol lessivé glossique. On constate, en effet, que les polysaccharides deviennent de plus en plus libres et facilement solubilisables à mesure que le milieu s'acidifie. D'autres substances pourraient intervenir à ce niveau, comme nous allons le voir dans le chapitre suivant.

CHAPITRE IV : FRACTIONNEMENT DES LIPIDES

Les travaux concernant les lipides des sols sont peu nombreux si on les compare à la somme considérable d'études portant sur d'autres fractions organiques telles que, par exemple, les composés humiques.

Sur le plan pédologique, l'étude des lipides permet de combler une lacune dans la connaissance de l'évolution générale des humus. On constate, en effet, que si, dans certains sols, les lipides ne représentent que 2 à 3 p. cent du carbone organique total, dans d'autres, au contraire, leur taux peut dépasser 20 p. cent de la matière organique totale (Jambu et al., 1978). Une accumulation aussi importante de composés lipidiques ayant, pour la plupart d'entre eux, des propriétés hydrophobes, peut modifier les caractéristiques physico-chimiques et biologiques des sols et, par voie de conséquence, leur fertilité.

C'est pourquoi nous avons suivi, le long de la séquence, l'évolution quantitative et qualitative des lipides du sol.

A - DOSAGE DES LIPIDES TOTAUX

Les résultats donnés dans le tableau 31 montrent que les teneurs en lipides et en polysaccharides varient sensiblement de la même manière.

Types de sols	Lipides en mg/kg sol			Lipides (% C total)		
	Milieu forest.	Milieu cultivé	Moyenne	Milieu forest.	Milieu cultivé	Moyenne
<u>Sols bruns calcaires et rendzine</u>			860			3,77
St-Martin-de-Fraigneau		1 000			4,23	
Nalliers 5		600			3,07	
St-Etienne-de-Brillouet 4		1 000			4,01	
<u>Sols bruns calciques</u>			1 300			4,66
Ste-Gemme-la-Plaine 4		900			4,10	
Ste-Gemme-la-Plaine 3	1 700.			5,23		
<u>Sols lessivés rubéfiés</u>			950			5,15
Nalliers 1		500			3,95	
Ste-Gemme-la-Plaine 1	1 400			7,08		
<u>Sols lessivés glossiques</u>			3 600			5,07
St-Vincent-sur-Graon	3 000			5,00		
St-Sornin 3	4 200			5,14		

Tableau 31 - Teneur en lipides extraits des horizons A₁ ou Ap par le mélange éthanol-benzène (1/3-2/3)

Les lipides représentent ici de 4 à 5 p. cent du carbone organique total. Comme pour les hydrates de carbone, il existe une corrélation linéaire entre taux de carbone et taux de lipides (Figure 24). Cependant, lorsque le milieu s'acidifie, la proportion des lipides dans l'humus tend légèrement à augmenter, ce qui est un phénomène général (Stevenson, 1966, Fustec-Mathon et al., 1975 ; Jambu et al., 1978) alors que le rapport C polysaccharides/C lié diminue (Tableau 30, p. 56). En conséquence, le rapport pondéral polysaccharides/lipides varie de la manière suivante lorsque le pH s'abaisse :

Sols bruns calcaires et rendzines	Sols bruns calciques	Sols lessivés rubéfiés	Sols lessivés glossiques
8,8	6,7	4,9	2,0

On voit donc que les polysaccharides dominent nettement dans les sols neutres, mais ils sont seulement deux fois plus abondants que les lipides en milieu acide. Or, les lipides, comme les polysaccharides, ont un effet stabilisant sur les agrégats du sol (Bilong, 1978). Dans la séquence étudiée, on peut donc penser que l'action stabilisante des polysaccharides est prépondérante en milieu neutre, mais en milieu acide, celle des lipides (substances hydrophobes qui agissent en diminuant la mouillabilité des agrégats) est sans doute aussi importante, voire même supérieure, à celle des polysaccharides.

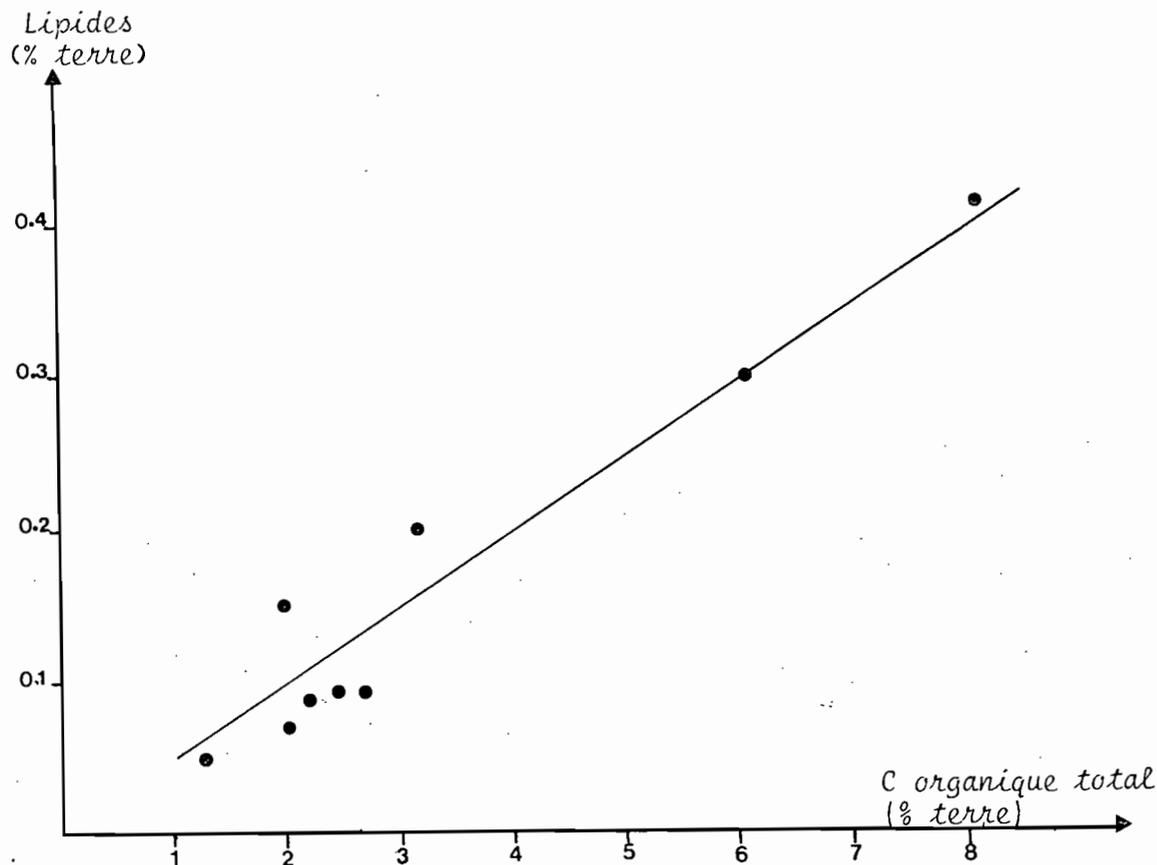


Figure 24 - Variation du taux de lipides en fonction du carbone organique total

Si l'on considère le taux de lipides exprimé non plus par rapport au carbone organique total mais par rapport à 1 kg de sol, on constate que celui-ci varie d'un ensemble à l'autre. Comme le taux de polysaccharides, il passe par un minimum au niveau des sols lessivés rubéfiés (mull acide), où, comme nous le verrons plus loin, la lipidolyse et la cellulolyse sont maximum.

Enfin, le taux de lipides présents dans le sol varie avec le mode d'exploitation du sol. Il est nettement plus élevé sous forêt que sous culture.

Cela tient à la nature de la végétation : les feuilles de chêne ou de chataignier contiennent deux à trois fois plus de lipides que les pailles de blé ou de maïs (Tableau 48, p. 97).

B - DISTRIBUTION COMPAREE DES LIPIDES DANS LES SOLS

Dans une étape suivante, nous avons examiné la composition des lipides extraits du sol. Cette étude a été faite à partir de deux sols : une rendzine modale (Saint-Martin-de-Fraigneau) et un sol lessivé glossique (Saint-Sornin 3), qui correspondent aux termes extrêmes de la séquence. Nous avons pratiqué successivement trois types d'extraction :

- Lipides libres A, directement solubilisés par le mélange éther de pétrole - acétate d'éthyle (3/4 - 1/4) ;
- Lipides liés B, extractibles après un traitement acide qui détruit notamment les sels d'acides gras ;
- Lipides liés C, dispersables après un traitement fluorhydrique qui attaque les minéraux argileux.

Les résultats du tableau 32 montrent que le sol acide contient à la fois plus de lipides libres et de lipides liés que la rendzine. L'augmentation ne se fait pas dans les mêmes proportions pour toutes les fractions. Ainsi, les lipides liés qui correspondent à 43 p. cent du total dans le sol calcaire, ne représentent plus que 17 p. cent des lipides totaux dans le sol acide. Dans ce dernier, les lipides sont donc plus abondants mais moins liés à la fraction organo-minérale du sol.

Dans un second temps, nous avons séparé chaque extrait en quatre fractions par chromatographie sur colonne de silice imprégnée de potasse (Mc Carthy-Duthie) :

- une fraction neutre constituée d'hydrocarbures, d'esters longs et courts, d'alcools, de cétones et de glycérides (mono-, di- et triglycérides) ;
- une fraction acide constituée de monoacides gras, de diacides, de cétoacides, d'hydroxyacides ;
- une fraction polaire constituée de composés plus ou moins polymérisés dont la structure est mal connue ;
- une fraction polymérisée qui reste adsorbée sur la colonne de silice et dont l'importance est déterminée par différence.

La répartition des lipides totaux entre les différentes fractions est caractérisée par une prédominance des fractions neutres et acides (Tableau 32), cette dernière étant environ deux fois plus importante que la fraction neutre. Il en est ainsi dans la majorité des sols. On observe quelquefois l'inverse, notamment dans les milieux hydromorphes, où les phénomènes d'oxydation sont manifestement limités.

Alors que la répartition des lipides totaux ne différencie pas les deux lots d'origine différente, il n'en est pas de même du degré de liaison déterminé pour chaque fraction. Celui-ci varie nettement d'un sol à l'autre, tout au moins en ce qui concerne les fractions neutres et acides, qui sont 2,5 à 3 fois plus liées à la matière organo-minérale en milieu calcaire qu'en milieu acide. Dans la rendzine, cette augmentation de la fraction liée peut correspondre :

Lipides	Rendzine modale (St-Martin-de-Fraigneau)									Sol lessivé glossique (St-Sornin 3)								
	Totaux (1)	Neutres (1) (2)		Acides (1) (2)		Polaires (1) (2)		Non désorbés (1) (2)		Totaux (1)	Neutres (1) (2)		Acides (1) (2)		Polaires (1) (2)		Non désorbés (1) (2)	
A	534	189	36	241	45	60	11	44	8	3 180	896	28	1 706	54	423	13	155	5
B	299	59	20	195	65	12	4	33	11	462	101	22	248	54	48	10	65	14
C	104	27	26	65	62	3	3	9	9	208	38	18	99	48	21	10	50	24
A + B + C	937	275	29	501	54	75	8	86	9	3 850	1 035	27	2 053	53	492	13	270	7
$\frac{B+C}{A+B+C} \%$	43		31		52		20		49	17		13		17		14		43

(1) Exprimés en mg/kg de terre séchée à 105°C

(2) Exprimés en p. cent de chaque extrait (A, B ou C)

Tableau 32 - Dosage des lipides libres et liés. Répartition des lipides en différentes fractions de polarité croissante.

	Total (1)	Hydro-carbures		Esters longs		Esters courts		Cétones		Trigly-cérides		Digly-cérides		Alcools		Plus polaires	
		(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
Rendzine modale (St-Martin-de-F.)																	
Lipides A	189	34	18	25	13	23	12	4	2	15	8	4	2	47	25	37	20
Lipides B	59	12	21	6	10	6	10	3	5	6	10	3	5	14	23	9	16
Lipides C	27	5	18	3	11	3	11	1	5	4	15	tr.	-	6	23	5	18
A + B + C	275	51	18	34	12	32	12	8	3	25	9	7	2	67	25	51	19
Sol lessivé glossique (St Sornin)																	
Lipides A	896	72	8	160	18	68	7	14	2	18	2	43	5	182	20	339	38
Lipides B	101	37	36	6	6	5	5	1	1	7	7	tr.	-	13	13	32	32
Lipides C	38	7	18	5	13	2	5	2	5	4	11	tr.	-	4	11	14	37
A + B + C	1 035	116	11	171	17	75	6	17	2	29	3	43	4	199	19	385	37

(1) Exprimés en mg/kg de terre séchée à 105°C

(2) Exprimés en p. cent des fractions neutres (A, B ou C)

Tableau 33 - Répartition des différentes familles de composés de la fraction neutre

	Total	Monoacides		Diacides		Cétoacides		Hydrooxydes		Plus polaires	
	(1)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
Rendzine modale St-Martin-de-F.											
Lipides A	241	116	48	15	6	2	1	22	9	86	36
Lipides B	195	80	41	15	8	2	1	21	11	77	39
Lipides C	65	24	37	4	6	tr.	-	9	14	28	43
A+B+C	501	220	44	34	7	4	1	52	10	191	38
Sol lessivé glossique St-Sornin											
Lipides A	1 706	348	20	81	5	38	2	140	8	1 099	65
Lipides B	248	67	27	13	5	4	2	6	3	158	63
Lipides C	99	22	22	12	12	4	4	5	5	56	57
A+B+C	2 053	437	21	106	5	46	2	151	7	1 313	64

(1) Exprimés en mg/kg de terre séchée à 105°C

(2) Exprimés en p. cent des fractions acides (A, B ou C)

Tableau 34 - Répartition des différentes familles de composés de la fraction acide

- soit à la présence de sels d'acides gras ;
- soit à l'adsorption de composés lipidiques sur le carbonate de calcium, phénomène mis en évidence par Suess (1970) ;
- soit à l'adsorption des lipides sur les colloïdes organo-minéraux du sol (composés humiques, hydroxyde de fer, argile) ;
- soit à un héritage : le résidu de décarbonatation de la roche calcaire contient environ 130 mg de lipides pour cent grammes de matière séchée à 105°C.

Par chromatographie sur colonne de silice, nous avons ensuite isolé les différentes familles de chaque fraction en fonction de leur polarité (Tableaux 33 et 34). Nous allons maintenant étudier en détail chacune d'elles en commençant par les familles issues de la fraction neutre.

1 - Hydrocarbures

Les hydrocarbures des sols sont presque exclusivement d'origine végétale. Ils sont ubiquistes dans les cires épicuticulaires où leur proportion peut varier considérablement (1 à 90 % selon Kolattukudy, 1980). Ce sont essentiellement des n-alcane avec une forte prédominance des chaînes impaires dont la longueur peut aller de C-21 à C-37 (Eglinton et Hamilton, 1967 ; Kolattukudy et Walton, 1973 ; Tulloch, 1976). Le plus souvent, un ou deux composés prédominent nettement. Parmi les composés majeurs les plus fréquemment observés, on peut citer l'alcane nC-29 rencontré par exemple dans les cires de pomme (Mazliak, 1963) et de colza (Kolattukudy et Walton, 1973), et l'alcane nC-31 que l'on trouve notamment dans les cires de pois (Kolattukudy, 1970).

Les hydrocarbures ramifiés sont aussi fréquemment présents dans les cires des végétaux supérieurs, mais en très faible quantité. Ils ne représentent une fraction majoritaire que dans des rares cas parmi lesquels on peut citer les feuilles de tabac (Kaneda, 1967, Kolattukudy, 1968).

Les plantes sont également susceptibles de fournir au sol des hydrocarbures cycliques variés. Par contre, les hydrocarbures aromatiques y sont présents en quantité négligeable (Meinschein, 1969).

D'une façon générale, une étude systématique dans divers types de sols a montré que la quantité d'hydrocarbures est plus importante dans les sols acides et surtout anaérobies.

Dans les sols étudiés ici, les hydrocarbures sont deux fois plus abondants en milieu acide qu'en milieu calcaire. Cependant, leur taux (exprimé en % de la fraction neutre) n'est pas très différent d'un sol à l'autre (Tableau 33, p. 62).

Types de sols	n-alcanes	Ramifiés et cycliques	Aromatiques
Rendzine modale Saint-Martin-de-Fraigneau	41,7	28,0	30,3
Sol lessivé glossique Saint-Sornin 3	68,5	31,5	traces

Tableau 35 - Abondance relative des différentes familles d'hydrocarbures présentes dans les lipides A des sols (%)

Parmi les hydrocarbures libres, nous avons pu distinguer (Tableau 35) :

- des hydrocarbures aromatiques isolés par chromatographie sur couche mince et caractérisés par leur forte absorption en ultra-violet. Plusieurs familles sont présentes, comme le montre le chromatogramme obtenu par chromatographie liquide à haute pression (détecteur 260 nm) (Figure 25).

Figure 25

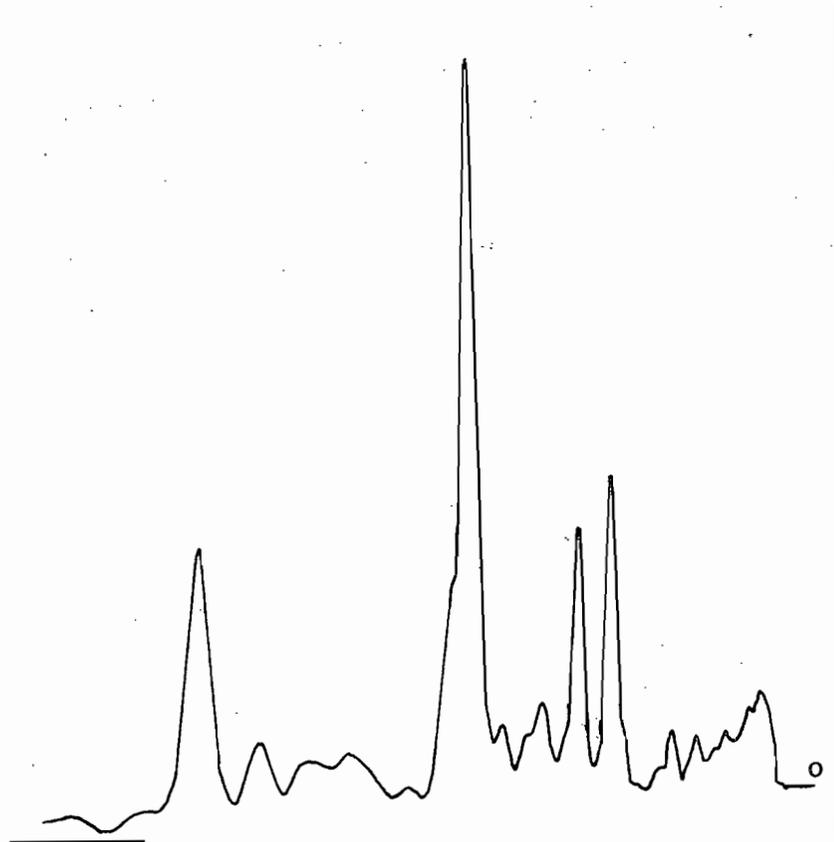
Chromatogramme (HPLC) des hydrocarbures aromatiques.

Colonne Lichasorb 10 RP 18

Eluant Me OH - H₂O (90-10)

Débit 1 ml/mn⁻¹

Détecteur UV 260 nm



- des n-alcanes que l'on sépare des hydrocarbures ramifiés et cycliques par inclusion sur tamis moléculaires.

Les hydrocarbures aromatiques ne sont bien représentés que dans la rendzine où ils peuvent avoir deux origines différentes :

- soit hérités du calcaire : en effet, dans les sédiments, des hydrocarbures aromatiques apparaissent au cours de la diagenèse précoce de produits naturels tels que les terpènes (Tissier et Spyckerelle, 1977) ;
- soit d'origine anthropique : les travaux de Windsor et Hites (1978) ont montré que les hydrocarbures aromatiques des sols (par exemple, le chrysène) peuvent correspondre, dans certaines régions, à une pollution par les gaz d'échappement de voitures et les fumées d'usines. D'après ces mêmes auteurs, de tels composés peuvent aussi résulter de la pyrolyse de la matière organique lors des feux de brousse ou de forêt. Dans la Plaine vendéenne, on allume quelquefois des feux après les moissons pour brûler les pailles.

Quant aux hydrocarbures ramifiés et cycliques présents dans la même proportion dans les deux sols, certains pourraient avoir une origine microbienne (Clark et Blumer, 1967 ; Han et Calvin, 1969). D'autre part, nous avons identifié par chromatographie en phase gazeuse la présence de pristane. Celui-ci existe dans les deux sols et correspondrait à un produit dérivé de la chaîne phytyle de la chlorophylle (Brooks et al., 1969).

Enfin, en ce qui concerne les n-alcanes, nous avons identifié les différents constituants des fractions A et B par chromatographie en phase gazeuse (Figure 26).

La répartition des n-alcanes de la fraction libre A reste très proche de celle que l'on trouve dans les plantes supérieures avec une prédominance classique :

- des chaînes impaires sur les chaînes paires
- des constituants en C-29 et C-31.

Le fait que le composé majoritaire ne soit pas exactement le même dans les deux sols tient certainement à la nature de la végétation qui diffère d'un milieu à l'autre.

Dans la fraction liée B, on retrouve les mêmes alcanes à longue chaîne. A côté de ceux-ci, on note la présence de composés plus courts (C-16 à C-22), parmi lesquels il n'apparaît pas de discrimination entre chaînes paires et impaires. En conséquence, le CPI (*) des n-alcanes courts est voisin de l'unité tandis que celui des alcanes à longue chaîne est nettement plus élevé. D'autres auteurs ont également relevé la présence de tels hydrocarbures courts dans les sols (Butler et al., 1964). Stevenson (1966), puis Jones (1970) considèrent, en s'appuyant sur les travaux de Oro et al. (1965) que ces mélanges à CPI très faible sont représentatifs de l'activité microbienne. Dans le cas présent, au contraire, ils sont mieux représentés dans le sol acide où l'activité biologique est réduite. L'origine de ces composés n'apparaît donc pas évidente et reste à déterminer.

() Le CPI (Carbon Preferential Index) est défini par la formule suivante (Cooper et Bray, 1963) :

$$\frac{\Sigma \text{ alcanes impairs}}{\Sigma \text{ alcanes pairs}}$$

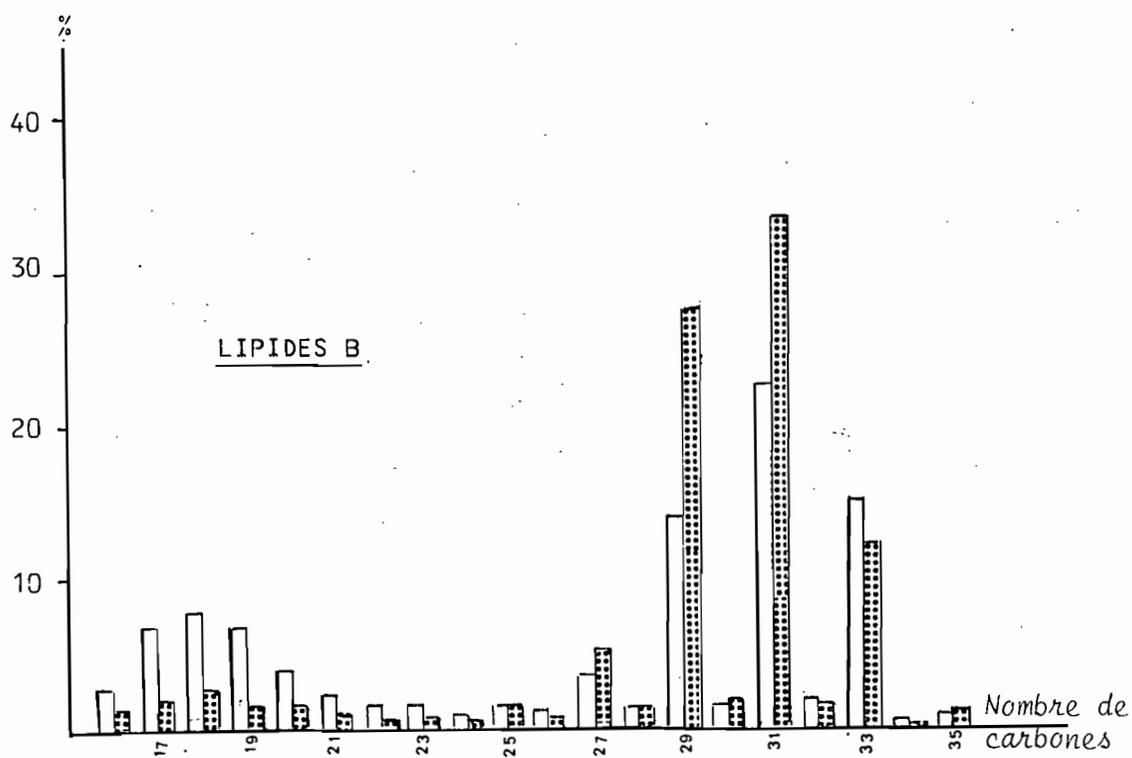
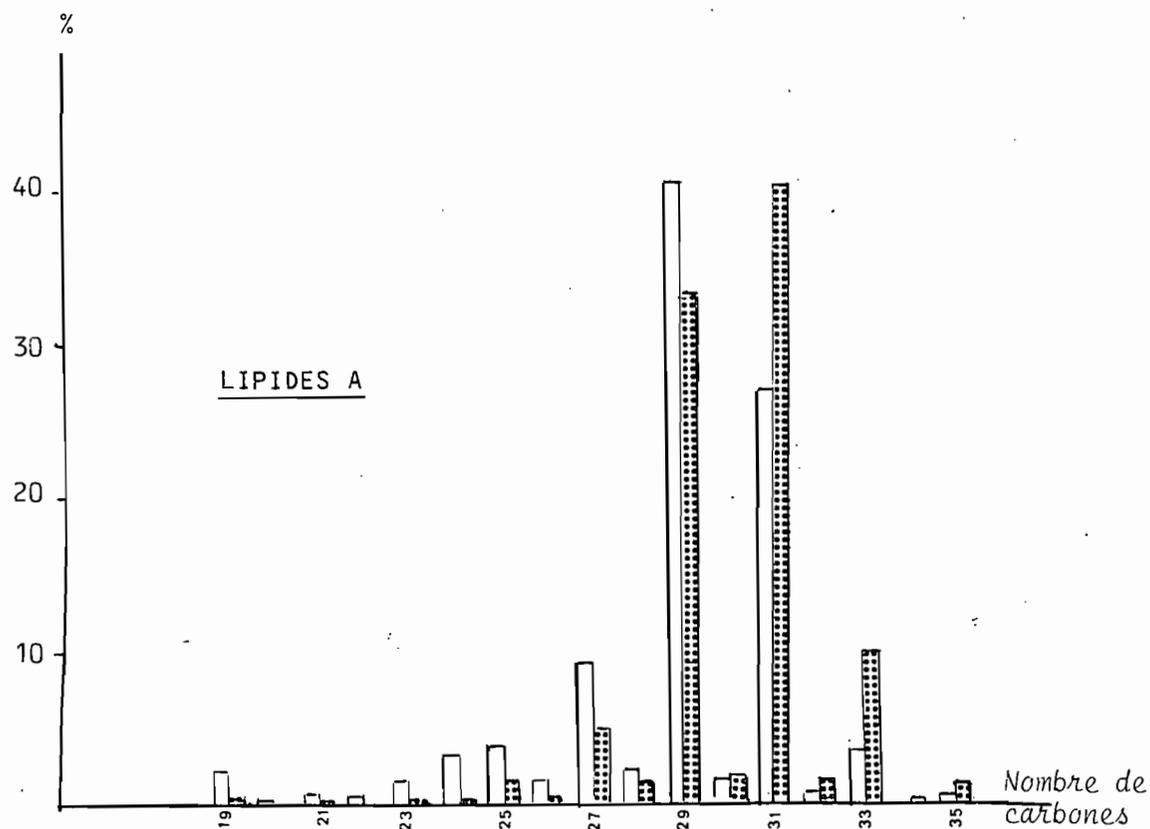


Figure 26 - Histogrammes de répartition des hydrocarbures linéaires
 □ sol lessivé glossique (Saint-Sornin 3)
 ▒ rendzine modale (Saint-Martin-de-Fraigneau)

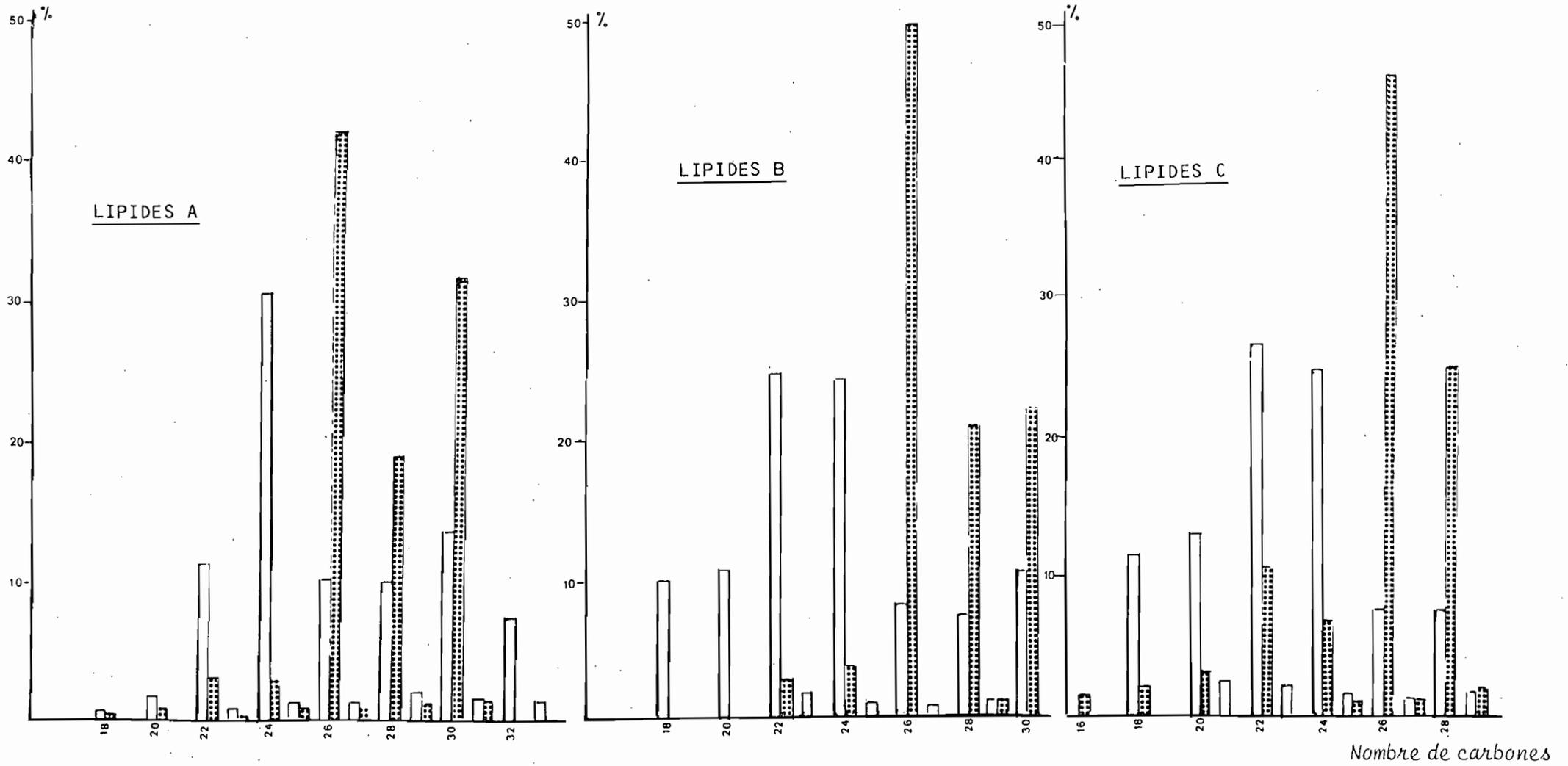


Figure 27 - Histogrammes de répartition des alcools aliphatiques libres

sol lessivé glossique (St-Sornin 3)
 rendzine modale (St-Martin-de-Fraigneau)

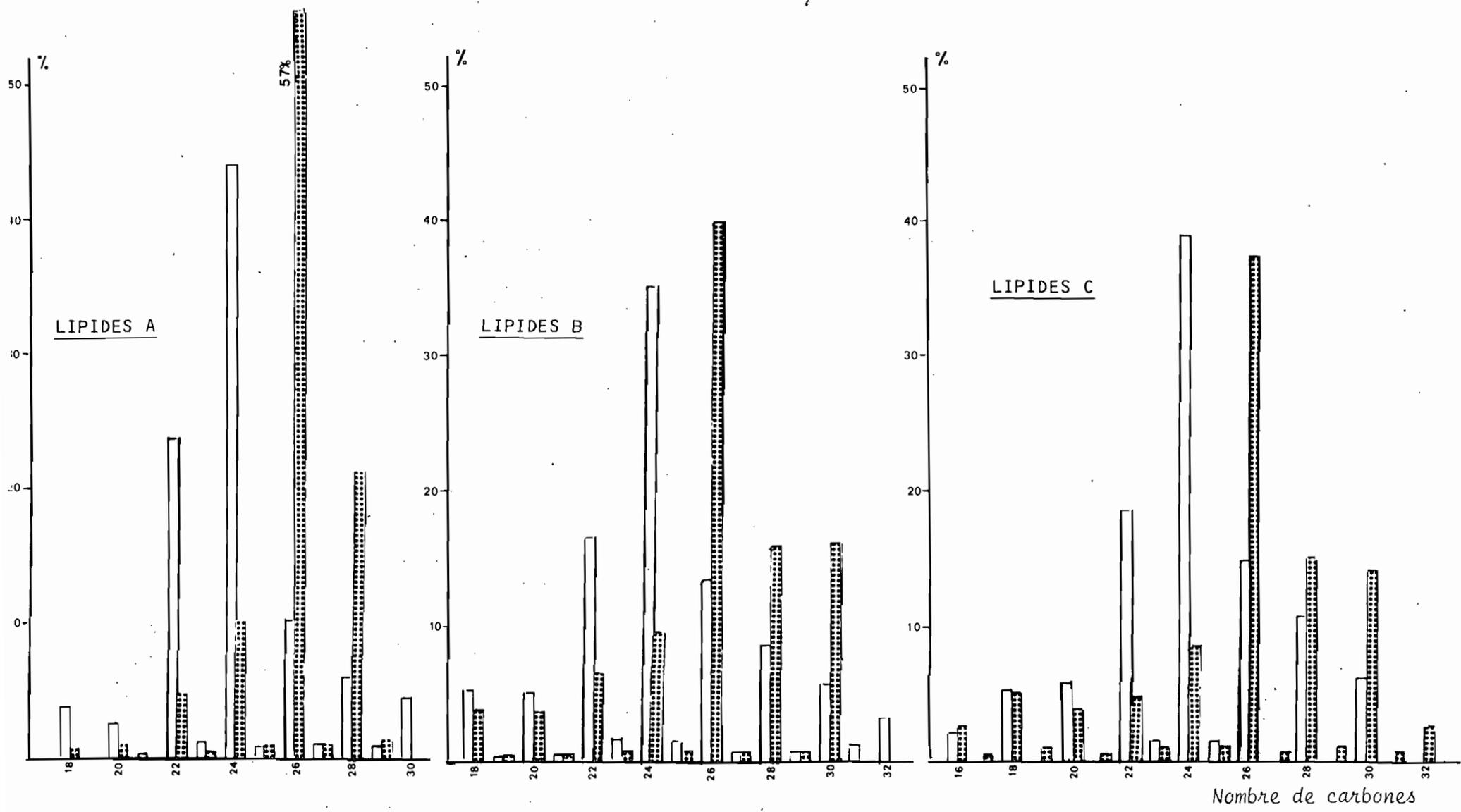


Figure 27bis - Histogrammes de répartition des alcools liés aux esters longs

sol lessivé glossique (Saint-Sornin 3)
 rendzine modale (St-Martin-de-Fraigneau)

2 - Alcools aliphatiques libres ou combinés

Les alcools aliphatiques rencontrés dans le sol peuvent en partie être directement hérités des plantes supérieures où ils se trouvent soit à l'état libre, soit combinés à des acides gras dans les cires (esters longs). Ce sont généralement des composés saturés dont le nombre d'atomes de carbone est pair et compris entre C-22 et C-30 avec une prédominance des composés en C-26 et C-28. La distribution des alcools libres et combinés est sensiblement la même (Kolattukudy, 1980).

Les alcools primaires rencontrés dans le sol peuvent également résulter :

- de la biooxydation terminale des hydrocarbures qui conduit à des alcools impairs ;
- de la réduction enzymatique des acides gras en alcools pairs (Kolattukudy, 1975).

Dans les sols étudiés, les alcools libres et combinés aux acides gras sont bien représentés. Ils sont trois à cinq fois plus abondants dans le sol lessivé glossique que dans la rendzine. La majeure partie de ceux-ci correspond à des alcools aliphatiques dont nous avons étudié la distribution (Figure 27 et 27 bis).

Dans la rendzine, on observe la même répartition pour les alcools libres et les alcools combinés. Cette répartition est tout-à-fait semblable à celle décrite plus haut concernant les végétaux supérieurs.

Dans le sol lessivé glossique, on constate également une grande analogie entre la répartition des alcools non combinés, d'une part, et combinés aux esters longs, d'autre part. Cependant, la distribution des alcools linéaires est très différente de celle observée dans la rendzine. D'une façon générale, on note une nette augmentation des composés courts (jusqu'à C-18), notamment dans les lipides B et C, et un maximum en C-22 ou C-24 alors que, dans la rendzine, l'alcool en C-26 est toujours majoritaire. Cette répartition des alcools est très proche de celle obtenue par Fustec *et al.* (1981) à partir d'un horizon A₁ de podzol des Landes du Médoc, bien que la végétation soit cependant très différente d'un milieu à l'autre :

- Forêt de chataigniers pour le sol lessivé glossique
- Forêt de pins maritimes avec une sous-végétation d'éricacées pour le podzol.

On peut se demander si les alcools pairs que l'on rencontre dans ces sols acides ne résultent pas, pour partie au moins, de la réduction enzymatique des acides gras.

3 - Monoacides

Dans le sol, les monoacides sont soit à l'état libre, soit à l'état combiné sous forme d'esters et de glycérides.

a - Monoacides non combinés

Leur origine est multiple. Ils peuvent, en effet, résulter de transformations diverses telles que :

- oxydation de composés moins oxygénés ;
- hydrolyse enzymatique d'esters et de glycérides ;
- biosynthèse à partir de composés non lipidiques

Par ailleurs, une grande partie des monoacides peut être héritée des plantes dans lesquelles près de 300 acides gras différents ont été identifiés, la plupart n'étant représentée que dans quelques espèces (Hitchcock et Nichols, 1971).

Par contre, la nature des acides gras des tissus foliaires est remarquablement constante d'une plante à l'autre : sept composés différents compris entre C-12 et C-18 y représentent de 89 à 97 p. cent des acides gras totaux (Harwood, 1980). Par rapport à ceux des tissus, les monoacides des cires végétales ont des chaînes plus longues (entre C-12 et C-36) ; seulement 10 % de ceux-ci sont à l'état non combiné (Martin et Juniper, 1970 ; Tulloch, 1976). Ce sont des composés saturés ou insaturés dont la chaîne carbonée n'est pas ramifiée et est constituée d'un nombre pair d'atomes de carbone ; en effet, les acides branchés sont très rares dans les plantes et sont plutôt produits par les microorganismes (Harwood, 1980).

Dans les sols de la séquence étudiée, les monoacides libres (Tableau 34, p. 63), comme les hydrocarbures, sont deux fois plus abondants en milieu acide qu'en milieu calcaire. Mais leur taux exprimé en p. cent de la fraction acide des lipides est deux fois plus élevé dans la rendzine que dans le sol lessivé glossique. Dans le sol calcaire, où l'activité biologique est intense, il y a certainement une forte hydrolyse enzymatique des glycérides et surtout des esters longs (Tableau 33, p. 62). En effet, le rapport monoacides non combinés/monoacides combinés (esters longs + triglycérides) passe de 2,2 en milieu acide à 3,7 en milieu calcaire.

La figure 28 montre que la répartition des divers composés n'est pas fondamentalement différente d'un sol à l'autre. Dans les deux cas, les acides longs (> C-20), essentiellement d'origine végétale (cires), représentent plus de 90 p. cent de la fraction libre A, alors que ces mêmes acides sont minoritaires dans les fractions liées B et C. Les monoacides à longue chaîne tendent donc à rester à l'état libre. C'est l'inverse pour les monoacides courts (< C-20) qui sont en grande partie d'origine microbienne, mais peuvent également provenir des végétaux. Cette liaison pourrait leur permettre de persister plus longtemps dans le sol car d'après Dastillung et Ourisson (1977), les monoacides courts des sédiments se conservent mieux à l'état lié qu'à l'état libre. Parmi ces composés à chaîne courte (Tableau 36), l'acide nC-16:0 (acide palmitique) est toujours dominant. Il en est de même dans les sédiments (Dastillung et Ourisson, 1977). En effet, celui-ci est omniprésent dans les microorganismes (Shorland, 1963 ; Gunstone, 1967).

Comme nous le verrons plus loin, les acides gras insaturés se décomposent rapidement dans les sols acides comme dans les sols neutres. Mais il n'en est pas de même pour les acides saturés dont la dégradation est très ralentie en milieu acide.

Dans les sols étudiés ici, contrairement à ce que l'on pourrait attendre, le rapport nC-18:1/nC-18:0, qui est de 0,3 dans la rendzine, atteint 1,0 dans le sol lessivé glossique (Tableau 37). En effet, le taux d'acide oléique (exprimé en p. cent des monoacides) est le suivant :

	Lipides A	Lipides B	Lipides C
Rendzine modale	0,9	6,6	4,9
Sol lessivé glossique	2,1	10,9	5,5

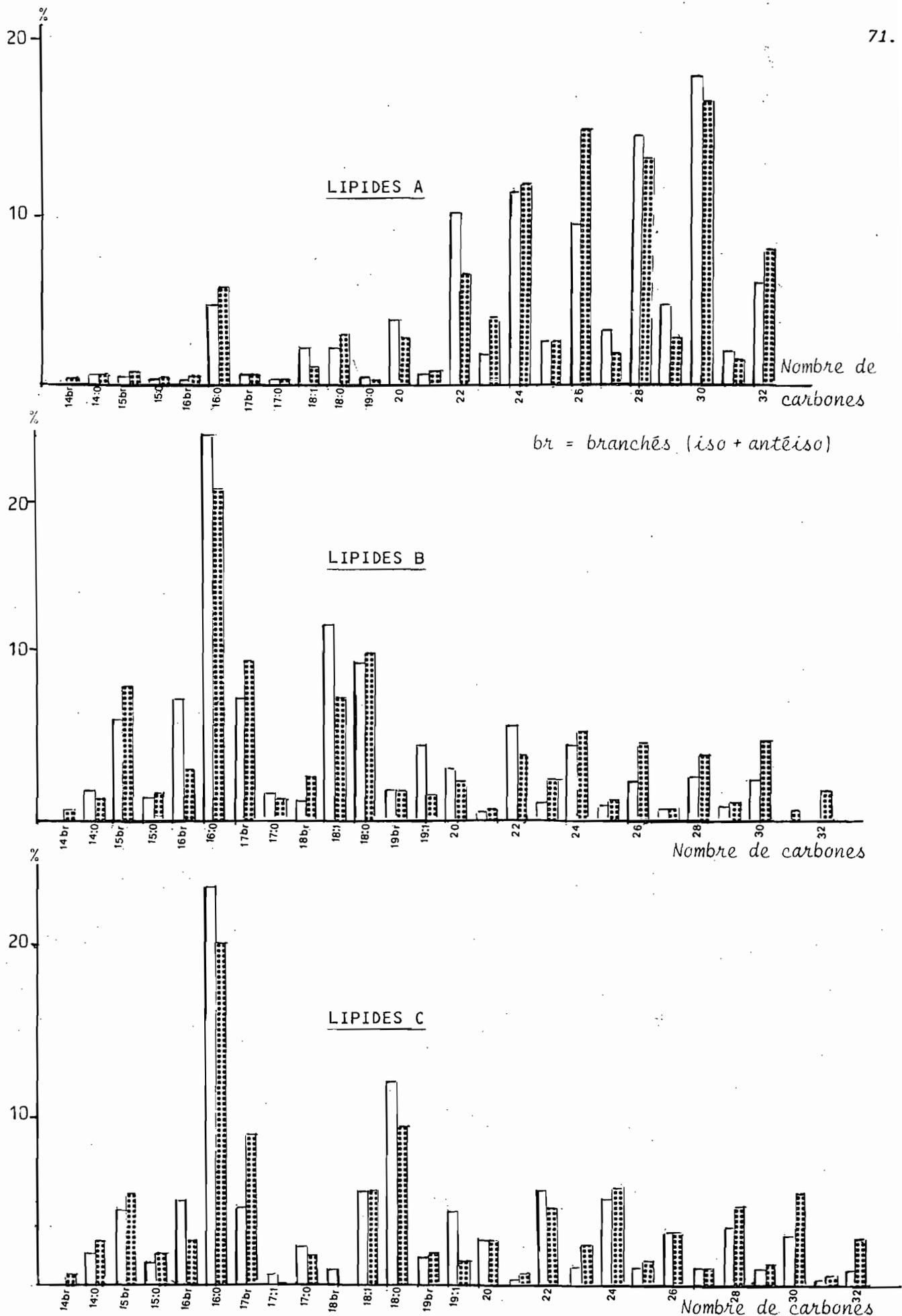


Figure 28 - Histogrammes de répartition des monoacides non combinés
 Sol lessivé glossique (Saint-Sornin 3)
 Rendzine modale (Saint-Martin-de-Fraigneau)

On constate qu'au niveau des lipides libres A, la teneur en nC-18:1 est nettement plus élevée dans le sol lessivé glossique que dans la rendzine. Comme la vitesse de biodégradation de cet acide n'est pas différente d'un sol à l'autre, on peut supposer que la microflore fongique, proportionnellement plus importante dans le sol acide, est à l'origine de la présence en quantité plus importante de n-C18:1 dans ce sol.

En ce qui concerne les lipides liés B et C, on observe toujours une quantité d'acide oléique plus importante en milieu acide qu'en milieu neutre. Par contre, si l'on détermine la proportion relative d'acides courts branchés (C-15 + C-17), caractéristiques de l'activité bactérienne, dans les monoacides liés B et C, on obtient :

	Lipides B	Lipides C
- Rendzine modale	16 %	13 %
- Sol lessivé glossique	12,5 %	11 %

Il apparait donc que la somme des acides gras branchés est plus élevée dans la rendzine (où l'activité bactérienne est intense) que dans le sol lessivé glossique.

b - Monoacides combinés

. Aux esters longs

On estime généralement que les esters formés entre des monoacides gras et des alcools gras se rencontrent essentiellement dans les cires des végétaux. Les monoacides des esters longs des plantes se distribuent de C-20 à C-30 et sont généralement saturés (Kolattukudy et Walton, 1973).

Dans les sols de Vendée, les esters longs sont surtout bien représentés en milieu acide (ils y sont cinq fois plus abondants que dans la rendzine) où, comme nous venons de le voir, leur hydrolyse enzymatique serait réduite.

Les monoacides correspondants (Figure 29) semblent avoir une origine double. Les composés linéaires dont le nombre de carbone est égal ou supérieur à C-20 seraient d'origine végétale ; parmi eux l'acide en C-22 domine dans le sol lessivé glossique. Il en est de même dans la rendzine où les monoacides en C-20 et C-26 sont quelquefois aussi importants.

Les composés à chaîne plus courte (quelquefois branchés) seraient d'origine microbienne. Ils représentent 31,5 % des monoacides de la fraction libre A dans la rendzine et seulement 20 % de celle-ci dans le sol lessivé glossique, où l'activité biologique est plus faible. Seuls les monoacides en C-16 et C-18 sont bien représentés dans les deux sols. Le premier domine en milieu acide tandis que le second est majoritaire en milieu calcaire. On peut se demander si le processus inverse de l'hydrolyse enzymatique (estérification enzymatique des alcools longs) n'est pas à l'origine de cette accumulation d'acides courts dans les esters.

. Aux triglycérides

Les triglycérides, constituants importants de la matière vivante, sont très répandus dans les végétaux, surtout dans les graines (Gurr, 1980), où cinq monoacides prédominent (C-16:0, C-18:0, C-18:1, C-18:2 et C-18:3). Par contre, on ne les trouve pas dans les bactéries (Shaw, 1974).

	C-14 br	n C-14	C-15 br	n C-15	C-16 br	n C-16	C-17 br	n C-17	C-18 br	n C-18:1	n C-18:0	C-19 br	n C-19
Rendzine modale St-Martin-de-F.													
Lipides A	0,19	0,59	1,03	0,43	0,51	5,79	0,65	0,30	-	1,01	3,43	-	0,21
Lipides B	0,49	1,31	5,81	1,18	2,25	14,23	6,90	0,93	1,94	5,31	7,27	1,30	1,06
Lipides C	0,16	0,56	1,17	0,41	0,56	4,22	1,89	0,36	-	1,18	1,96	0,41	0,28
A + B + C	0,84	2,46	8,01	2,02	3,32	24,24	9,44	1,59	1,94	5,50	12,66	1,71	1,55
Sol lessivé glossique St-Sornin 3													
Lipides A	-	1,62	1,61	0,96	0,82	15,22	3,30	0,92	-	7,34	7,42	0,32	1,41
Lipides B	-	1,15	3,82	0,90	4,56	14,28	4,58	1,07	0,76	7,35	5,89	1,19	2,85
Lipides C	-	0,43	0,98	0,29	1,12	5,18	1,45	0,62	0,21	1,21	2,62	0,37	0,96
A + B + C	-	3,20	6,41	2,15	6,50	34,68	9,33	2,61	0,97	15,90	15,93	1,88	5,22

Résultats exprimés en mg/kg de terre séchée à 105°C
br = branchés (iso + antéiso)

Tableau 36 - Distribution pondérale des monoacides courts non combinés.

	Monoacides non combinés	Monoacides liés aux esters longs	Monoacides liés aux triglycérides
Rendzine modale St-Martin-de-F.			
Lipides A	0,3	-	0,7
Lipides B	0,7	-	1,6
Lipides C	0,6	0,4	4,1
Sol lessivé glossique St-Sornin 3			
Lipides A	1,0	-	0,6
Lipides B	1,2	-	4,0
Lipides C	0,5	1,2	9,0

Tableau 37 - Comparaison du rapport acide oléique/acide stéarique des divers monoacides.

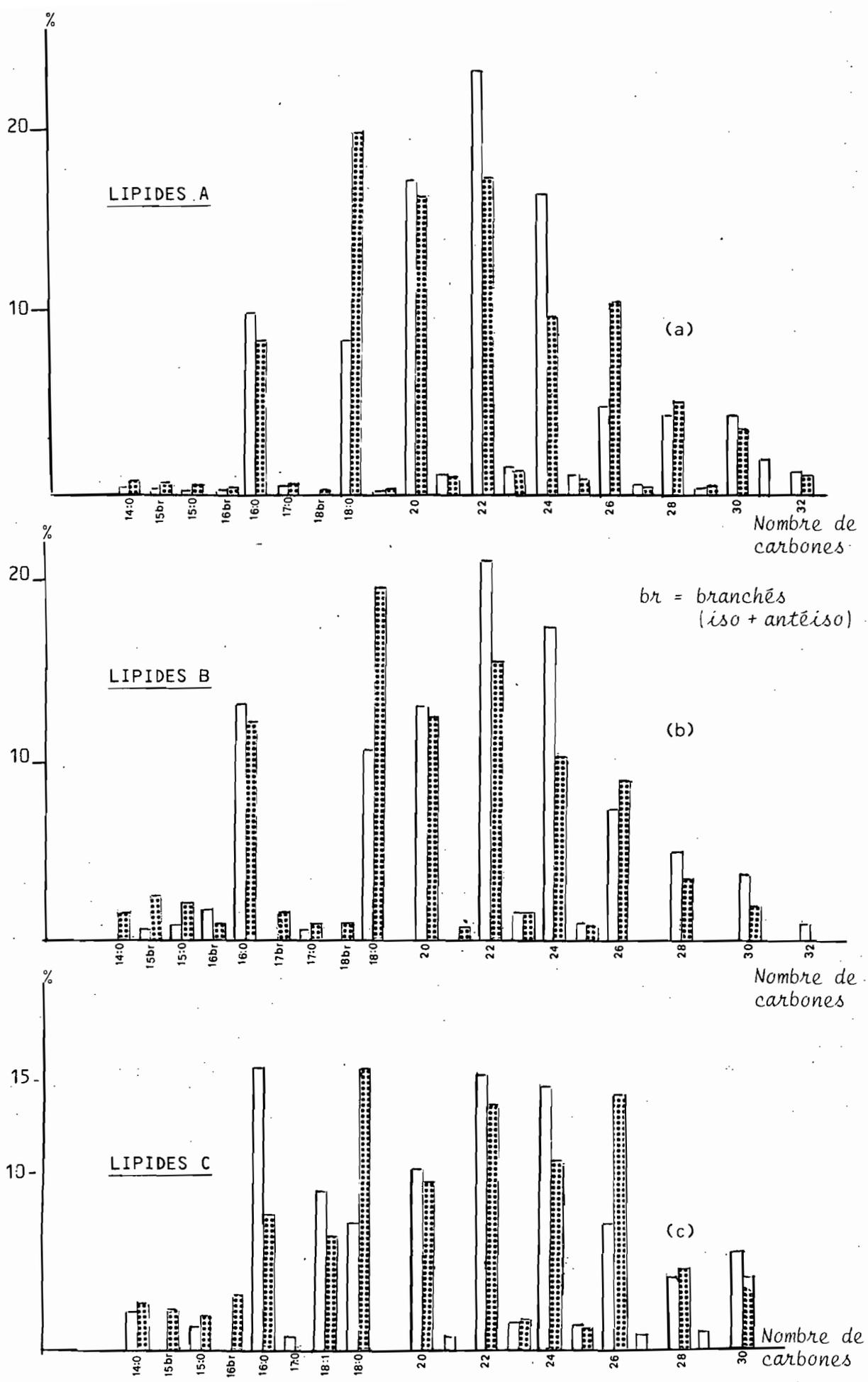


Figure 29 - Histogrammes de répartition des monoacides combinés aux esters longs.
Sol lessivé glossique (Saint-Sornin)
Rendzine modale (St-Martin-de-Fraigneau)

D'après les travaux de Ladrat (1978), les triglycérides sont biosynthétisés par la population fongique des sols et dans ce cas également, les acides gras associés au glycérol sont essentiellement des acides courts (C-16 C-18) plus ou moins insaturés.

Ces triglycérides sont présents en quantité sensiblement égale dans les deux sols étudiés. Mais ils représentent 9 p. cent de la fraction neutre en milieu calcaire et seulement 3 p. cent en milieu acide, bien que ce dernier soit proportionnellement plus riche en champignons.

Parmi les monoacides libérés par hydrolyse des triglycérides, les monoacides à longues chaînes (> C-20) ne sont présents en quantité importante que dans la fraction libre A (Figure 30) et surtout en milieu acide, où ils représentent 57 p. cent des monoacides combinés aux triglycérides libres (contre seulement 22 p. cent dans la rendzine).

Ces observations semblent indiquer qu'il y a effectivement une production très importante de triglycérides dans le sol lessivé glossique. Comme l'hydrolyse enzymatique porte essentiellement sur les triglycérides à acides gras courts, il en résulte une accumulation de triglycérides à acides gras longs.

Parmi les monoacides courts (< C-20), seuls trois composés sont présents en quantité importante (Tableau 38). Ce sont : C-16:0 (acide palmitique), C-18:0 (acide stéarique) et C-18:1 (acide oléique). D'après les études effectuées par ailleurs au laboratoire, ces acides sont toujours très abondants dans les triglycérides des sols. L'acide palmitique est plus abondant dans la rendzine que dans le sol lessivé glossique ; on observe l'inverse au niveau des esters longs. Parmi les acides en C-18, l'acide oléique est particulièrement abondant dans les fractions liées et surtout dans la fraction C. En effet, selon Wang et al. (1969), l'hydrolyse des triglycérides liés aux argiles libérerait beaucoup d'acides insaturés car le traitement fluorhydrique doit rompre les complexes π entre les acides insaturés et les argiles des sols.

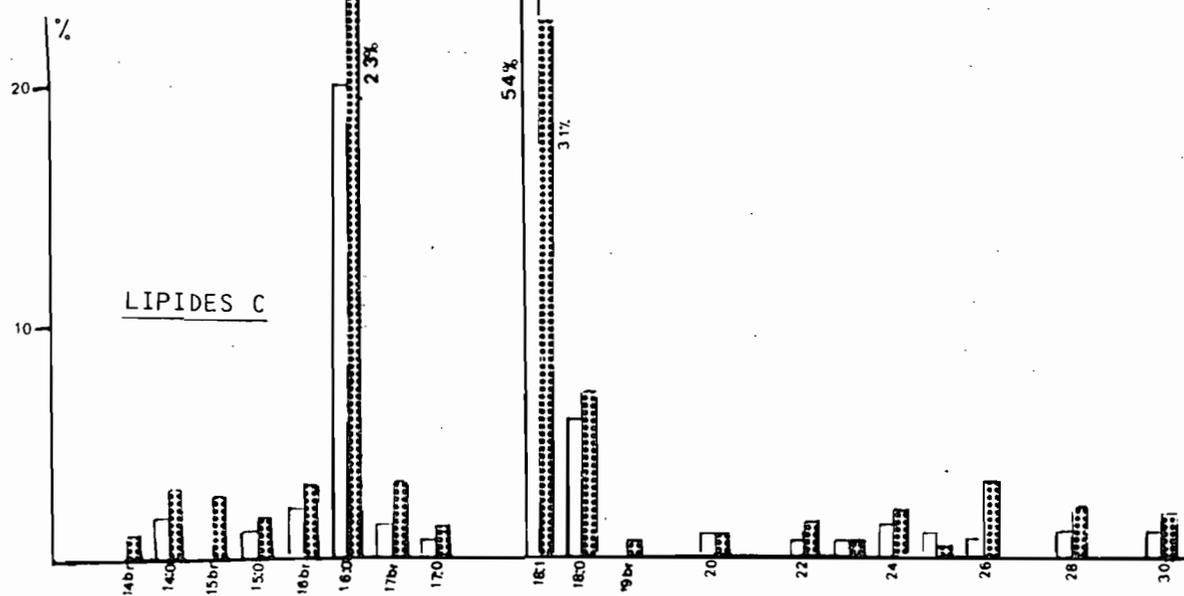
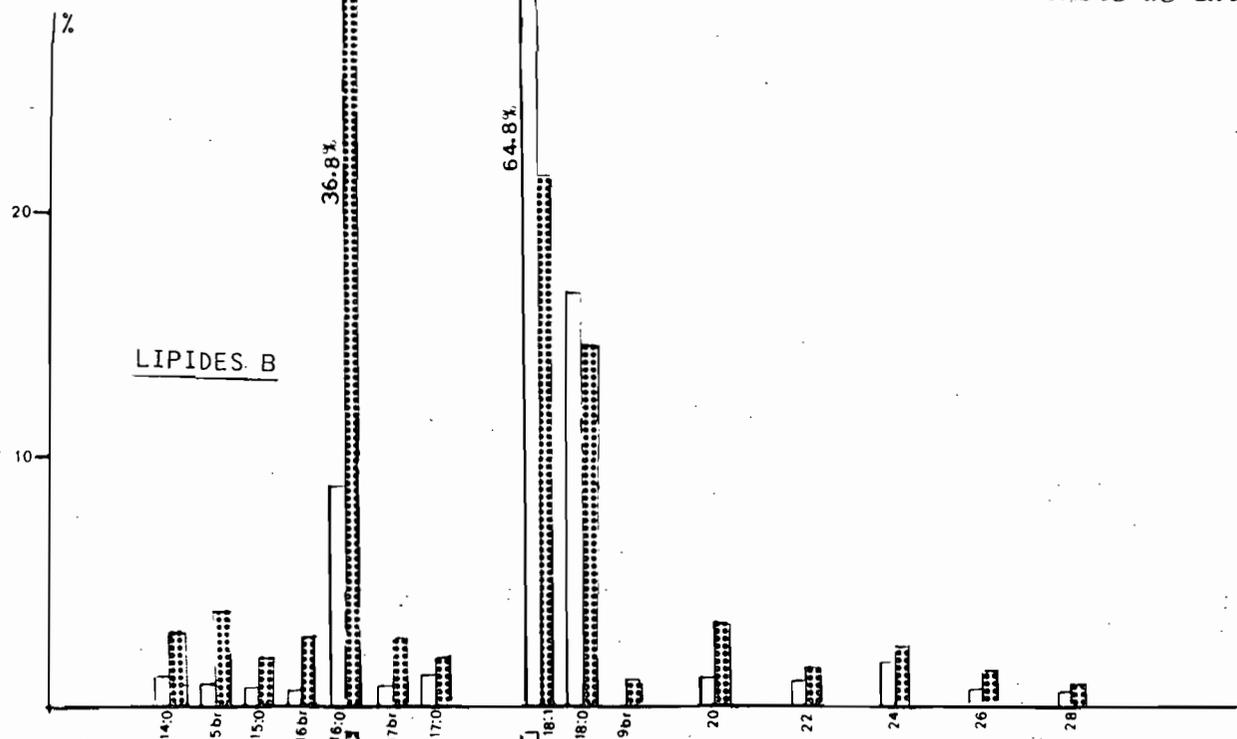
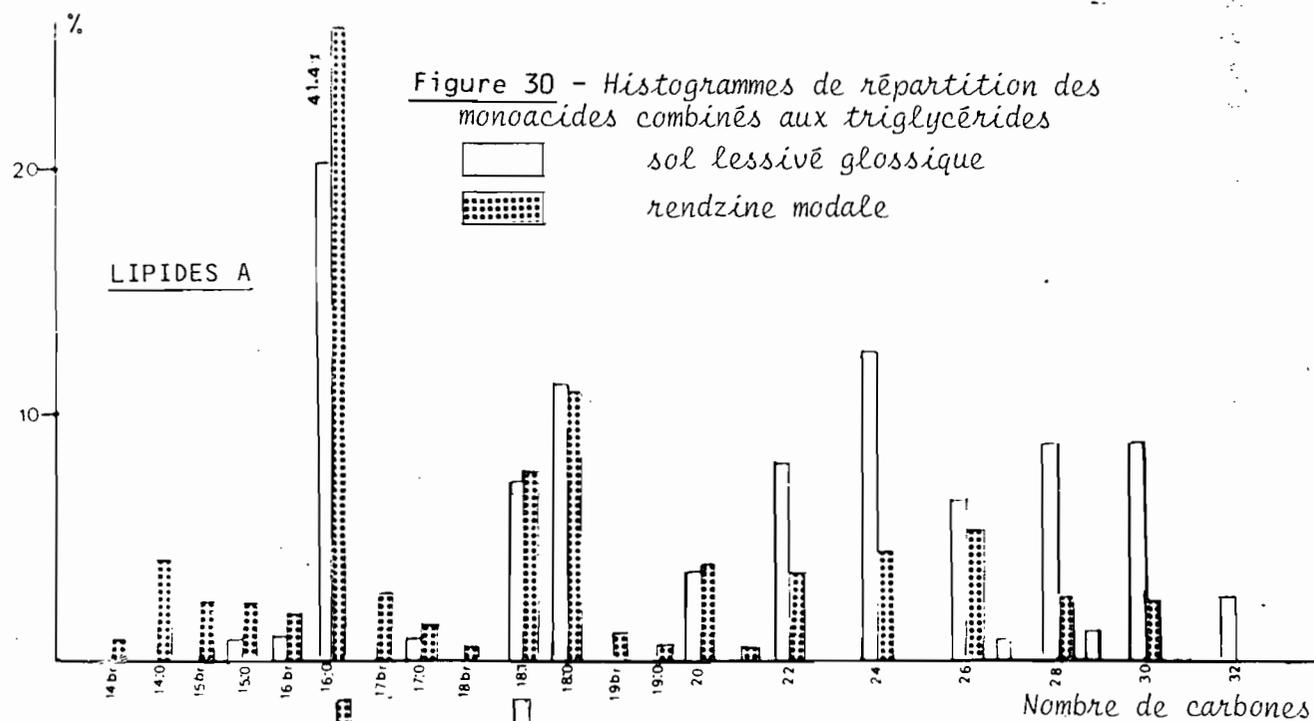
Enfin, comme nous l'avons déjà remarqué en étudiant les acides non combinés, la proportion d'acide oléique par rapport à l'acide stéarique augmente dans le sol acide, proportionnellement plus riche en champignons (Tableau 37, p. 73).

	n C-14	C-15br	n C-15	C-16br	n C-16	C-17br	n C-17	n C-18:1	n C-18:0	C-19br
Rendzine modale St-Martin-de-F.										
Lipides A	0,44	0,22	0,24	0,18	3,95	0,29	0,13	0,68	1,00	0,11
Lipides B	0,15	0,25	0,12	0,16	1,92	0,19	0,12	1,08	0,69	0,09
Lipides C	0,11	0,10	0,08	0,12	0,71	0,13	0,06	0,95	0,23	0,03
A + B + C	0,70	0,57	0,44	0,46	6,58	0,61	0,31	2,71	1,92	0,23
Sol lessivé glossique St-Sornin 3										
Lipides A	-	-	0,11	0,09	2,96	-	0,10	1,03	1,62	-
Lipides B	0,06	0,04	0,05	0,04	0,51	0,03	0,07	3,69	0,91	-
Lipides C	0,08	-	0,06	0,09	0,72	0,07	0,03	1,95	0,22	-
A + B + C	0,14	0,04	0,17	0,22	4,19	0,10	0,20	6,67	2,75	-

Exprimés en mg/kg de terre séchée à 105°C
br = branchés (iso + antéiso)

Tableau 38 - Distribution pondérale des monoacides courts liés aux triglycérides.

Figure 30 - Histogrammes de répartition des monoacides combinés aux triglycérides
sol lessivé glossique
rendzine modale



4 - Diacides

La proportion des diacides est en relation avec l'activité microbienne des sols (Ladrat, 1978 ; Fustec-Mathon et al., 1978). Il s'agirait de métabolites microbiens résultant de la biooxydation des monoacides. Ils sont surtout abondants dans les sols acides, plus riches en champignons que les sols neutres. Cela se vérifie ici où le rapport monoacides/diacides passe de 4,1 en milieu acide, à 6,5 en milieu calcaire.

5 - Composés plus polaires de la fraction acide (Tableau 34, p. 63)

On peut être en présence soit de composés plus oxygénés que ceux des autres familles de la fraction neutre, soit de composés plus ou moins polymérisés.

Remarquons que ces substances sont surtout bien représentées dans le sol lessivé glossique où nous avons identifié, par ailleurs, les acides humiques les plus polymérisés.

C - CONCLUSION

On voit que les lipides des sols dérivent, pour une bonne part, des organes protecteurs des végétaux supérieurs (cires épicuticulaires). Ils peuvent également être d'origine microbienne et même anthropique. Si l'on compare les lipides de la rendzine à ceux du sol lessivé glossique, on observe d'abord des différences d'ordre quantitatif. En effet, en milieu neutre, l'abondance des cations échangeables (et surtout du calcium) active les lipases du sol (Pancholy et Lynd, 1973). En conséquence, le taux de lipides augmente en milieu désaturé. Cette augmentation porte principalement sur les fractions acides et polaires. De plus, comme les substances humiques, les lipides sont beaucoup moins liés aux colloïdes organo-minéraux du sol en milieu acide.

Par ailleurs, les lipides à longue chaîne (> C-20) étant essentiellement hérités des végétaux supérieurs, la nature des composés dominants varie d'un sol à l'autre en fonction de la végétation. Ce type de lipides se lie moins facilement aux colloïdes organo-minéraux que ceux à chaîne plus courte qui sont en grande partie d'origine microbienne. Parmi ces derniers, les composés insaturés s'associent préférentiellement aux argiles. Il doit donc se former des complexes π entre ces lipides et les colloïdes minéraux.

Notons, enfin, que le processus de minéralisation des lipides est certainement important en milieu neutre. Mais dans le sol acide, où l'activité biologique est réduite, on observe surtout des phénomènes de biotransformations qui conduisent à des lipides plus oxygénés tels que les diacides (ou des composés plus polaires).

TROISIEME PARTIE

=====

ETUDE EXPERIMENTALE DE L'EVOLUTION DE LA MATIERE ORGANIQUE DU SOL

ET DE QUELQUES-UNS DE SES CONSTITUANTS

Nous avons vu dans les paragraphes précédents que la teneur en carbone organique total, la nature et la répartition des divers constituants de l'humus (au sens large) varient d'un ensemble de sols à l'autre. Ces variations correspondent à l'équilibre dynamique qui s'établit dans chaque cas entre les apports continuels de résidus organiques (végétaux ou animaux) et leurs transformations ininterrompues sous l'influence des facteurs physico-chimiques et biologiques du milieu.

Certaines transformations ne peuvent être clairement mises en évidence qu'expérimentalement après modification de l'équilibre naturel par suppression des apports ou, au contraire, par addition de substances connues dont on suit l'évolution au cours du temps.

C'est ainsi que nous avons pu suivre au laboratoire les phénomènes de minéralisation du carbone organique total, de la cellulolyse et la lipidolyse. Nous avons également incorporé dans les différents humus des débris ligneux et déterminé leur évolution pour préciser dans chaque cas l'intensité de la ligninolyse.

CHAPITRE I : MINÉRALISATION DU CARBONE ORGANIQUE TOTAL ET CELLULOLOSE

A - LA MINÉRALISATION DU CARBONE ORGANIQUE TOTAL

Le gaz carbonique dégagé par le sol résulte soit de la respiration des microorganismes telluriques, soit de la décarboxylation de divers substrats sous l'effet des enzymes du sol (Dommergues, 1968). Sa quantité dépend de la teneur de la matière organique en carbone immédiatement minéralisable et aussi de la teneur en carbone organique total susceptible de devenir facilement minéralisable au cours de l'incubation (Bachelier, 1968). Beaucoup d'auteurs considèrent que le volume de gaz carbonique dégagé par le sol, en un temps donné, constitue un bon indice d'évaluation de son activité biologique (Pochon et de Barjac, 1958 ; Dommergues, 1960 ; Pochon et Tardieu, 1962 ; Bachelier, 1968 ; Dommergues et Mangenot, 1970). Cependant, la quantité de gaz carbonique dégagé ne présente de valeur comparative réelle que si on la rapporte à la teneur en carbone organique total du sol (Dommergues, 1960).

Etant donné que l'intensité des processus de minéralisation peut varier dans le temps en fonction du pédoclimat, de l'activité de la microflore et de la qualité des substances organiques, nous avons travaillé à partir d'échantillons de sols prélevés à différentes périodes de l'année. Les échantillons ont été maintenus à l'humidité de prélèvement et mis à incuber à 28°C pendant quatre semaines. En effet, nous pensons que la température n'est pas un facteur de différenciation comme cela est le cas pour l'humidité du sol.

L'ensemble des résultats est donné dans les tableaux 39 et 40 et la figure 31.

Sols	Janv.	Mars	Mai	Juil.	Sept.	Nov.
Rendzine modale (St-Martin-de-Fraigneau)	0,46	0,78	0,44	0,65	0,29	0,93
Sol lessivé rubéfié (Nalliers 1)	0,72	1,45	0,77	0,78	0,29	1,53
Sol lessivé glossique (Saint-Sornin 3)	0,65	0,89	0,90	0,91	0,60	0,90

Résultats exprimés en mg C-CO₂ dégagé par g de carbone organique total
Année 1980.

Tableau 39 - Taux de minéralisation journalier expérimental du carbone organique total des horizons A₁ ou Ap.

Sols	Janv.	Mars	Mai	Juil.	Sept.	Nov.	Σ
Rendzine modale (St-Martin-de-F.)	13,0	22,0	12,4	18,3	8,3	26,1	100,1
Sol lessivé rubéfié (Nalliers 1)	20,2	40,8	21,6	22,1	8,1	43,0	155,8
Sol lessivé glossique (St-Sornin 3)	18,4	24,9	25,3	25,6	16,9	25,4	136,5

Résultats exprimés en mg C-CO₂ dégagé par g de carbone organique total
28 jours d'incubation à 28°C - Année 1980

Tableau 40 - Taux de minéralisation expérimental par mois du carbone organique total des horizons A₁ ou Ap.

Taux de minéralisation
du C organique total
(%)

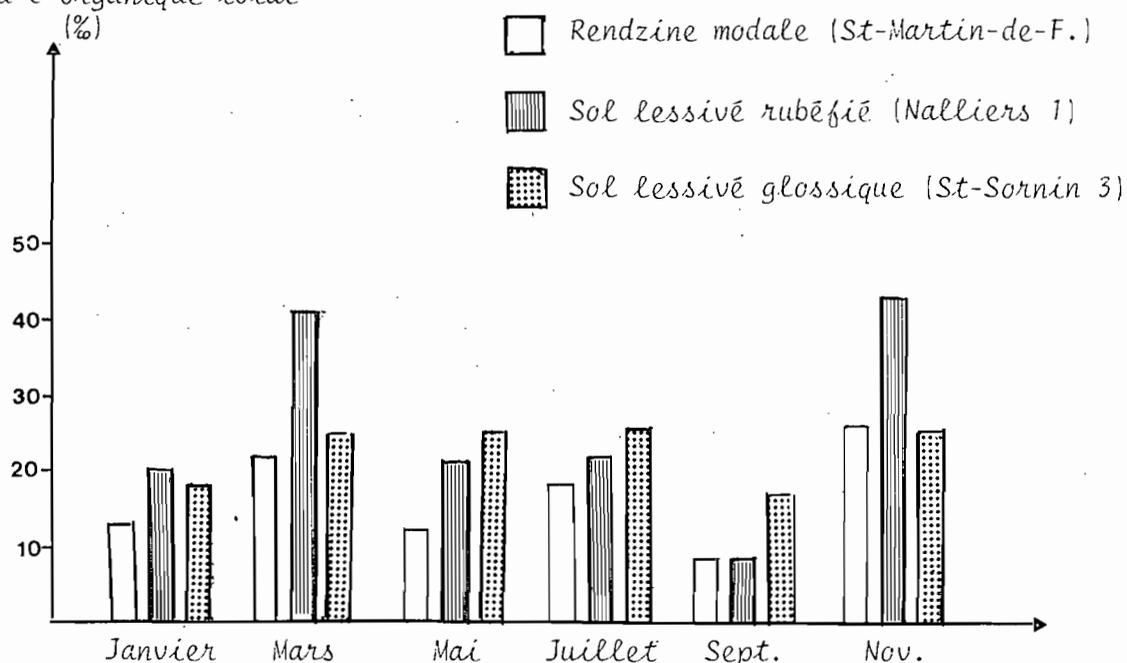


Figure 31 - Variation saisonnière du taux de minéralisation du carbone organique total. 28 jours d'incubation à 28°C. Année 1980.

En examinant ces tableaux, on constate que le taux de minéralisation du carbone organique subit des variations en fonction des saisons de prélèvement et du type de sol.

1 - Variations saisonnières du taux de minéralisation

Si le taux moyen de minéralisation du carbone organique total du mull-moder (sol lessivé glossique) reste relativement constant au cours de l'année, ce n'est pas le cas pour les deux autres sols.

Dans le cas du sol lessivé glossique sous forêt, on peut imputer l'absence de fluctuations majeures à l'"effet couvert" évoqué par Billès *et al.* (1975) : la végétation arborescente ralentit l'évaporation et évite toute dessiccation excessive du sol. Nous avons vu par exemple que, tout le long de l'année 1980, la teneur en eau de l'horizon humifère du sol lessivé glossique se maintient entre pF 3 et pF 2,5 (Tableaux 2 p. 13 et 4 p. 14) ; compte-tenu du fait que les essais ont été maintenus à l'humidité de prélèvement, l'"effet couvert" persiste même en conditions expérimentales.

Par contre, les deux autres sols (rendzine modale et sol lessivé rubéfié) subissent des phases de dessiccation poussée. Ainsi, en 1980, l'humidité de l'horizon Ap a atteint le point de flétrissement permanent (pF 4,2) en mai et septembre. On note alors un ralentissement très marqué des processus de minéralisation. On observe l'effet inverse au cours de la phase de réhumectation qui suit (novembre). Il semble donc que l'activité minéralisatrice dépende beaucoup de l'humidité du sol : il apparaît une relation linéaire entre le taux de minéralisation du carbone et la teneur en eau de l'horizon humifère (Figure 32). La corrélation est très significative en ce qui concerne la rendzine modale et le sol lessivé rubéfié ; elle est lâche pour le sol lessivé glossique.

Taux de minéralisation du C
organique total (%)

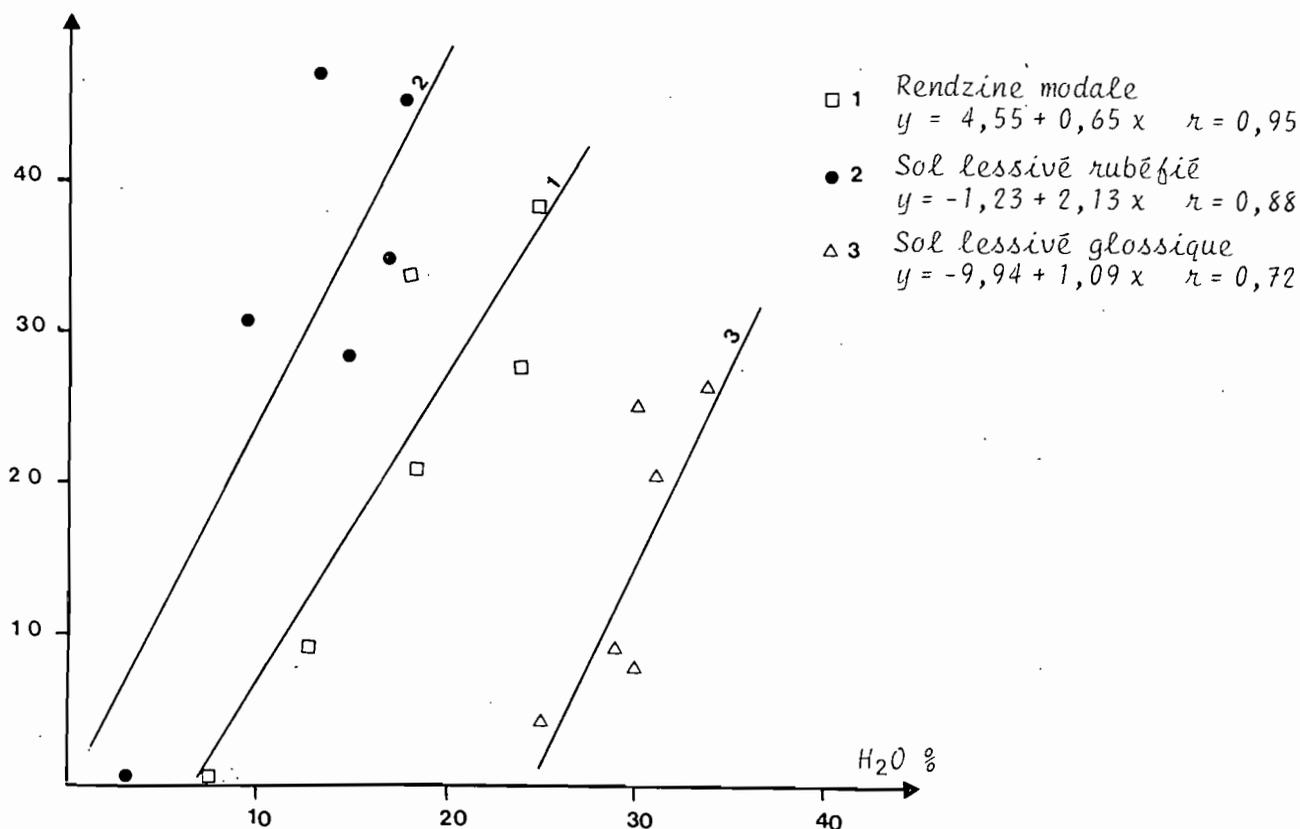


Figure 32 - Variation du taux de minéralisation du carbone organique total en fonction de l'humidité du sol.

Quelques points s'écartent cependant des droites de régression, montrant que d'autres phénomènes interviennent. On observe, en particulier, un minimum de minéralisation en hiver (janvier) lié au ralentissement de l'activité microbienne sous l'effet du froid. Avec un réchauffement printanier (mars), l'activité microbienne se trouve stimulée et la minéralisation du carbone devient alors très intense.

Au total, en accord avec Toutain (1974), on remarque que les contrastes saisonniers sont beaucoup plus marqués dans les mulls que dans le moder. Dans le cas présent, il est certain que les contrastes saisonniers des mulls seraient un peu moins importants s'ils se trouvaient en milieu forestier, comme le moder.

2 - Variations en fonction du type de sol

Quelle que soit la période de prélèvement, nous constatons généralement que le taux de minéralisation est minimum au niveau de la rendzine. Cela tient à plusieurs raisons :

- D'une part, la présence de calcaire qui est susceptible d'enrober la matière organique du sol ; l'effet stabilisant du calcium qui sature les groupements COOH et OH phénoliques des substances humiques limite l'activité minéralisatrice des microorganismes (Froment, 1971 ; Jacquin et Merlet, 1975 ; Chouliaras, 1976 ; Le Tacon, 1976 ; Linères, 1977).

- D'autre part, la quantité de gaz carbonique dégagé est sous-estimée car il se forme des bicarbonates en milieu calcaire (Jacquin et Chouliaras, 1976).

X L'activité minéralisatrice observée à partir du mull-moder (sol lessivé glossique) est légèrement supérieure à celle que l'on obtient à partir du mull calcaire. Remarquons cependant que dans ces sols, l'horizon A₁ contient beaucoup de débris végétaux peu transformés et facilement métabolisables. Lorsqu'on les place en conditions optimales, on observe alors une minéralisation supérieure à celle du sol en place (Cornfield, 1959).

Enfin, c'est dans les sols lessivés rubéfiés à mull acide, dotés d'une microflore diversifiée et efficace, que l'on observe le taux de minéralisation le plus élevé. C'est pour cette raison que l'on note, à ce niveau de la séquence, le taux de carbone organique total le plus faible.

Au total, le test d'incubation généralement admis comme un bon critère de détermination de la minéralisation potentielle de la matière organique du sol (Duchaufour, 1953 ; Bachelier, 1968) est cependant discutable dans le cas des sols cultivés (Harmsen et Van Schreven, 1955) car lorsque ceux-ci ont une bonne activité biologique, les substances facilement métabolisables ont souvent été minéralisées avant la mise en incubation. Malgré cela, dans la séquence de sols étudiés ici, qui comporte à la fois des sols forestiers et des sols cultivés, on constate, en accord avec Duchaufour et Jacquin (1975), que la minéralisation du carbone atteint son maximum dans les milieux intermédiaires, de type mull modérément acide.

B - LA CELLULOLYSE

La cellulolyse est une étape importante en raison des masses considérables de cellulose restituées chaque année au sol par la végétation.

Pour mettre en évidence l'activité cellulolytique, nous avons utilisé des disques de cellulose sans cendres, de 9 cm de diamètre (Durieux n° 111, sans graisses). Ces disques pesés avant la mise en place, ont été disposés horizontalement dans des échantillons de sols entre deux treillis de nylon destinés à faciliter la récupération. Après quatre semaines d'incubation à 28°C, nous les avons séchés et pesés à nouveau. La cellulolyse est exprimée comme le pourcentage de perte en poids des disques durant leur séjour dans le sol.

Les résultats obtenus sont portés dans le tableau 41 et la figure 33. On constate que l'intensité de la cellulolyse peut subir des variations importantes.

1 - Variations saisonnières

Certaines variations observées au cours de l'année dépendent des mêmes facteurs que la minéralisation du carbone organique total. Ainsi, la cellulolyse est minimum en période d'assèchement du sol (mai et septembre) et intense en période de réhumectation (novembre). Là encore, on observe une corrélation linéaire entre le taux de perte en cellulose et la teneur en eau des horizons humifères (Figure 34). Cette corrélation est très significative au niveau de la rendzine (sol mince à réserve en eau réduite) et plus lâche au niveau des deux sols lessivés.

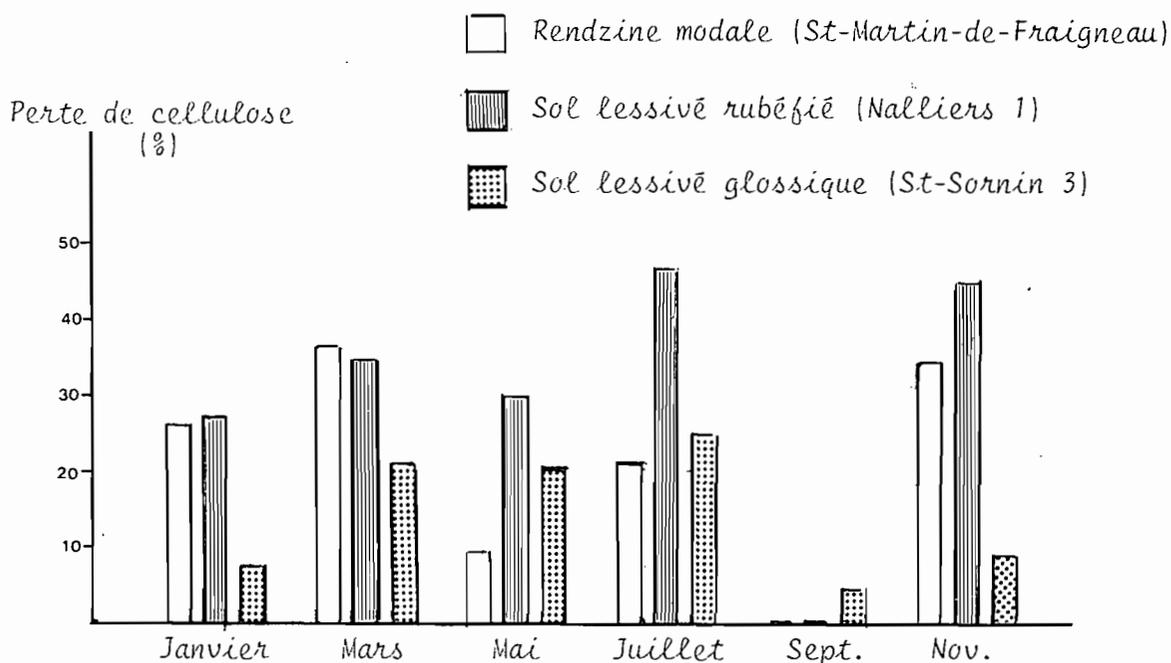


Figure 33 - Variation saisonnière de la cellulolyse (année 1980)

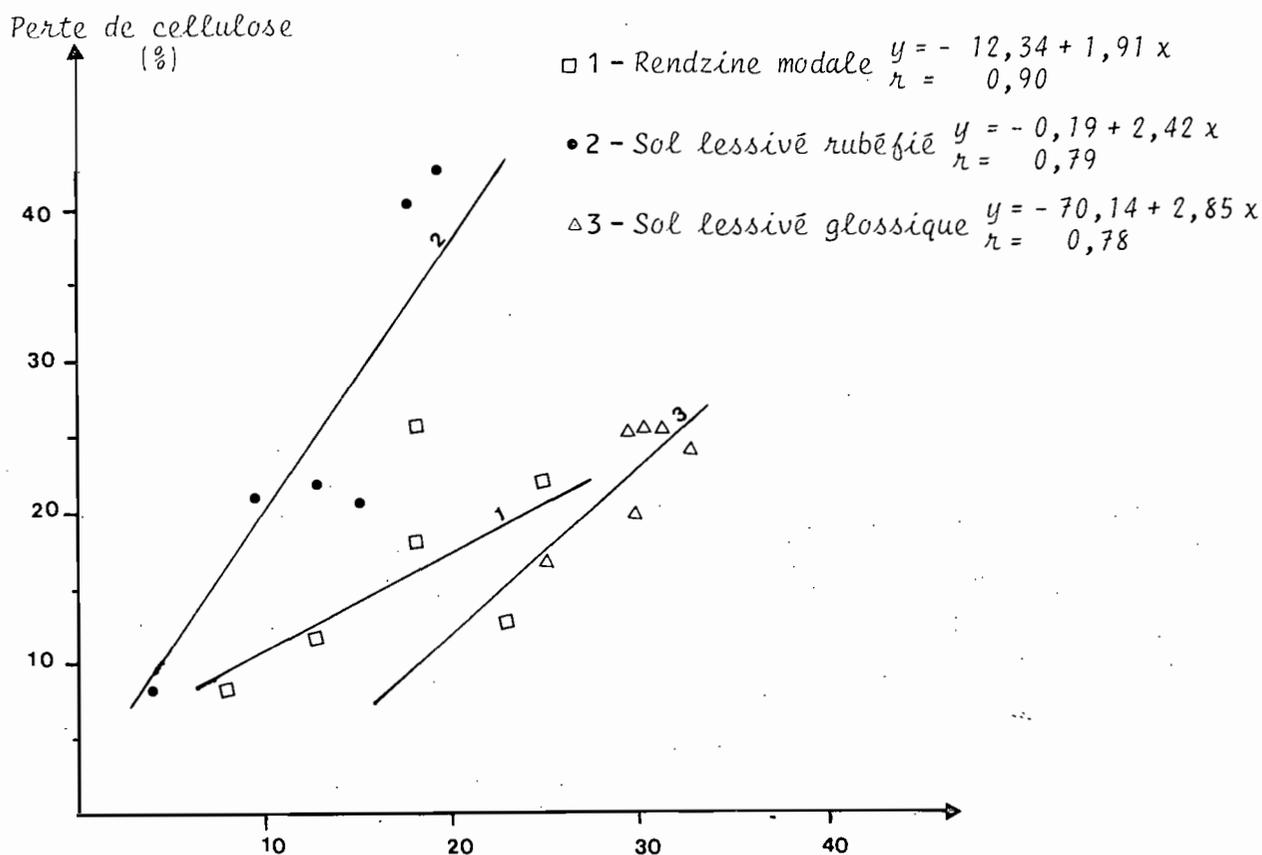


Figure 34 - Variation de l'activité cellulolytique en fonction de l'humidité du sol.

Sols	Janv.	Mars	Mai	Juil.	Sept.	Nov.	Σ
Rendzine modale (St-Martin-de-F.)	26,5	36,3	9,8	21,0	0	34,0	127,6
Sol lessivé rubéfié (Nalliers 1)	27,6	34,7	30,4	47,0	0	44,5	184,2
Sol lessivé glossique (St-Sornin 3)	7,4	26,0	20,6	25,0	4,5	8,8	92,3

Tableau 41 - Perte de poids en p. cent de disques de cellulose incubés 28 jours, à 28°C à l'humidité de prélèvement et à différentes périodes de l'année (1980).

En comparant les tableaux 40 et 41, on remarque que la dessiccation affecte plus fortement l'activité cellulolytique que la minéralisation du carbone organique total.

Par ailleurs, en ralentissant l'activité microbienne, le froid (janvier) affecte également la cellulolyse. Celle-ci est ensuite exacerbée en période de reprise de l'activité biologique (mars). Notons également qu'au niveau des mulls, le froid affecte moins la cellulolyse que la minéralisation du carbone organique total. C'est l'inverse au niveau du moder.

2 - Variations en fonction du type de sol

La cellulolyse, tout comme la minéralisation du carbone organique total, est maximum au niveau du mull acide (sol lessivé rubéfié). L'activité cellulolytique décroît ensuite au niveau de la rendzine. C'est cependant dans ce type de sol que Robert *et al.* (1964) ont trouvé un nombre de germes cellulolytiques élevé. Mais Kiffer et Mangenot (1968) constatent que la dégradation de la cellulose n'est pas proportionnelle à l'activité biologique du sol. Enfin, ces mêmes auteurs, comparant l'activité cellulolytique d'une rendzine à celle d'un sol brun lessivé, observent, comme nous pouvons le faire ici, que la dégradation de la cellulose se ralentit en milieu calcaire.

Par ailleurs, la cellulolyse décroît également au niveau du moder (sol lessivé glossique) où elle est minimum. Il en est toujours ainsi dans ce type d'humus, car un milieu acide et désaturé est défavorable à l'activité cellulolytique (Dommergues et Mangenot, 1970). En fait, dans certains sols à moder, la limitation de la cellulolyse serait surtout due à une carence en azote ou en phosphore (Kong et Dommergues, 1970).

Au total, l'activité cellulolytique dépend de la température et de l'humidité du milieu. Dans les sols à mull, la cellulolyse varie comme la minéralisation du carbone organique total ; mais, dans les sols à moder, elle est davantage freinée par les facteurs limitants que la minéralisation du carbone organique total.

CHAPITRE II : DEGRADATION DES LIPIDES

La majeure partie des lipides du sol provient des résidus végétaux ; une faible part seulement est biosynthétisée par les microorganismes (Jambu et al., 1978). L'accumulation des lipides dans certains sols dépend du type de végétation et de l'intensité des synthèses microbiennes. L'aptitude des microorganismes à dégrader ces composés est d'une grande importance. Le taux de biodégradation doit dépendre de la structure chimique de ces composés et des conditions du milieu. De plus, l'effet inhibiteur de certains lipides sur le développement des microorganismes doit également affecter leur aptitude à décomposer ces substances (Fustec-Mathon et al., 1975, 1977).

Avant d'examiner la biodégradation des lipides totaux extraits des plantes, il apparaît nécessaire d'étudier la dégradation de substances pures. La première partie de notre étude concerne la décomposition des hydrocarbures.

A - BIOOXYDATION DES HYDROCARBURES

Jusqu'à présent, la dégradation des hydrocarbures a été surtout étudiée dans des sols ou des eaux polluées par des huiles ou des boues résiduaires (Davies et Hughes, 1968 ; Jobson et al., 1972 ; Antoniewski et Schaefer, 1972 ; Oudot, 1975 ; Dibble et Bartha, 1979.a, b, c). Ce sont des mélanges complexes qui contiennent des taux variés de composés asphaltiques et aromatiques à côté d'hydrocarbures saturés. Dans ces polluants, la distribution des n-alcane est approximativement gaussienne, avec un maximum allant de C-12 à C-25 et sans préférence marquée entre les chaînes à nombre de carbones pair et impair.

Dans le milieu naturel, la situation doit être différente car il y a un apport régulier d'hydrocarbures ; ceux-ci sont principalement issus des cuticules où l'on trouve un mélange de n-alcane, avec une prédominance importante des chaînes à nombre de carbones impair, généralement en C-29 et C-31 (Kolattukudy et Walton, 1972). L'étude de la biodégradation de produits chimiquement purs dans les sols de la séquence a été entreprise pour évaluer leur taux d'accumulation en fonction de la longueur des chaînes carbonées et des divers facteurs du milieu (Mouçawi et al., 1981).

A partir des résultats obtenus, nous avons estimé :

- le coefficient de minéralisation du carbone (C.M.C.)

$$\text{C.M.C. des témoins} = \frac{C - CO_2}{C \text{ sol}} \times 1000$$

$$\text{C.M.C. des échantillons traités} = \frac{C - CO_2}{C \text{ sol} - C \text{ substrat}} \times 1000$$

- le taux de décomposition du substrat incorporé :

$$\% = \frac{(C - CO_2 \text{ traitement}) - (C - CO_2 \text{ témoin})}{C \text{ substrat}} \times 100$$

On sait que cette estimation peut n'être qu'approchée dans la mesure où l'addition d'un substrat peut parfois induire une stimulation ou une inhibition de la minéralisation du carbone préexistant dans les sols.

1 - Effet de l'insaturation des chaînes carbonées

Nous avons comparé la vitesse de biodégradation d'un hydrocarbure saturé en C-18 (octadécane) et celle de l'oléfine correspondante (1-octadécène).

Les résultats sont portés sur la figure 35 et le tableau 42.

Ces résultats montrent que le dégagement de CO₂ s'accroît fortement après addition d'hydrocarbures saturés ou insaturés à la rendzine et au sol lessivé rubéfié, qui ont une forte activité biologique et un humus de type mull. L'effet est beaucoup moins important dans le sol lessivé glossique où apparaît un humus proche du moder.

Le taux de dégradation des hydrocarbures saturés et insaturés est sensiblement le même dans les deux sols à mull, mais on observe une légère différence dans le sol lessivé glossique, où l'oléfine se dégrade un peu moins que l'hydrocarbure saturé correspondant. Par contre, Klug et Markovetz (1967) ont constaté que la dégradation des oléfines obtenue à partir de cultures pures de microorganismes, reste inférieure à celle des composés saturés.

Le sol lessivé rubéfié est le plus actif. Il en était déjà ainsi pour la cellulolyse et la minéralisation du carbone endogène. Remarquons cependant que ces hydrocarbures à chaîne courte sont relativement bien dégradés même dans le sol lessivé glossique nettement acide.

Sols	Témoin		Octadécane		Octadécène	
	C organ. total*	C.M.C.	C.M.C.	%	C.M.C.	%
Rendzine modale Saint-Martin-de-Fraigneau	2,67	19,2	31,7	22,7	32,2	23,4
Sol lessivé rubéfié Nalliers 1	1,35	17,3	51,1	31,9	51,8	32,3
Sol lessivé glossique Saint-Sornin 3	5,70	11,9	17,2	19,5	16,4	16,4

* Exprimé en % de la terre séchée à 105°C

Tableau 42 - Décomposition d'hydrocarbures saturé (C-18:0) et insaturé (C-18:1) dans les divers sols. Coefficient de minéralisation du carbone (C.M.C.) et estimation du taux de substrat dégradé (%), après 4 semaines d'incubation à 28°C.

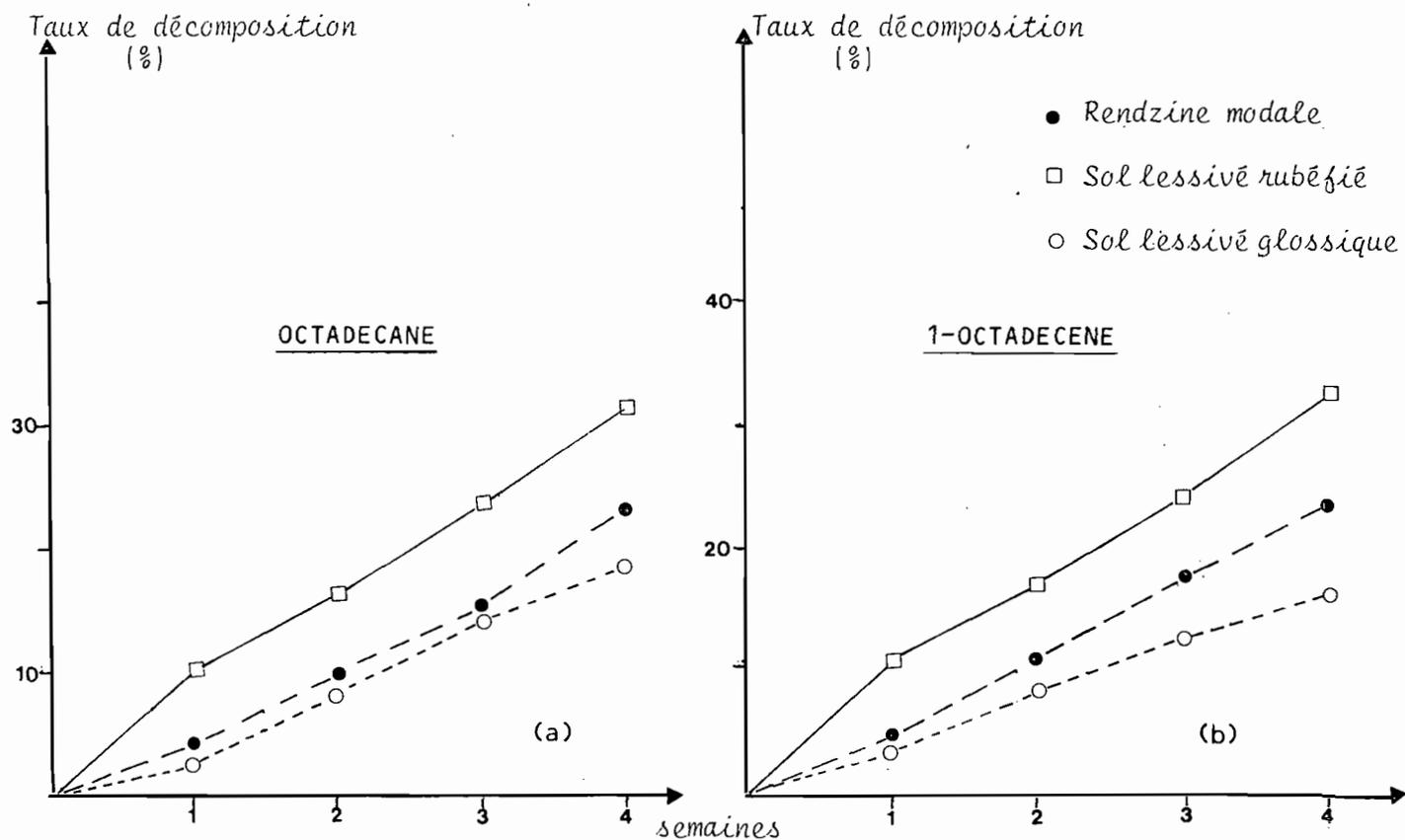


Figure 35.a et b - Estimation du taux de décomposition (%) d'hydrocarbures saturé (nC-18:0) et insaturé (nC-18:1) dans les divers sols de la séquence après 4 semaines d'incubation à 28°C.

2 - Effet de la longueur des chaînes carbonées

Dans ces essais, nous avons comparé l'évolution des n-alcanes C-19 (nonadécane), C-22 (docosane), C-28 (octacosane) et C-32 (dotriacontane). Les résultats obtenus sont portés sur la figure 36 et le tableau 43.

Sols	Témoin		Nonadécane (C-19)		Docosane (C-22)		Octacosane (C-28)		Dotriacontane (C-32)	
	C.org.* total	C.M.C.	C.M.C.	%	C.M.C.	%	C.M.C.	%	C.M.C.	%
Rendzine modale St-Martin-de-F.	2,43	17,9	52,1	54,0	49,8	50,6	42,4	39,1	45,2	43,3
Sol lessivé rubéfié (Nalliers 1)	1,23	15,6	65,0	42,2	63,3	40,8	57,6	36,1	57,9	36,3
Sol lessivé glossique (St-Sornin 3)	6,00	25,6	30,2	19,3	28,2	11,9	27,4	9,1	26,8	6,8

* Exprimé en % de la terre séchée à 105°C

Tableau 43 - Influence de la longueur des chaînes sur la dégradation des n-alcanes. Coefficient de minéralisation du carbone (C.M.C.) et estimation du taux de substrat dégradé (%) après 4 semaines d'incubation à 28°C.

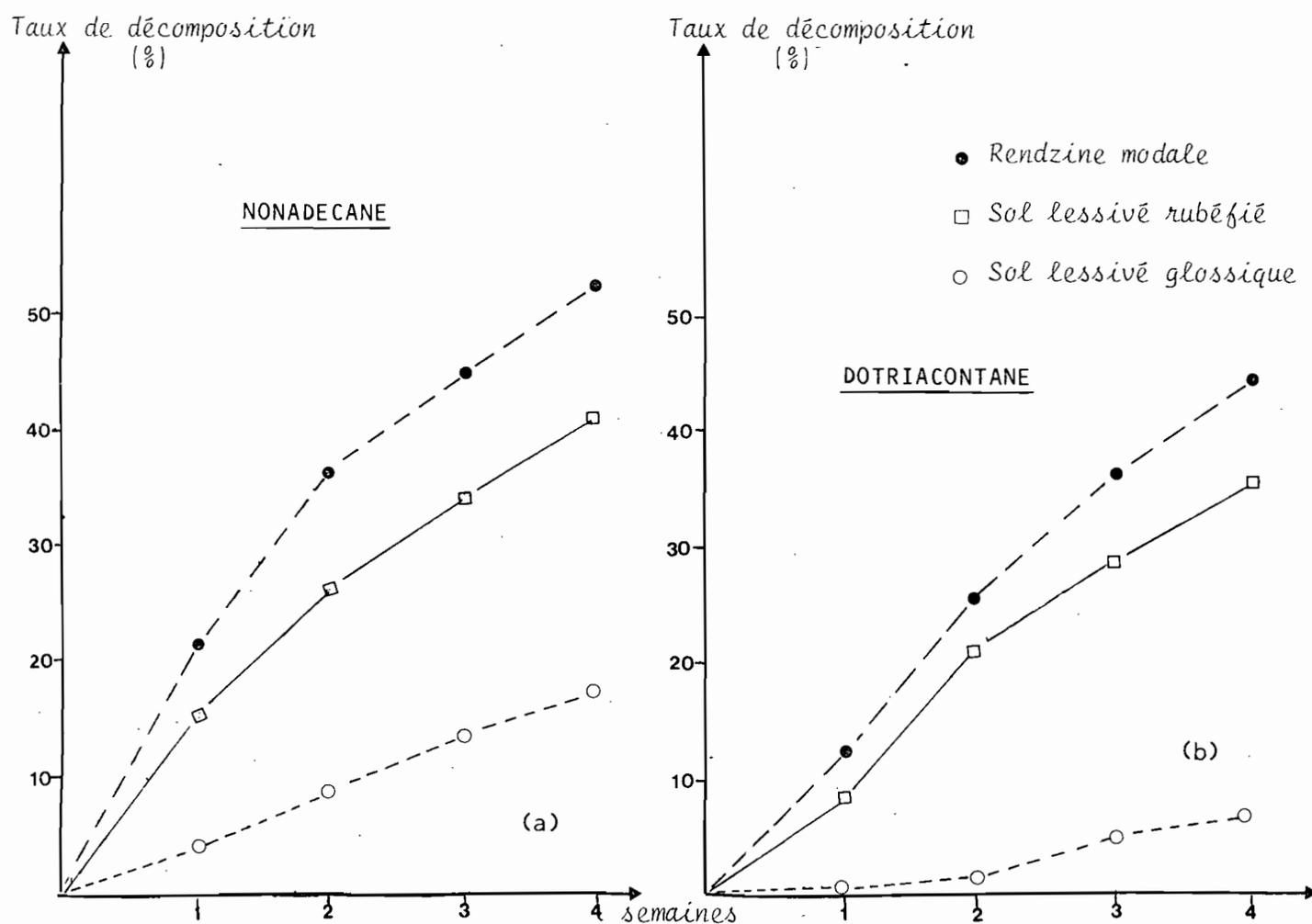


Figure 36.a et b - Estimation du taux de décomposition (%) d'hydrocarbures ($nC-19:0$) et ($nC-32:0$) dans les divers sols de la séquence après 4 semaines d'incubation à $18^{\circ}C$.

Dans les deux sols biologiquement actifs (rendzine et sol lessivé rubéfié), le taux de décomposition ne dépend que très légèrement de la longueur des chaînes ; tous les hydrocarbures sont rapidement biodégradés, mais les courts le sont un peu plus vite que les longs. La décomposition débute immédiatement, sans temps de latence, comme cela a déjà été observé par Antoniewsky et Schaefer (1972) dans un hydromull. Cependant, ces mêmes auteurs constatent une discrimination plus importante entre alcanes courts et alcanes longs, puisque l'hydrocarbure C-24 a été entièrement décomposé en 22 jours et seulement la moitié de l'hydrocarbure C-32 dans le même temps.

Dans le sol lessivé glossique, en milieu nettement acide, où l'activité biologique est ralentie, le taux de décomposition des hydrocarbures décroît nettement à mesure que la longueur de la chaîne augmente. De plus, on observe un temps de latence qui augmente de manière significative avec le nombre d'atomes de carbone du substrat.

De tels résultats permettent de rendre compte partiellement de la distribution des n-alcanes naturels existants à l'état libre dans les sols de la Plaine et du Bas-Bocage vendéens (Figure 26.a) mais pas de celle des n-alcanes liés (Figure 26.b), où l'on observe une proportion importante d'hydrocarbures courts. Ces derniers ont peut-être été libérés lors des traitements acides par les corps microbiens présents dans le sol.

3 - Variations saisonnières

Comme nous l'avons déjà vu au chapitre I, la minéralisation du carbone endogène connaît des variations saisonnières. Il en est de même pour l'aptitude des sols à dégrader les hydrocarbures (Tableaux 42 et 43). Par exemple, pour la rendzine et le sol lessivé rubéfié, au début du printemps (mars), le taux de minéralisation du carbone endogène est plus bas, mais le taux de dégradation des hydrocarbures à chaînes courtes (C-18 et C-19) est plus élevé qu'à la fin du printemps (mai). Par ailleurs, la différence entre les taux de décomposition des hydrocarbures observés dans le sol lessivé glossique (sol nettement acide), d'une part, la rendzine et le sol lessivé rubéfié, d'autre part (sols alcalins ou faiblement acides), est plus importante au début qu'à la fin du printemps.

Au total, la décomposition des hydrocarbures varie en fonction des saisons tout comme la minéralisation du carbone endogène. Mais les fluctuations ne se font pas forcément dans le même sens et avec la même intensité. Ce ne sont sans doute pas les mêmes types de microorganismes qui interviennent dans les deux cas.

4 - Conclusion

Le taux de décomposition des hydrocarbures purs dépend essentiellement de l'activité biologique intrinsèque des sols et peut varier avec les saisons. En milieu carencé, on observe une discrimination très nette en fonction de la longueur des chaînes carbonées. Mais des expériences effectuées par ailleurs au laboratoire ont montré que cette discrimination disparaît lorsque l'on restaure les conditions physico-chimiques du milieu par addition d'argile, d'hydroxyde de fer ou d'azote (Magnoux, 1980 ; Ntsikoussalabongui, 1980).

B - BIOOXYDATION DES ACIDES GRAS LIBRES OU ESTERIFIÉS, DES ALCOOLS ET DES CETONES

Parmi les lipides du sol, les fractions oxygénées représentent au moins 90 % des lipides totaux. Ces fractions peuvent être héritées ou dérivées de l'oxydation des hydrocarbures par les microorganismes. Nous avons vu précédemment que plusieurs classes de lipides oxygénés peuvent être isolées du sol. D'un sol à l'autre, on observe des différences dans la distribution des divers constituants qui doivent refléter les conditions d'environnement (Casalicchio et al., 1971, 1973, 1974). Par exemple, la présence de quantités importantes dans les sols acides d'acides dicarboxyliques α ou ω aussi bien que d'hydroxy ou cétoacides a été reliée à l'activité oxydante d'une microflore spécifique (Haug et Sever, 1971). Des différences importantes dans la distribution des acides saturés linéaires, des n-alcools et des cétones ont également été observées dans différents sols (Fustec-Mathon et al., 1977 ; Ladrat, 1978).

La connaissance des conditions favorisant l'accumulation de lipides oxygénés dans le sol est importante par suite de leur influence sur la fertilité du sol. En effet, l'accumulation de lipides polaires (oxygénés) affecte la réserve en eau et la stabilité structurale des agrégats du sol, ce que ne font pas les lipides non polaires (Bilong, 1979).

Pour étudier le devenir des lipides oxygénés dans les sols de la séquence, nous avons procédé de la même manière que pour les hydrocarbures. La plupart des composés lipidiques choisis existent à l'état naturel dans les cuticules des plantes supérieures ou dans les cellulés des microorganismes. Nous avons surtout cherché à montrer l'influence des groupements fonctionnels et de la longueur des chaînes carbonées sur la décomposition des lipides dans les sols étudiés.

1 - Décomposition des acides gras libres

Le fractionnement comparé des lipides naturels de la rendzine et du sol lessivé glossique a montré que la quantité de monoacides libres est environ deux fois plus élevée dans le sol acide (Tableau 34). Parmi les monoacides, on remarque également que la proportion de certains constituants peut être extrêmement différente d'un sol à l'autre. Ainsi les taux de nC-18 (18:0 acide stéarique ; 18:1 acide oléique) et nC-28:0 (acide montanique) sont respectivement de 4,4 et 14,8 mg/kg de terre séchée à 105°C dans la rendzine alors qu'ils atteignent 14,8 et 49,9 mg/kg dans le sol lessivé glossique. C'est pour cela que nous avons comparé le taux de décomposition de ces acides dans trois sols de la séquence (Tableau 44).

Sols	Témoin		Acide stéarique (C-18:0)		Acide oléique (C-18:1)		Acide montanique (C-28:0)	
	C org. total	C.M.C.	C.M.C.	%	C.M.C.	%	C.M.C.	%
Rendzine modale St-Martin-de-F.	2,67	19,2	32,3	26,3	36,1	33,0	19,3	2,1
Sol lessivé rubéfié Nalliers 1	1,35	17,3	47,1	31,2	57,7	41,4	16,5	0,9
Sol lessivé glossique Saint-Sornin 3	5,70	11,9	12,7	3,9	17,8	23,4	11,1	0

Exprimé en % de la terre séchée à 105°C.

Tableau 44 - Décomposition d'acides gras libres dans les divers sols. Coefficient de minéralisation du carbone (C.M.C.) et estimation du taux de substrat dégradé (%) après 4 semaines d'incubation à 28°C.

a - Effet de l'insaturation des chaînes carbonées

Dans un premier temps, nous avons étudié parallèlement la biodégradation de l'acide saturé en C-18 (acide stéarique) et celle de l'acide insaturé correspondant (acide oléique).

L'addition d'acide stéarique pur à la rendzine et au sol lessivé rubéfié est suivie d'un dégagement de CO₂ immédiat et important, qui traduit une minéralisation rapide de ce substrat. Dans le sol lessivé glossique, de pH nettement plus bas, la décomposition de l'acide stéarique est très lente et une période de latence se manifeste (Figure 37.a).

Au contraire, l'acide insaturé correspondant (acide oléique) est rapidement décomposé dans tous les sols (Figure 37.b). Il y a peu de différence entre les résultats obtenus à partir de la rendzine ou du sol lessivé glossique.

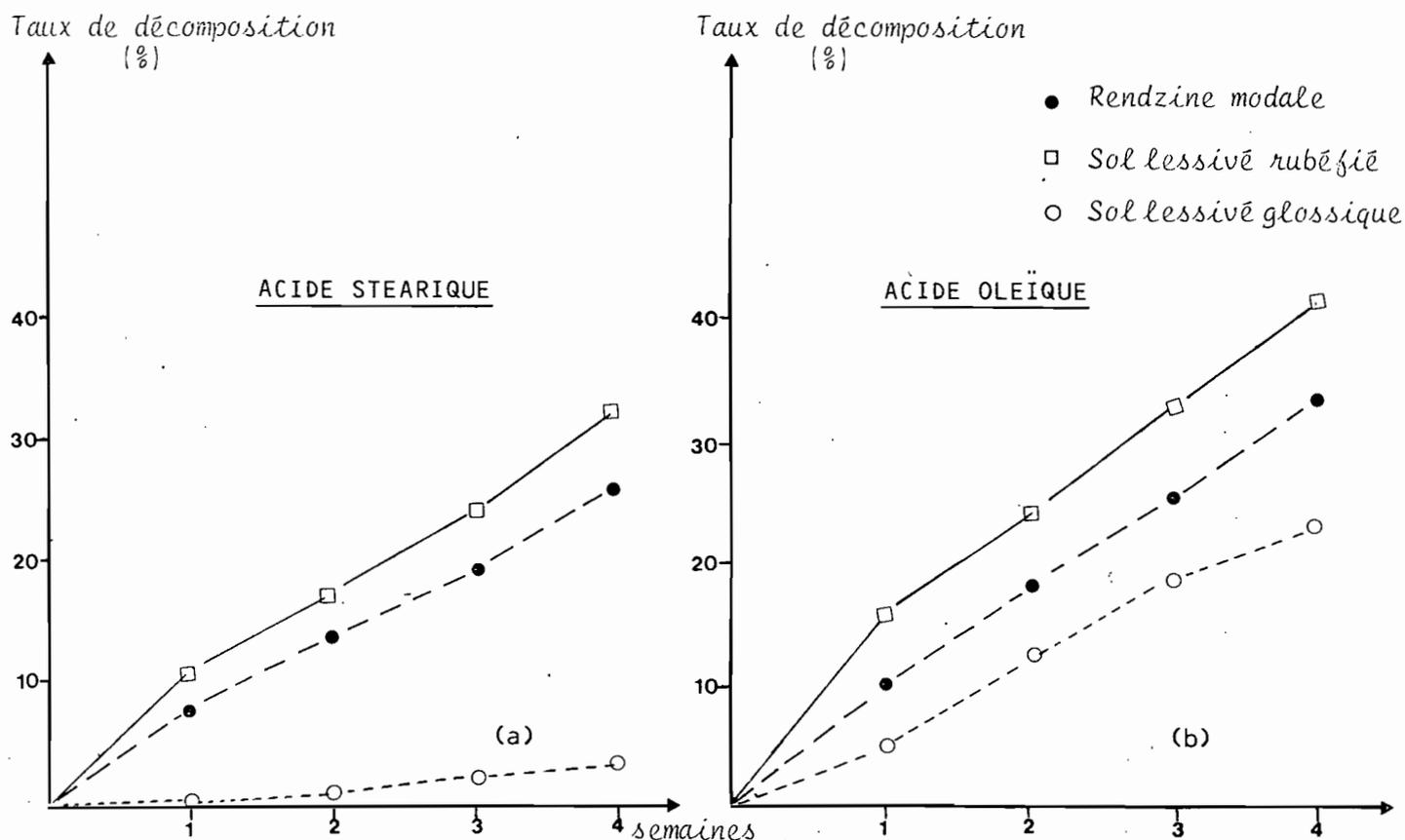


Figure 37.a et b - Estimation du taux de décomposition (%) d'acides gras saturé (nC-18:0) et insaturé (nC-18:1) dans les divers sols de la séquence après 4 semaines d'incubation à 28°C.

Il apparaît que dans les sols biologiquement actifs l'acide stéarique est presque aussi facilement métabolisé que l'acide oléique, tandis qu'en milieu désaturé acide, où l'activité biologique est ralentie, l'acide stéarique n'est que faiblement dégradé. Ce phénomène dépend probablement de la proportion des divers groupes de microorganismes présents dans les sols et de leurs besoins en acides gras. Par exemple, en milieu anaérobie, l'acide oléique est nécessaire à la croissance de certaines espèces de levures, tandis qu'aucune croissance n'apparaît en présence d'acide stéarique (Andreasen et Stier, 1953). On a pu montrer par ailleurs (Mouçawi et al., 1981.b) dans un sol de ce type (anmoor acide) que le nombre de germes correspondant à des levures est élevé (84×10^3 germes par g de terre séchée à 105°C) et qu'il ne varie pas durant la période d'incubation bien que les conditions d'aération naturelles et expérimentales soient différentes.

Dans le sol lessivé glossique, bien que le nombre de levures n'ait pas été déterminé, il est probablement important car c'est le cas de tous les sols forestiers acides (Jensen, 1964). Dans ce sol, on constate une différence significative entre les taux de biodégradation de l'acide oléique et de l'acide stéarique (Tableau 44).

Par contre, dans les sols neutres ou voisins de la neutralité, où les bactéries dominent, on n'observe pas de discrimination entre les acides saturés et insaturés. En ce qui concerne la biodégradation des acides gras purs, la réponse des sols acides est donc différente de celles des sols de pH égal ou supérieur à 7.

On pourrait penser que des composés identiques ou très voisins des lipides cellulaires des microorganismes seraient rapidement métabolisés. De fait, l'acide oléique ajouté à des boues anaérobies peut être dégradé en quelques jours (Rhead *et al.*, 1971) bien qu'il persiste dans certains sédiments récents (Léo, 1966 ; Van Vleet et Quinn, 1979), comme dans les sols étudiés ici. On peut donc en déduire que son taux de décomposition dépend beaucoup des conditions du milieu (C.M.C., pH) des différents sols. Quand l'acide oléique est ajouté aux sols sous forme d'oléate de sodium (Kunc et Stotzky, 1974), son taux de décomposition devient identique à celui que nous observons dans nos sols acides. Par ailleurs, le taux et la nature des argiles présentes dans les sols influencent la dégradation de l'oléate de sodium (Kunc et Stotzky, 1974). Cependant, nous n'avons pas observé une telle relation entre la biodégradation de l'acide oléique et le taux d'argile (Tableau 6) des sols étudiés.

b - Effet de la longueur des chaînes carbonées

Nous avons incorporé au sol soit de l'acide stéarique (nC-18:0), soit de l'acide montanique (nC-28:0).

L'effet de la longueur de la chaîne carbonée sur le taux de biodégradation des acides gras est très net (Tableau 44). Après apport d'acide stéarique, le C.M.C. est significativement plus élevé dans les sols enrichis que dans les témoins. Au contraire, lorsqu'on ajoute aux sols de l'acide montanique, le C.M.C. est identique ou inférieur à celui du témoin correspondant. L'acide montanique est donc réfractaire à la décomposition dans tous les sols. De plus, dans les sols lessivés et principalement dans le sol lessivé glossique, il inhibe la minéralisation du carbone organique endogène du sol.

Bien que le taux de dégradation de l'hydrocarbure nC-28 et celui de l'acide correspondant soient extrêmement différents, surtout dans les sols biologiquement actifs, le comportement particulier de l'acide montanique n'exclut pas l'oxydation d'un groupe méthyle terminal de l'hydrocarbure aliphatique comme première étape de dégradation (Davis, 1967 ; Ratledge, 1978). Apparemment, de faibles taux de produits d'oxydation, autres que les constituants cellulaires et du CO₂, s'accumulent durant la décomposition des alcanes (Davis, 1967). Par conséquent, l'acide montanique en tant que dérivé primaire de la biooxydation de l'octacosane (en passant par l'alcool primaire correspondant), existe probablement à l'état transitoire sous forme d'acyl-COA parmi les produits intracellulaires. Il est alors soumis au processus habituel de dégradation. Au contraire, l'acide montanique libre ne peut probablement pas entrer dans les cellules et, de ce fait, il ne peut pas être décomposé.

2 - Décomposition des esters de l'acide stéarique

Après avoir examiné la dégradation de l'acide stéarique libre, nous avons étudié celle du stéarate de stéaryle et des mono-, di- et triglycérides correspondants.

Le taux de décomposition de l'acide estérifié est comparable à celui de l'acide libre (Tableau 45). Cependant, dans le sol lessivé glossique, une inhibition significative se manifeste après addition du stéarate de stéaryle ou des stéarines. En fait, il est possible qu'une période de latence supérieure à quatre semaines soit nécessaire pour que les microorganismes s'adaptent et décomposent ces esters dans le sol lessivé glossique (Figure 38).

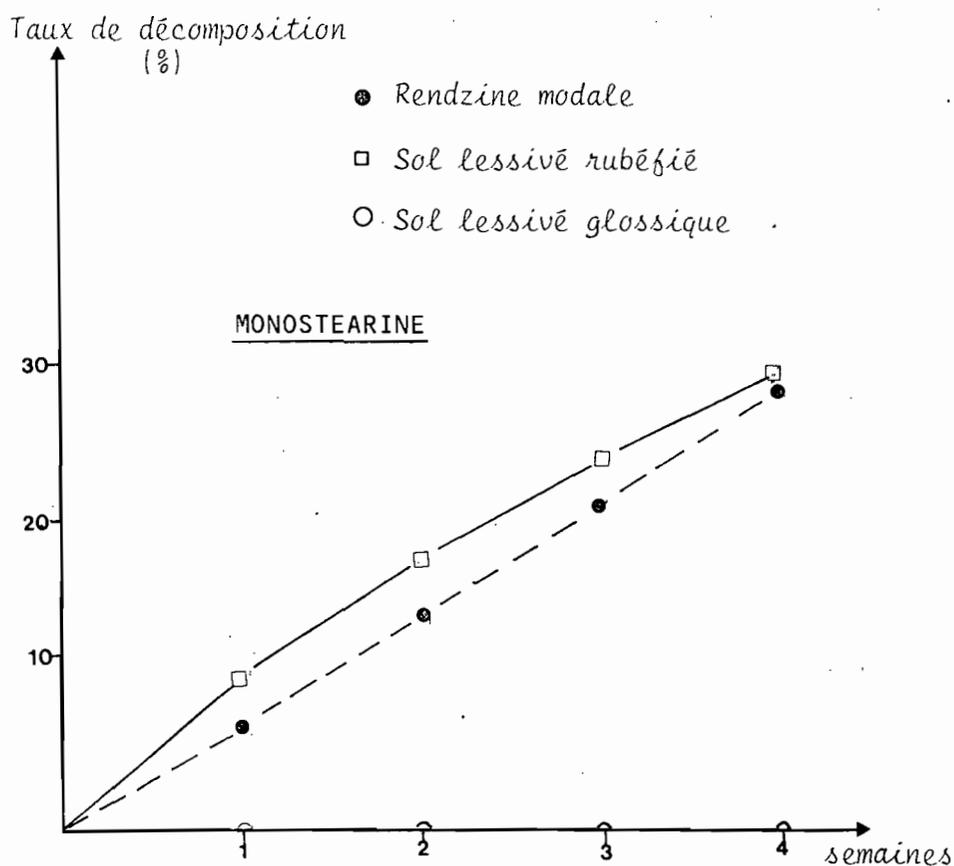


Figure 38 - Estimation du taux de décomposition (%) de la monostéarine dans les divers sols de la séquence après 4 semaines d'incubation à 28°C.

Bien que Muftic (1957) ait suggéré que, dans certaines conditions, les cires aliphatiques telles que le stéarate de stéaryle puissent être oxydées sans hydrolyse préalable de la molécule, il est généralement admis qu'une hydrolyse enzymatique préalable soit nécessaire pour que ces composés soient utilisés. Nous avons d'ailleurs vu précédemment que les glycérides et les esters longs correspondent à une matière organique non évoluée (CPI des acides > 16).

Sols	Témoin		Stéarate de stéaryle		Mono-stéarine		Distéarine		Tristéarine	
	C.org. total*	C.M.C.	C.M.C.	%	C.M.C.	%	C.M.C.	%	C.M.C.	%
Rendzine modale St-Martin-de-Fraigneau	2,67	19,2	33,9	27,8	32,6	28,7	n.d.	n.d.	31,4	24,3
Sol lessivé rubéfié Nalliers 1	1,35	17,3	42,9	25,8	43,5	29,4	42,6	27,0	39,2	23,1
Sol lessivé glossique Saint-Sornin 3	5,70	11,9	11,8	0,8	11,7	0	11,5	0	11,5	0

* Exprimé en % de la terre séchée à 105°C

Tableau 45 - Décomposition d'acide stéarique estérifié dans les divers sols. Coefficient de minéralisation du carbone (C.M.C.) et estimation du taux de substrat dégradé (%) après 4 semaines d'incubation à 28°C.

Bien que les champignons, considérés comme des producteurs actifs de lipases, soient plus abondants dans les sols acides, le pH optimal des lipases fongiques est généralement de l'ordre de 8 (Alford et al., 1964). De plus, l'activité lipasique peut conduire à une accumulation localisée d'acides libres d'autant plus importante que le glycérol est plus substitué. Cet effet pourrait expliquer le taux de décomposition plus faible de la tristéarine comparé à celui de la monostéarine (Tableau 45).

3 - Décomposition des alcools et des cétones

Après enrichissement en alcool primaire (C-18, 1-octadécanol) ou en cétone (C-18, 3-octadécanone), les réactions des sols ne sont pas fondamentalement différentes de celles obtenues après addition d'acide stéarique libre (Tableau 46 et figure 39). La décomposition est rapide dans les sols biologiquement actifs ; par contre, l'activité du sol lessivé glossique est très faible vis-à-vis de ces substrats.

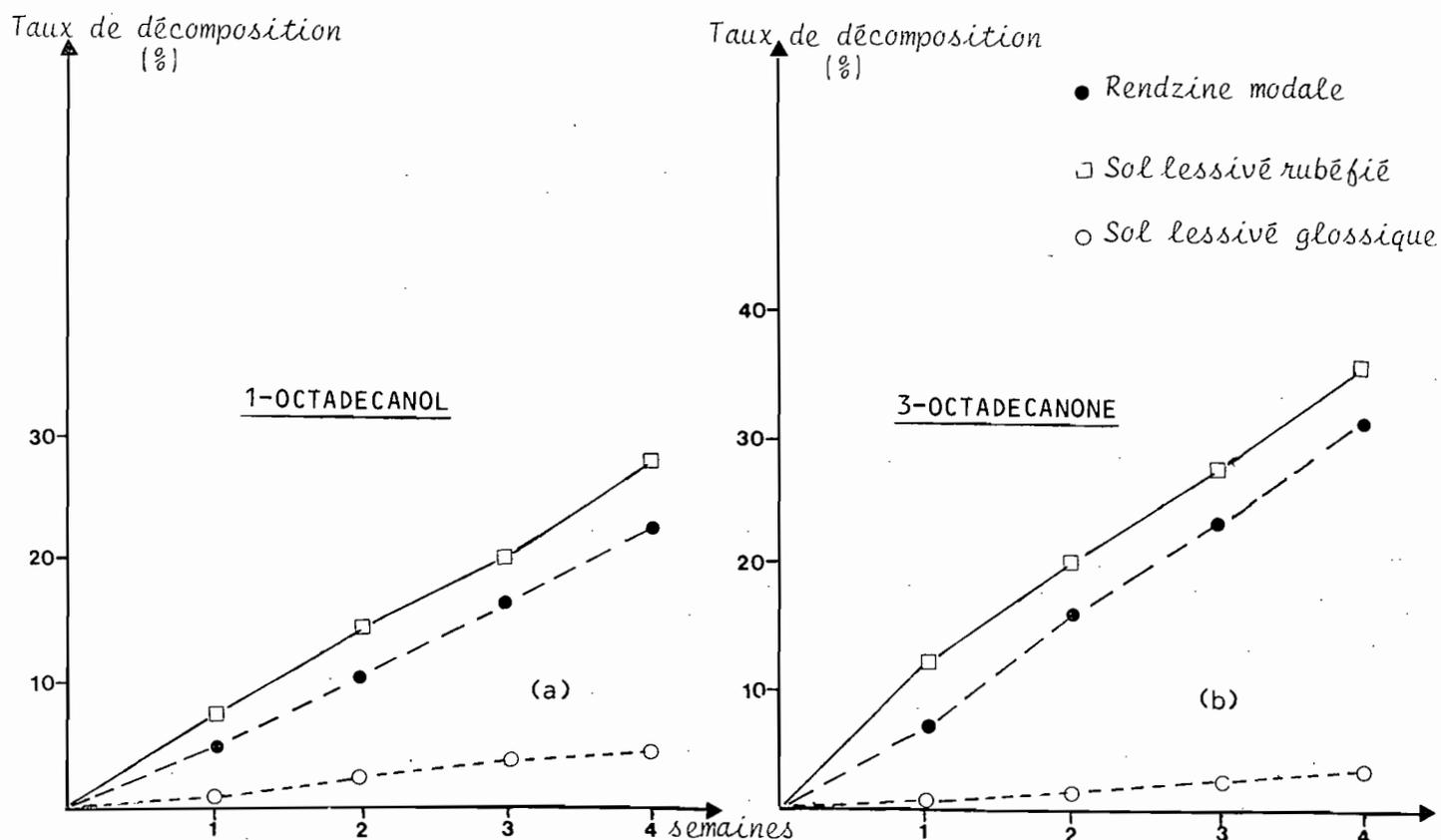


Figure 39.a et b - Estimation du taux de décomposition (%) de l'alcool C-18 et de la cétone C-18 dans les divers sols de la séquence après 4 semaines d'incubation à 28°C.

Par ailleurs, si l'on compare les taux de décomposition des cétones C-18 (3-octadécanone) et C-27 (myristone), on constate que l'effet de la longueur de chaîne est minime (Tableau 47), contrairement à ce que l'on observe avec les acides libres.

Sols	Témoïn		1-octadécaneol		3-octadécaneone		Myristone (C-27)	
	C org.* total	C.M.C.	C.M.C.	%	C.M.C.	%	C.M.C.	%
Rendzine modale St-Martin-de-F.	2,67	19,2	31,3	23,4	36,0	31,4	33,0	25,8
Sol lessivé rubéfié Nalliers 1	1,35	17,3	45,2	28,1	53,2	35,4	45,0	27,3
Sol lessivé glossi- que (St-Sornin 3)	5,70	11,9	13,0	5,1	12,5	3,3	11,4	0

* Exprimé en % de la terre séchée à 105°C.

Tableau 46 - Décomposition d'alcool C-18 et de cétones C-18 et C-27 dans les divers sols. Coefficient de minéralisation du carbone (C.M.C.) et estimation du taux de substrat dégradé (%) après 4 semaines d'incubation à 28°C.

	Rendzine modale St Martin de F.	Sol lessivé rubéfié Nalliers 1	Sol lessivé glossique St-Sornin 3
<u>Octacosane (C-28)</u> <u>Nonadécane (C-19)</u>	0,72	0,85	0,47
<u>Myristone (C-27)</u> <u>3-octadécaneone (C-18)</u>	0,82	0,77	0
<u>Acide montanique (C-28)</u> <u>Acide stéarique (C-18)</u>	0,09	0,03	0,04

Tableau 47 - Rapport entre la décomposition des lipides à longue chaîne et celle des lipides à courte chaîne. Incubation : 4 semaines à 28°C.

Enfin, si l'on compare le taux de décomposition des cétones à celui des hydrocarbures correspondants, on observe que les composés les plus hydrophobes, tels que la myristone (cétone C-27) et l'octacosane (n-C28:0), sont oxydés à des vitesses peu différentes dans le sol lessivé rubéfié (Figure 40). Dans ce même sol biologiquement très actif, le comportement des composés correspondants à chaîne courte (octadécane et 3-octadécaneone) est également comparable. Bien que les cétones utilisées ne soient pas des méthyl-cétones, on peut noter que l'undécaneone-2 est facilement oxydé par *Coryne bacterium*, microorganisme dégradant les paraffines (Ladd, 1956).

4 - Conclusion

La composition de la fraction lipidique de la matière organique du sol dépend du taux et de la nature des apports d'origine végétale, des synthèses microbiennes ainsi que du taux de décomposition des lipides par les microorganismes. La structure chimique des lipides (nombre d'atomes de carbone et nature des groupements fonctionnels) tout comme certains facteurs du milieu, tels que le pH, influent sur l'utilisation de ces substrats par les microorganismes.

Au total, à l'exception de l'acide montanique qui est résistant à la biodégradation dans tous les cas, la décomposition des lipides purs est influencée par les facteurs physico-chimiques du sol dans lequel ils sont incorporés. Dans un milieu biologiquement actif, tel que la rendzine et le sol lessivé rubéfié, tous les composés sont facilement dégradés et dans des proportions semblables (les différences n'excèdent pas 25 %). Dans un milieu acide, tel que le sol lessivé glossique, le taux de biodégradation est toujours plus faible et dépend :

- de la nature des groupements fonctionnels
- de la longueur des chaînes carbonées des lipides.

Par son effet sur l'activité microbienne des sols, le pH semble avoir une importance primordiale sur la décomposition des lipides.

C - EVOLUTION DES LIPIDES NATURELS EXTRAITS DES DIFFERENTES PLANTES

La majeure partie des lipides étant issue des débris végétaux, nous avons extrait les cires de divers types de plantes pour les incorporer ensuite au sol et suivre leur évolution. Nous avons isolé les lipides à partir :

- de paille de blé, de feuilles et tiges de maïs
- de feuilles de chêne, de chataignier et de hêtre
- d'aiguilles de pin maritime et de pin sylvestre
- de feuilles de brande et de callune.

Le matériel a été récolté à l'automne. Les lipides ont été extraits au soxhlet en utilisant comme solvant le mélange éther de pétrole 60-80°C - acétate d'éthyle 3/1 (Tableau 48).

Types de végétaux	Taux de lipides ₁	C des lipides ₂
Maïs	2,1	60,7
Blé	1,3	69,2
Hêtre	3,9	62,7
Chataignier	4,2	61,4
Chêne	5,3	68,8
Pin maritime	11,7	67,3
Pin sylvestre	15,9	63,1
Callune	9,4	71,1
Brande	11,7	72,1

¹ Résultats exprimés en % de matière sèche à 105°C

² Résultats exprimés en %

Tableau 48 - Teneur en lipides de divers végétaux (aiguilles ou feuilles), extraits par le mélange éther de pétrole 60-80°C - acétate d'éthyle (3/4 - 1/4).

Nous les avons ensuite incorporés au sol à l'état de poudres obtenues par broyage des extraits secs avec du quartz fin. L'apport a été de 200 et 400 mg de lipides pour l'équivalent de 100 g de terre séchée à 105°C. Nous avons ensuite mis à incuber les divers essais, dans les mêmes conditions que précédemment dans le cas des lipides purs. Les expériences se sont poursuivies pendant quatre semaines au cours desquelles le coefficient de minéralisation du carbone (C.M.C.) et le taux de décomposition du substrat ont été déterminés à intervalles régu-

liers. En fin d'expérience, nous avons mesuré, sur les échantillons séchés à l'air, la quantité des lipides résiduels libres A et liés B.

L'examen des tableaux 49, 50 et 51 montre que la somme (substrat minéralisé et substrat résiduel A et B) est inférieure à la quantité de lipides introduite.

Types de végétations	Lipides incorporés : 200 mg/100 g de sol		Lipides incorporés : 400 mg/100 g			
	C.M.C. ₁	Taux de décomposition %	C.M.C. ₁	Taux de décomposition %	Extractibles %	Non extractibles %
Maïs	23,7	33,7	29,9	27,8	44,0	28,2
Blé	21,3	23,0	-	-	-	-
Hêtre	24,4	35,2	29,3	26,4	49,0	24,6
Chataignier	21,4	27,0	26,0	21,9	51,5	26,6
Chêne	20,9	23,2	26,1	19,9	62,5	17,6
Pin maritime	18,9	17,8	27,1	21,8	58,7	19,5
Pin sylvestre	19,8	21,5	26,6	22,2	60,5	17,3
Callune	19,8	19,4	21,6	13,2	76,0	10,8
Brande	13,0	1,4	12,9	1,5	101,0	-

¹ C.M.C. du sol témoin = 13,0

Tableau 49 - Evolution des lipides de divers types de végétations incorporés à la rendzine modale (St-Martin-de-Fraigneau) 4 semaines d'incubation à 28°C.

Types de végétations	Lipides incorporés : 200 mg/100 g de sol				Lipides incorporés : 400 mg/100 g de sol			
	C.M.C. ₁	Taux de décomposition %	Extractibles (%)	Non extractibles (%)	C.M.C. ₁	Taux de décomposition %	Extractibles (%)	Non extractibles (%)
Maïs	43,0	34,9	22,5	42,6	50,8	24,8	39,0	36,2
Blé	41,3	28,6	29,5	41,9	45,1	18,9	49,0	32,1
Hêtre	43,2	34,3	28,0	37,7	49,7	23,0	44,0	33,0
Chataignier	42,2	31,1	26,5	42,4	46,2	20,4	49,0	30,6
Chêne	41,1	26,8	37,5	35,7	46,3	18,8	47,5	33,7
Pin maritime	38,8	24,9	43,5	31,6	45,7	18,9	54,5	26,6
Pin sylvestre	40,0	27,8	32,0	40,2	47,5	21,0	41,7	37,3
Callune	35,4	19,3	68,0	12,7	37,6	12,8	64,5	22,7
Brande	20,5	2,4	118,0	-	21,9	2,7	101,2	-

¹ C.M.C. du sol témoin = 19,4

Tableau 50 - Evolution des lipides de divers types de végétations incorporés au sol lessivé rubéfié (Nalliers 1) - 4 semaines d'incubation à 28°C.

- Rendzine modale
- Sol lessivé rubéfié
- Sol lessivé glossique

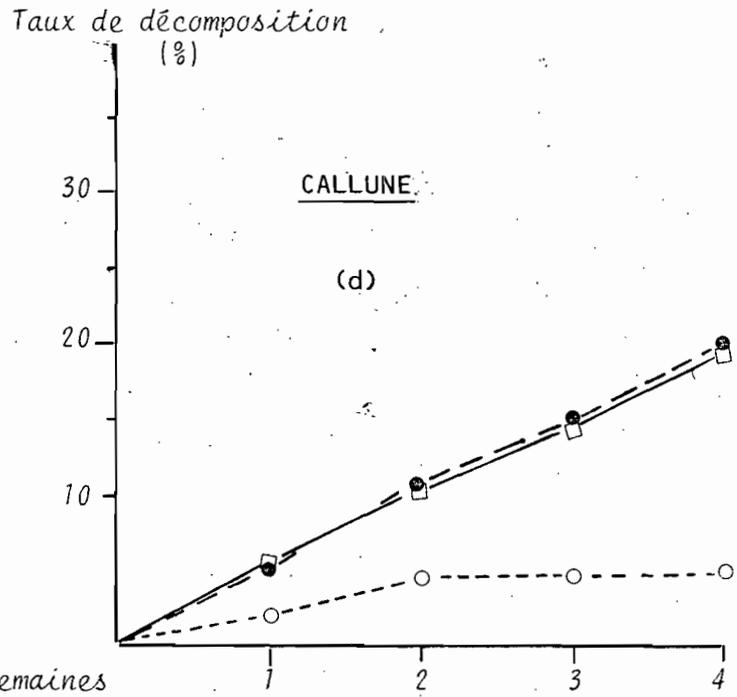
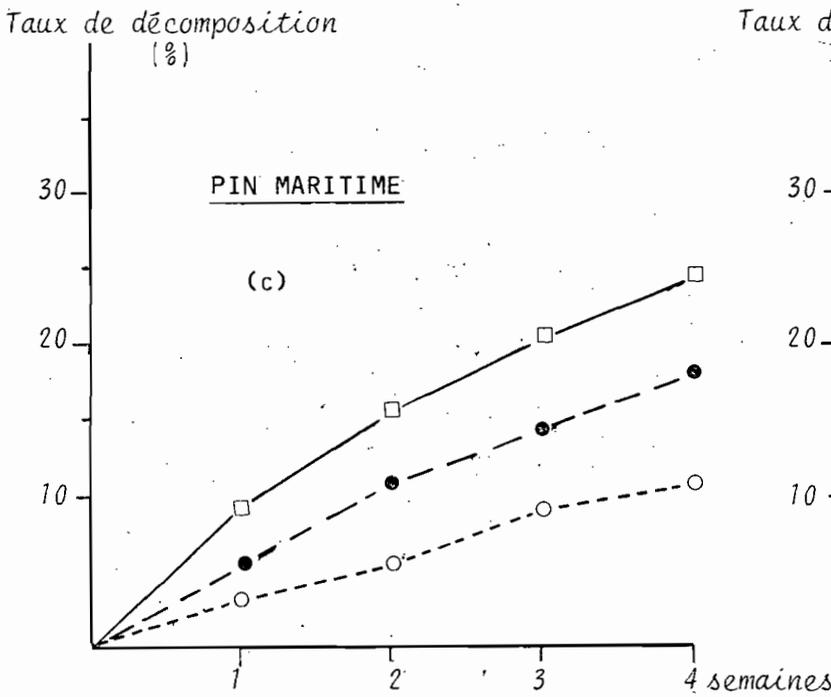
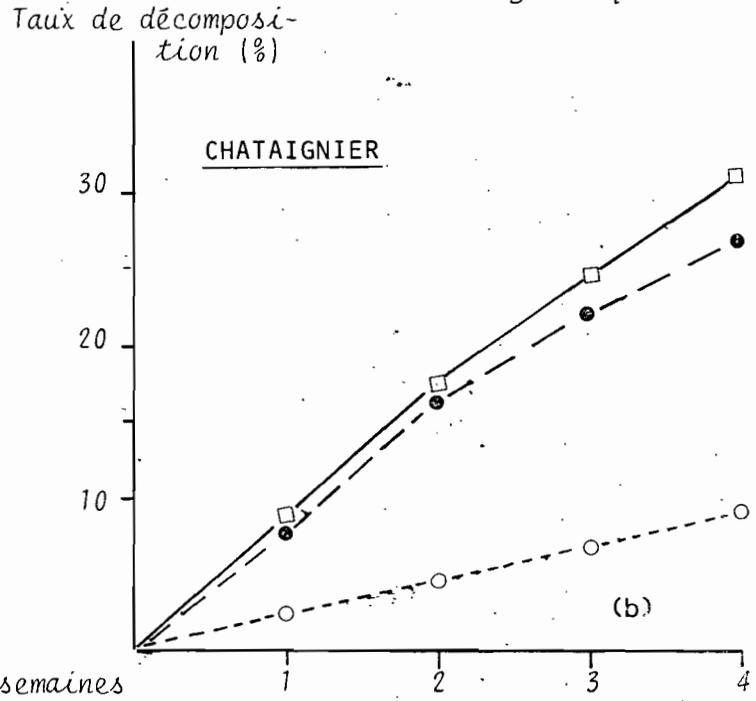
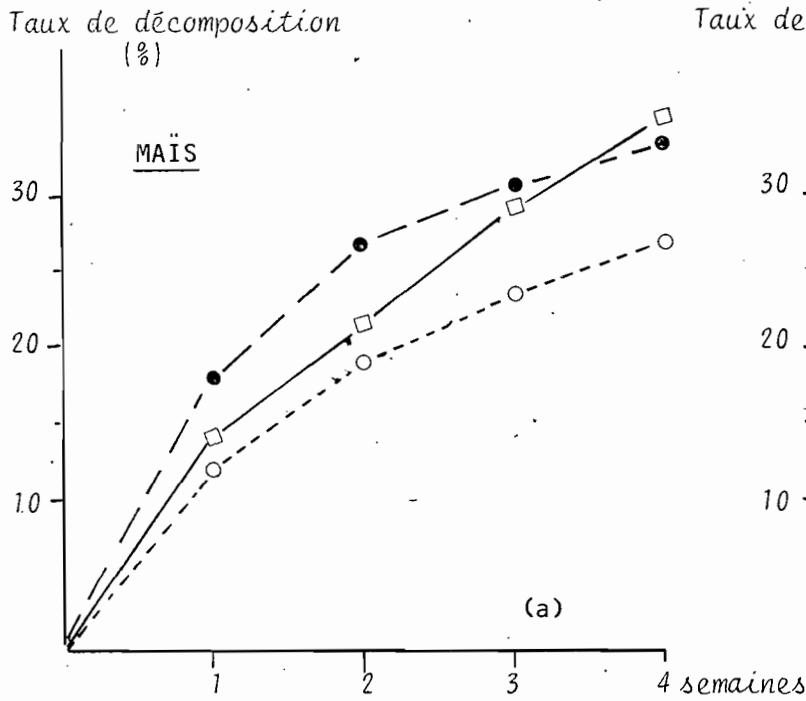


Figure 41.a à d - Estimation du taux de décomposition (%) des lipides de divers végétaux (apport de 200 mg) après 4 semaines d'incubation à 28°C.

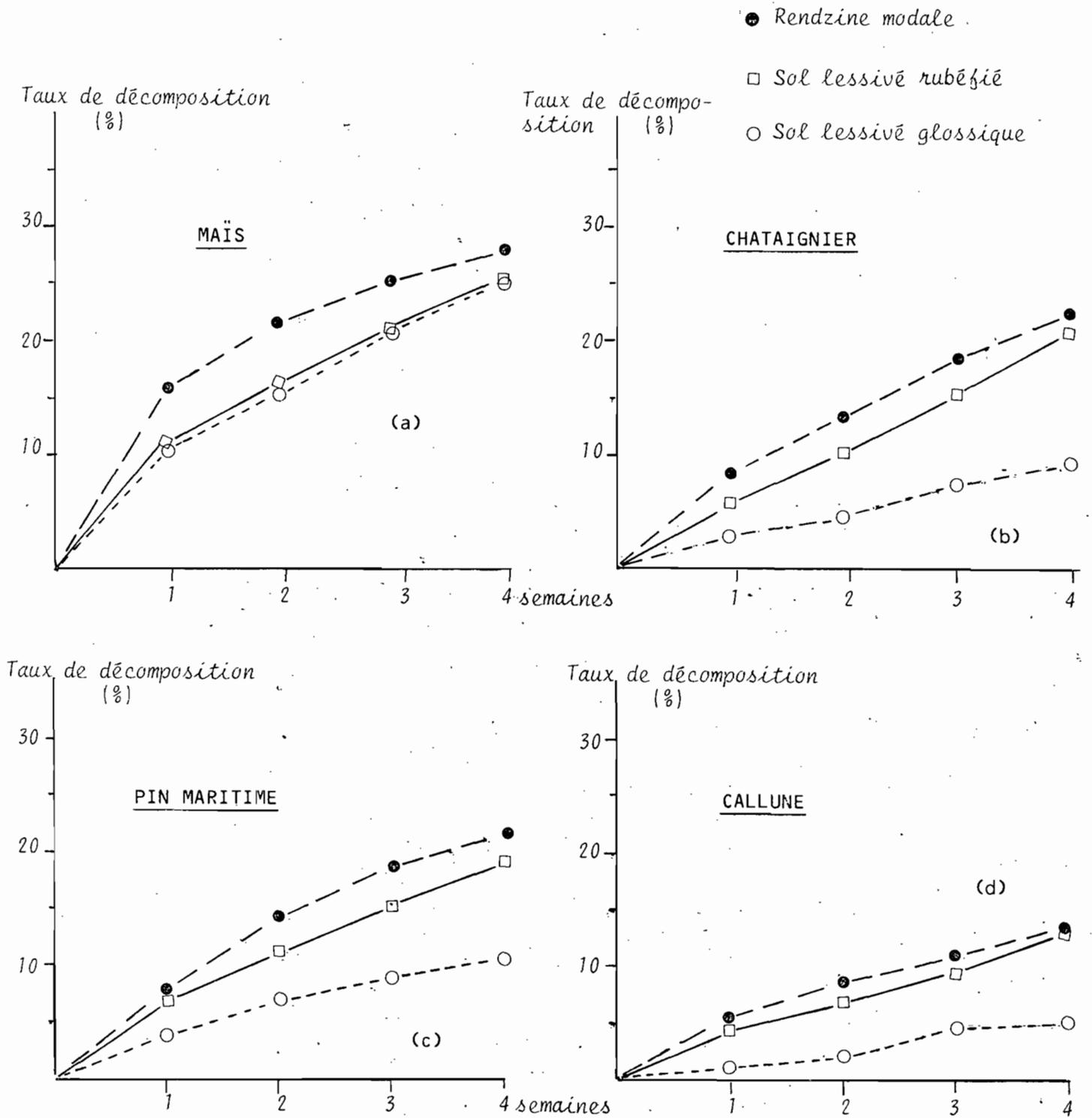


Figure 42.a à d - Estimation du taux de décomposition (%) des lipides de divers végétaux (apport de 400 mg) après 4 semaines d'incubation à 28°C.

Types de végétations	Lipides incorporés : 200 mg/100 g de sol				Lipides incorporés : 400 mg/100 g de sol			
	C.M.C. ¹	Taux de dé- composition %	Extractibles (%)	Non extrac- tibles (%)	C.M.C. ¹	Taux de dé- composition %	Extractibles (%)	Non extrac- tibles (%)
Maïs	22,2	26,9	53,0	20,1	26,1	24,6	51,2	24,2
Blé	20,1	14,7	54,0	31,3	-	-	-	-
Hêtre	21,6	20,1	33,0	46,9	24,7	18,8	68,7	12,5
Chataignier	19,2	8,8	78,0	14,2	20,6	8,8	69,5	21,7
Chêne	20,0	11,7	67,0	21,3	21,9	11,1	71,7	17,2
Pin maritime	20,1	10,9	87,5	2,0	21,9	10,5	83,2	6,3
Pin sylvestre	19,7	9,7	85,5	4,8	21,8	11,0	79,2	9,8
Callune	19,2	5,0	90,5	4,5	19,2	3,4	88,0	8,6
Brande	17,8	0,2	111,0	-	17,7	0,6	107,7	-

¹ C.M.C. du sol témoin = 17,8

Tableau 51 - Evolution des lipides de divers types de végétations incorporés au sol lessivé glossique (St-Sornin 3) - 4 semaines d'incubation à 28°C.

Une partie de ces lipides peut être associée aux argiles (Hance et Anderson, 1963) ; on ne peut alors les solubiliser qu'après destruction des silicates par l'acide fluorhydrique. Précédemment, l'étude des lipides naturels des sols nous a montré que la fraction liée aux argiles (lipides C) ne dépasse pas 5 à 10 % des lipides totaux.

Une autre partie peut s'accocier avec les autres fractions organiques du sol comme les protéines et les polysaccharides (Braids et Miller, 1975) ou les composés humiques (Schnitzer, 1977). Bien que la présence de chaînes lipidiques dans le squelette structural des composés humiques et des kérogènes soit maintenant incontestable, une certaine proportion peut être néoformée par défonctionnarisation progressive des polymères humiques (Tissot et al., 1972), mais une partie peut être héritée des lipides originels.

Les résultats des divers essais sont donnés dans les tableaux 49, 50 et 51 et les figures 41 et 42. On voit que l'évolution des lipides dépend des conditions de milieu et de la nature des apports.

1 - Influence du type de sol

Pour mieux dégager l'influence du sol, nous avons établi pour chaque type la moyenne des divers résultats obtenus. Les chiffres sont donnés dans le tableau 52, correspondant à un apport de 400 mg/100 g de terre séchée à 105°C.

Conformément à ce que l'on avait déjà observé dans la plupart des cas en présence de lipides purs, le coefficient de minéralisation du carbone organique et le taux de décomposition des substrats sont maximums au niveau du sol lessivé rubéfié lorsque la quantité de lipides ajoutée au sol est faible (200 mg) ; par contre, lorsqu'elle est plus importante (400 mg), le taux de

décomposition varie sensiblement comme le pH du milieu. Ces résultats permettent de penser que, dans la nature, où les apports de lipides ne sont jamais très importants (pour un laps de temps très court), la décomposition de ces derniers sera maximum en milieu modérément acide, où nous avons d'ailleurs enregistré les teneurs en lipides les plus faibles (Tableau 31). Mais en présence d'apports plus importants qui peuvent être accidentels (pollution), la dépollution sera maximum en milieu calcaire, tout au moins dans un premier temps.

Types de sols	C.M.C. 1	Taux de dé- composition du substrat 2	Taux d'extraction 2		Taux de li- pides non extractibles 2
			Libres+liés	Liés	
Rendzine modale St-Martin-de-Fraigneau	24,9	19,3	62,9	15,5	20,6
Sol lessivé rubéfié Nalliers 1	43,4	17,9	54,5	7,4	31,5
Sol lessivé glossique Saint-Sornin 3	21,1	11,1	77,4	9,5	14,3

1 Résultats exprimés en % du carbone organique total

2 Résultats exprimés en % de l'apport

Tableau 52 - Evolution moyenne des lipides dans les divers types de sols (apport de 400 mg de lipides).

La partie restée extractible après quatre semaines d'incubation est de loin la plus importante. Elle est maximum dans les termes extrêmes. Une fraction de celle-ci n'a été solubilisée qu'après un traitement acide. Cette fraction est surtout importante en milieu calcaire où, comme nous l'avons déjà signalé, des lipides peuvent s'adsorber sur le carbonate de calcium.

Le taux de lipides non extractibles varie nettement d'un sol à l'autre : il est maximum en milieu modérément acide. Le mécanisme de cette "insolubilisation" est certainement complexe et peut avoir plusieurs causes. En premier lieu, il y a vraisemblablement intervention de phénomènes physico-chimiques car après incorporation de lipides au sol humide et séchage immédiat, on constate qu'une fraction est devenue inextractible. L'importance de celle-ci varie beaucoup avec l'origine des lipides (0 à 15 % environ).

Si l'intervention de mécanismes physico-chimiques permet d'expliquer la baisse du taux d'inextractibles en milieu très acide, par contre, elle ne permet pas à elle seule de rendre compte de la forte insolubilisation constatée au niveau du sol lessivé rubéfié. En effet, celui-ci contient nettement moins d'argile et de fer libre que la rendzine modale où le taux de lipides non extractibles est cependant plus faible. C'est pourquoi nous pensons que des phénomènes biologiques interviennent également, tout au moins au niveau de ce sol. Partant de l'hypothèse que le coefficient de minéralisation du carbone organique reflète l'activité biologique globale du milieu, nous avons porté sur un graphique (Figure 43) les variations du taux de lipides non extractibles en fonction du CMC. On obtient ainsi une relation linéaire dont la corrélation est significative ($r = 0,89$ lorsque l'apport lipidique est de 200 mg et $r = 0,83$ lorsque celui-ci est de 400 mg/100 g de sol séché à 105°C).

Comme nous l'avons déjà signalé, ce type d'insolubilisation peut correspondre pour partie à une réutilisation directe de certains composés lipidiques à chaîne courte (acide oléique, par exemple) par les microorganismes du sol. Mais peut-être correspond-il également à une incorporation des lipides aux substances humiques ? Cette insolubilisation serait alors maximum au niveau des sols lessi-

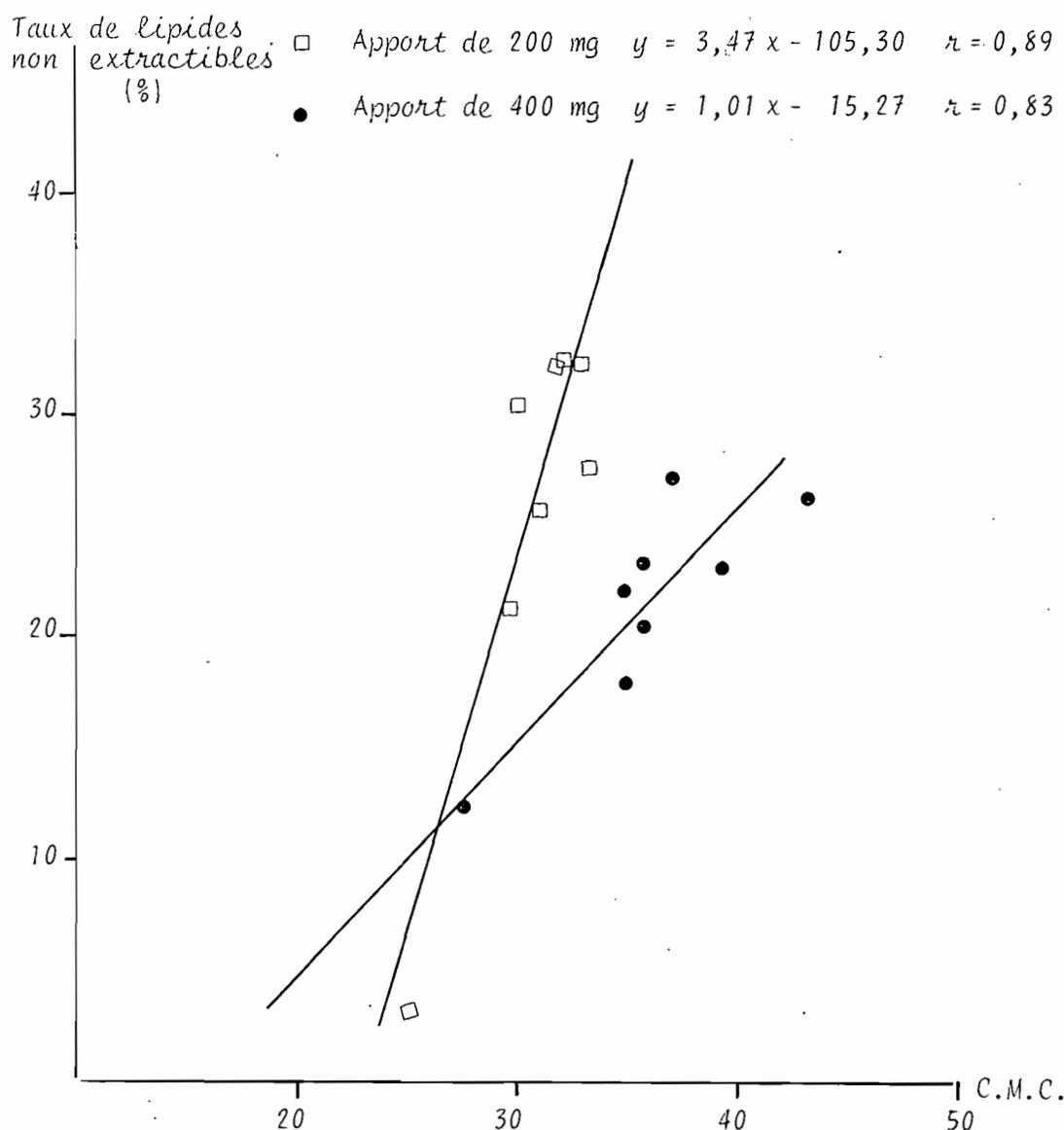


Figure 43 - Variation du taux de lipides non extractibles en fonction du coefficient de minéralisation du carbone organique (C.M.C.) Sol lessivé rubéfié (Nalliers 1).

(vés rubéfiés dont les substances humiques devraient alors présenter un caractère plus aliphatique. Or, les résultats obtenus dans la deuxième partie de ce mémoire montrent qu'il n'en est rien. Mais il convient cependant de signaler que la minéralisation du carbone organique est également maximum dans ce type de sol. Au niveau des substances humiques, la minéralisation affecte préférentiellement les chaînes aliphatiques. Son action tendrait ainsi à supprimer les effets résultant de l'incorporation des lipides aux composés humiques. Au total, on assisterait simplement à un renouvellement rapide des structures aliphatiques des substances humiques.

2 - Influence de la nature des lipides de végétaux en fonction de leur origine

La quantité de lipides apportée au sol par les débris végétaux peut varier considérablement d'une espèce à l'autre (Tableau 48). Ces variations sont en partie liées à l'existence dans les plantes de deux types de lipides en proportions variables :

- des endolipides (lipides intracellulaires) à chaîne courte (< C-20). Comme nous l'avons déjà vu, parmi ces composés, certains sont directement réutilisables par la microflore du sol ; les autres sont assez facilement biodégradables ;
- des exolipides (cires et résines) souvent formés de composés à longue chaîne (C-20 à C-32). Ce sont notamment les lipides des tissus de protection des végétaux supérieurs (cuticule par exemple).

Dans le sol, la dégradation de la cutine est très lente, mais elle peut être accélérée par la présence de sucres et de sources d'azote (Heinen et Devries, 1966).

Pour des plantes à cuticule réduite, avec un taux de lipides faible (maïs par exemple), les endolipides doivent être dominants. Les résultats portés dans les tableaux 49, 50 et 51 montrent que la décomposition est alors rapide et l'insolubilisation maximum. Dans ce cas, on est en présence d'apports naturels réduits à évolution rapide.

A l'inverse, le taux assez élevé de lipides dosés dans les feuilles d'éricacées tient à la présence d'exolipides en quantité importante (existence d'une cuticule bien développée). Comme on est essentiellement en présence de composés à longue chaîne, ceux-ci se dégradent difficilement dans les sols, surtout lorsqu'ils sont nettement acides. L'insolubilisation est également très faible. Les lipides tendent donc à s'accumuler à l'état libre. Leur accumulation a un effet inhibiteur sur le développement des microorganismes du sol, ce qui facilite l'installation du processus de podzolisation.

Avec une végétation de pins, la proportion de lipides apportés (cires et surtout résines) est encore plus grande qu'en présence d'éricacées. Cependant, les expériences que nous avons effectuées montrent que, tout au moins dans un premier temps, une partie de ces lipides se décompose assez rapidement. Malgré cela, et compte-tenu du taux élevé de l'apport, la quantité de lipides qui persiste dans le sol peut être au moins aussi élevée qu'en présence d'éricacées. En conséquence, les pins peuvent avoir le même effet que ces derniers sur l'évolution de l'humus en milieu acide.

A côté de cela, la dégradation des lipides provenant des feuilles de chêne, chataignier et hêtre est intermédiaire entre celle des lipides de maïs d'une part, et celle des lipides d'éricacées et de pins d'autre part : leur décomposition ainsi que leur insolubilisation sont assez bonnes, tout au moins dans les sols à mull. Mais en présence d'un moder (sol lessivé glossique), la décomposition des lipides de chêne et de chataignier est assez réduite et tend à se rapprocher de celle des lipides de pins.

3 - Conclusion

Au total, on constate que le taux de lipides varie considérablement selon les espèces végétales et, en particulier, pour les espèces sous lesquelles se forment des humus à évolution lente (conifères et éricacées) qui sont les plus riches en lipides.

Par ailleurs, l'évolution d'une même quantité d'extrait lipidique total varie en fonction du type de sol. La vitesse de décomposition et l'insolubilisation étant nettement plus faibles en milieu désaturé biologiquement peu actif. La nature de la fraction lipidique intervient également. Ainsi, les endo-

lipides (à chaîne courte) se minéralisent bien et donnent lieu à une insolubilisation importante. Au contraire, les exolipides (à longue chaîne) sont beaucoup plus résistants à la biodégradation. Comme leur insolubilisation est également réduite ou inexistante, ceux-ci persistent à l'état extractible dans le sol. Ils peuvent alors exercer une action inhibitrice sur le développement des microorganismes, particulièrement nette en milieu acide.

CHAPITRE III : EVOLUTION COMPAREE DU CARBONE ORGANIQUE ENDOGENE, DE

LA CELLULOSE ET DES LIPIDES A DIFFERENTS NIVEAUX D'HUMIDITE DU SOL

Nous allons maintenant comparer la décomposition du carbone organique endogène, de la cellulose et des lipides à différentes teneurs en eau des sols. Pour cela, nous allons utiliser la technique d'incubation dans les mêmes conditions que précédemment.

A - EVOLUTION DES DIVERS SUBSTRATS POUR DES TENEURS EN EAU DES ECHANTILLONS
DE SOLS CORRESPONDANT AUX 2/3 DE LA CAPACITE AU CHAMP

On admet généralement que l'activité minéralisatrice des sols est maximum pour des teneurs en eau comprises entre 2/3 et 3/4 de la capacité au champ (Daraseliya et Kalatoza, 1968). A côté de l'évolution du carbone endogène, nous avons suivi celle de la cellulose en poudre, de l'acide stéarique et de l'acide montanique. La dégradation de certains de ces substrats a été déjà étudiée précédemment. Mais, afin de comparer leurs décompositions respectives exactement dans les mêmes conditions et à partir des mêmes prélèvements de sols, nous avons fait une nouvelle incubation. Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau 53.

Sols	Témoin		Cellulose		Acide stéarique		Acide montanique	
	C.org.* total	C.M.C.	C.M.C.	%	C.M.C.	%	C.M.C.	%
Rendzine modale St-Martin-de-F.	2,66	17,9	37,1	9,3	32,5	28,8	18,0	1,9
Sol lessivé rubéfié Nalliers 1	1,23	18,6	109,3	23,2	46,1	26,9	18,5	1,7
Sol lessivé glossi- que St-Sornin 3	6,97	14,2	18,8	5,4	14,9	4,8	14,3	1,9

* Exprimé en % de la terre séchée à 105°C.

Tableau 53 - Coefficient de minéralisation du carbone organique endogène (C.M.C.) et estimation du taux de substrat dégradé (%) en conditions optimales d'humidité après 4 semaines d'incubation à 28°C.

1 - Variation de l'intensité de la dégradation en fonction du type de sol

La biooxydation du carbone organique endogène, comme celle de la cellulose, sont maximums au niveau du sol lessivé rubéfié. Quant aux lipides, à côté de l'acide montanique qui se dégrade mal dans tous les sols, l'acide stéarique se minéralise sensiblement à la même vitesse dans la rendzine et le sol lessivé rubéfié. Par ailleurs, si l'on tient également compte des résultats antérieurs se rapportant à la minéralisation des lipides, on remarque que, selon l'époque du prélèvement, la dégradation des lipides est maximum tantôt dans l'un, tantôt dans l'autre de ces deux sols biologiquement actifs. En moyenne, c'est cependant au niveau du sol lessivé rubéfié qu'elle est la plus intense.

Au total, quelle que soit la nature du substrat organique (carbone organique endogène, cellulose, lipides), c'est toujours au niveau du mull modérément acide (sol lessivé rubéfié) que la minéralisation du carbone organique atteint son maximum.

2 - Variation d'intensité de la dégradation en fonction de la nature des composés organiques

Sur le tableau 53, on remarque que le carbone organique endogène se minéralise sensiblement à la même vitesse que les lipides à longue chaîne (acide montanique) dans tous les sols. Par ailleurs, la cellulose se dégrade toujours beaucoup plus vite que les composés précédents. Son taux de décomposition est approximativement le même que celui des lipides courts (acide stéarique), sauf dans la rendzine. Dans ce milieu calcaire, la cellulolyse est fortement ralentie, ce qui n'est pas le cas pour la lipidolyse.

B - EVOLUTION DES DIVERS SUBSTRATS A DIFFERENTES TENEURS EN EAU DES SOLS

Les échantillons de sols dans lesquels nous avons incorporé divers substrats ont été ajustés à des valeurs de pF comprises entre 1,9 et 4,2 et mis en incubation pendant quatre semaines. Durant ce temps, nous avons suivi le dégagement de gaz carbonique des divers essais. Les résultats sont portés dans le tableau 54 et les figures 44, 45 et 46).

		Rendzine modale St-Martin-de-F.			Sol lessivé rubéfié Nalliers 1			Sol lessivé glossique St-Sornin 3			
		pF 4,2	pF 3,0	pF 1,9	pF 4,2	pF 3,0	pF 1,9	pF 4,2	pF 3,0	pF 2,5	pF 1,9
Témoin	C.M.C.	10,3	14,8	20,5	11,6	25,4	23,0	11,5	14,7	19,2	22,0
Cellulose	C.M.C.	10,9	17,5	n.d.							
	%	8,5	21,4	n.d.							
Octadécane	C.M.C.	26,1	35,0	35,3	26,5	56,0	26,5	17,2	21,7	28,0	29,0
	%	36,9	47,1	35,7	14,9	30,7	5,5	23,4	28,8	36,0	30,1
Acide stéarique	C.M.C.	20,7	29,6	29,6	23,0	53,8	21,8	13,0	15,9	21,3	25,0
	%	27,3	38,7	25,0	12,8	31,4	1,0	7,8	6,8	11,2	16,0

Tableau 54 - Coefficient de minéralisation du carbone organique endogène (C.M.C.) et estimation du taux de substrat dégradé (%) à différents niveaux d'humidité après 4 semaines d'incubation à 28°C.

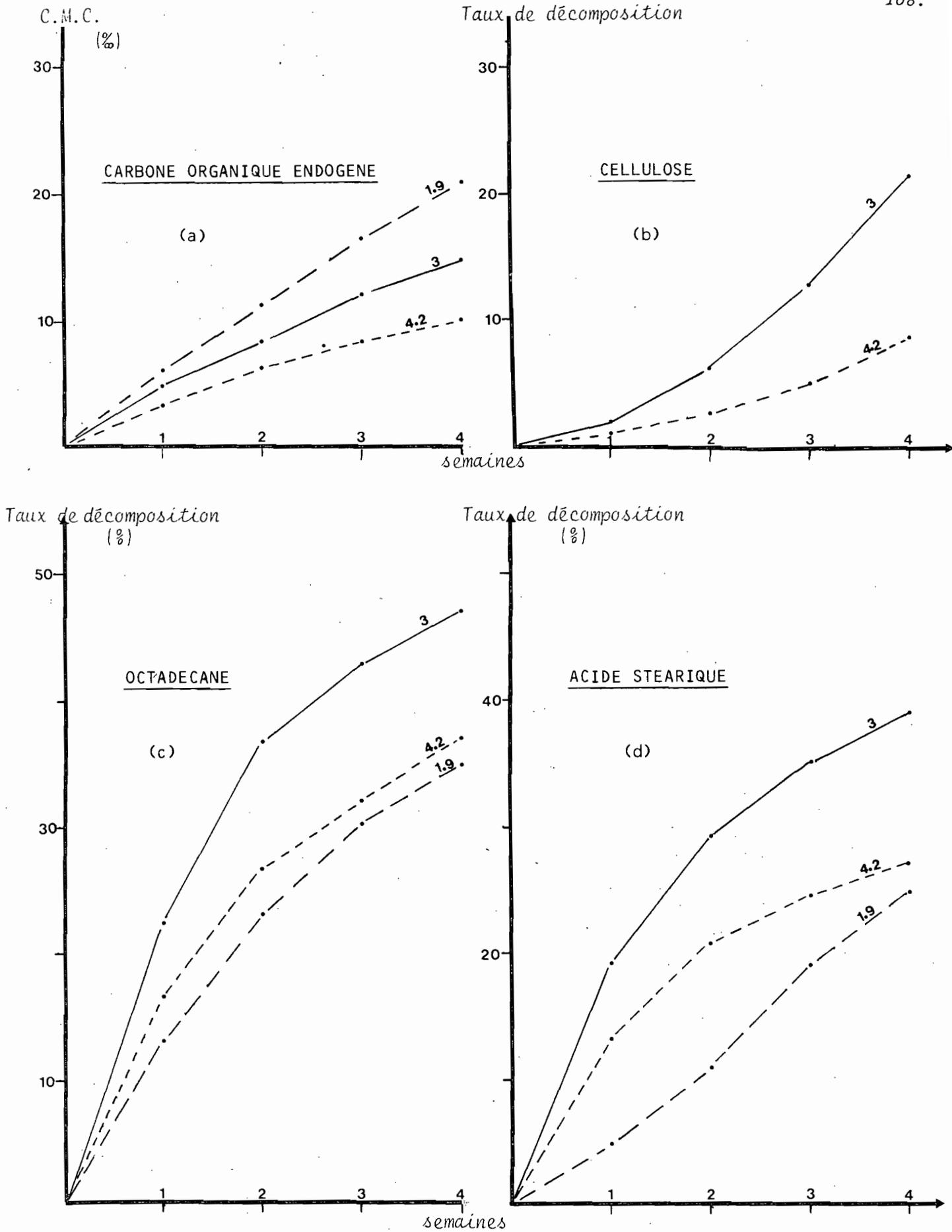


Figure 44.a à d - Estimation du coefficient de minéralisation du carbone organique endogène (C.M.C.) et du taux de décomposition (%) de la cellulose et des lipides à différents pF après 4 semaines d'incubation à 28°C dans la rendzine modale (St-Martin-de-Fraigneau)

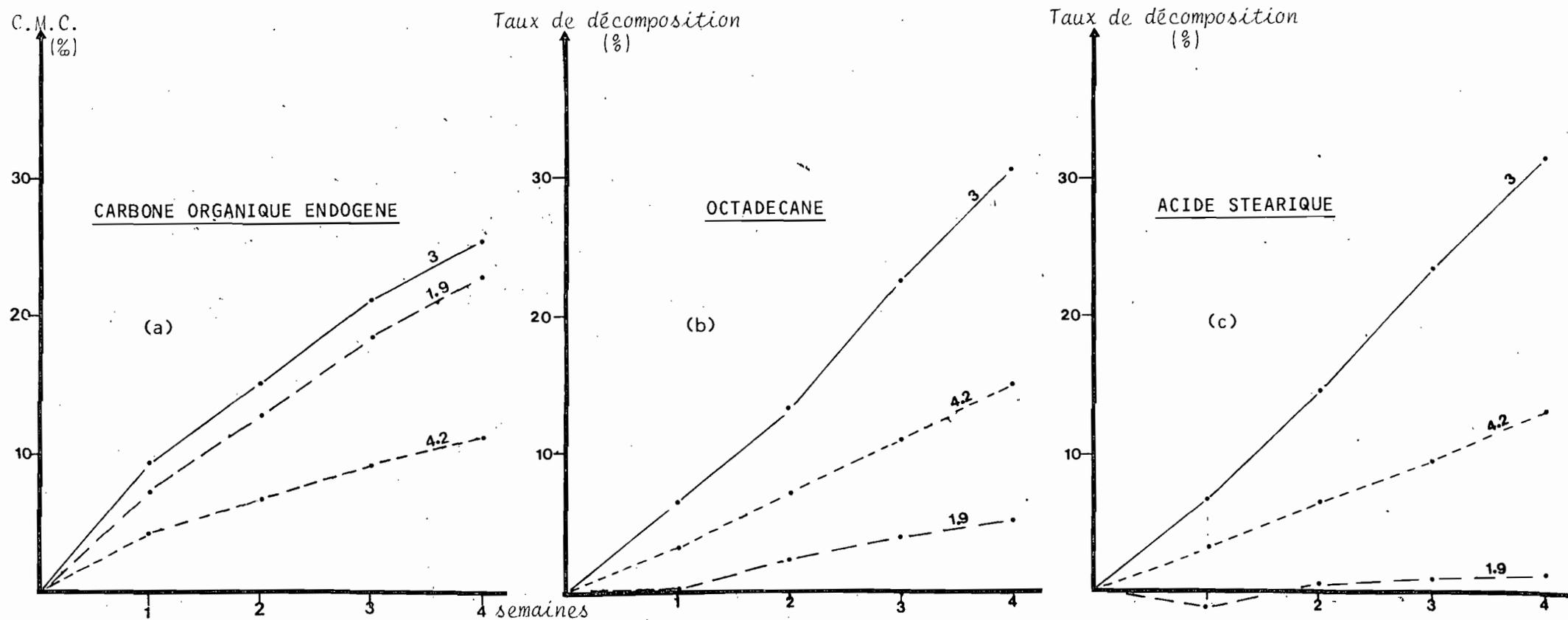


Figure 45. a. b. & c - Estimation du coefficient de minéralisation du carbone organique endogène (C.M.C.) et du taux de décomposition des lipides (%), à différents pF après 4 semaines d'incubation à 28°C dans le sol lessivé rubéfié (Nalliers 1).

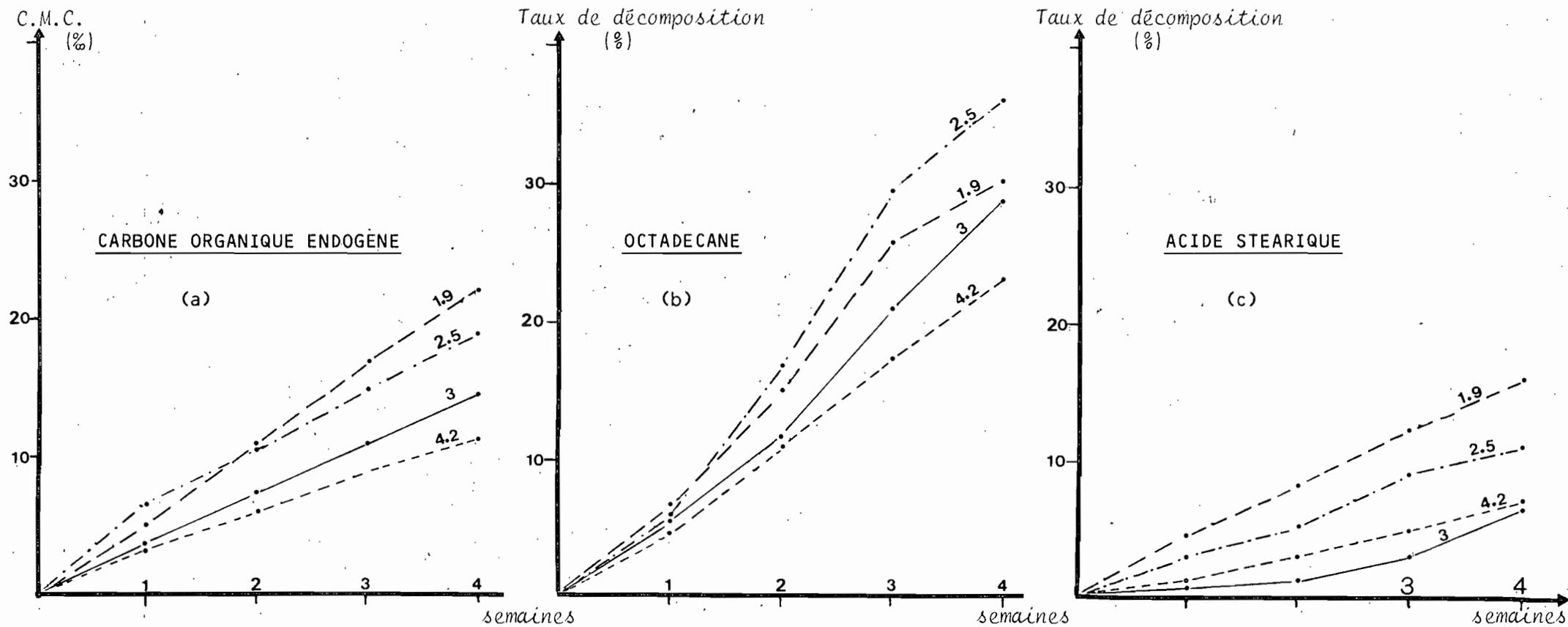


Figure 46.a.b.&c - Estimation du coefficient de minéralisation du carbone organique endogène (C.M.C.) et du taux de décomposition (%) des lipides à différents pF après 4 semaines d'incubation à 28°C dans le sol lessivé glossique (Saint-Sornin 3).

Fustec-Mathon (1970) a constaté dans les sols dunaires de la Côte Atlantique que la minéralisation du carbone endogène est maximum entre pF 1,3 et 2,1 environ. On obtient des résultats analogues pour les termes extrêmes de la séquence (rendzine et sol lessivé glossique), puisque le maximum enregistré correspond à pF 1,9. Cependant, dans les termes intermédiaires (sol lessivé rubéfié), la minéralisation atteint sa valeur la plus élevée pour des humidités du sol un peu plus faibles. Cela montre que, contrairement à ce que l'on admet souvent, l'humidité optimale pour l'activité respiratoire peut varier d'un sol à l'autre (Dommergues et Mangenot, 1970).

A pF 4,2 la minéralisation du carbone endogène reste intense dans tous les cas et représente environ 50 p. cent de son taux maximum. Ces résultats sont en accord avec les travaux de Dommergues (1962), Bachelier (1968) et Fustec-Mathon (1970) qui observent une minéralisation du carbone endogène encore active à ce pF.

Par contre, les microorganismes cellulolytiques sont très exigeants en eau et donc très sensibles à la dessiccation (Dommergues, 1962). Aussi estime-t-on généralement que la cellulolyse s'arrête lorsque l'humidité du sol est voisine de pF 4,2 (Dommergues, 1962 ; Charpentier, 1968 ; Fustec-Mathon, 1970). En fait, dans les sols étudiés ici, l'intensité de la cellulolyse à pF 4,2 décroît avec le pF. Le taux de dégradation obtenu en quatre semaines d'incubation à ce pF est le suivant :

Rendzine modale	Sol lessivé rubéfié	Sol lessivé glossique
8,5 %	4,6 %	0

Lorsque l'humidité du sol augmente, l'intensité de la cellulolyse s'accroît nettement (Figure 44.b) et elle atteindrait son maximum pour des teneurs en eau peu différentes de celles qui correspondent à la minéralisation optimale du carbone endogène (Szegi, 1962).

Enfin, les microorganismes responsables de la lipidolyse semblent avoir des exigences en eau beaucoup moins strictes que les germes cellulolytiques. A pF 4,2, leur activité reste encore très importante (Tableau 54 et figures 44, 45 et 46), ce qui est en contradiction avec d'autres observations (Pochon et de Barjac, 1958). La dégradation des lipides atteint son maximum vers pF 3 pour la rendzine modale et le sol lessivé rubéfié. En période de réhumectation, la lipidolyse arrive donc à son optimum avant la cellulolyse et la minéralisation du carbone organique endogène.

En milieu plus acide, dans le sol lessivé glossique, la vitesse de dégradation des lipides augmente jusqu'à des teneurs en eau comprises entre pF 2,5 et 1,9 ce qui correspond à l'optimum de minéralisation du carbone organique endogène ; par contre, à des teneurs en eau aussi élevées, la dégradation des lipides est très réduite dans le sol lessivé rubéfié. Or, nous avons vu dans la première partie du mémoire, que la porosité totale de ce sol est très faible. Aussi, dès que la teneur en eau est importante, le milieu tend à devenir asphyxiant. Dans ces conditions, le manque d'oxygène est vraisemblablement à l'origine de la mauvaise dégradation des lipides du sol lessivé rubéfié vers pF 1,9. Ces constatations sont en accord avec les travaux de Waksman *et al.* (1928), Waksman et Stevens (1929), Springer et Lehner (1952.a et b), Lukoshko (1965) et Patrick (1971) qui constatent une accumulation de lipides liée au ralentissement de leur dégradation en anaérobiose.

Au total, il semble que la minéralisation des lipides soit beaucoup plus affectée par un déficit en oxygène que par un assèchement du sol.

C - EVOLUTION DES DIVERS SUBSTRATS AU COURS DE L'ASSECHEMENT PROGRESSIF DU SOL

Après avoir ajusté l'humidité des échantillons de sol à pF 3, nous les avons mis à incuber à 28°C soit tels quels, soit après incorporation de cellulose en poudre, d'acide stéarique ou d'octadécane. Pour dessécher progressivement chaque essai jusqu'à pF 5,6, nous avons placé dans le bocal d'incubation un cristalliseur contenant une solution saturée de chlorure de sodium. Par ailleurs, afin que la solution d'hydroxyde de sodium N/5 servant à fixer le CO₂ dégagé ne perturbe pas le taux d'humidité relative de l'air, nous avons utilisé un artifice préconisé par Dommergues (1962) : la solution de NaOH a été placée dans des vases à couvercle rodé ; ceux-ci ont été ouverts de l'extérieur (au moyen d'une cordelette et sans ouvrir le bocal) deux heures seulement avant les dosages.

Les résultats concernant la minéralisation du carbone organique endogène des échantillons de sols en cours d'assèchement sont donnés sur la figure 47.

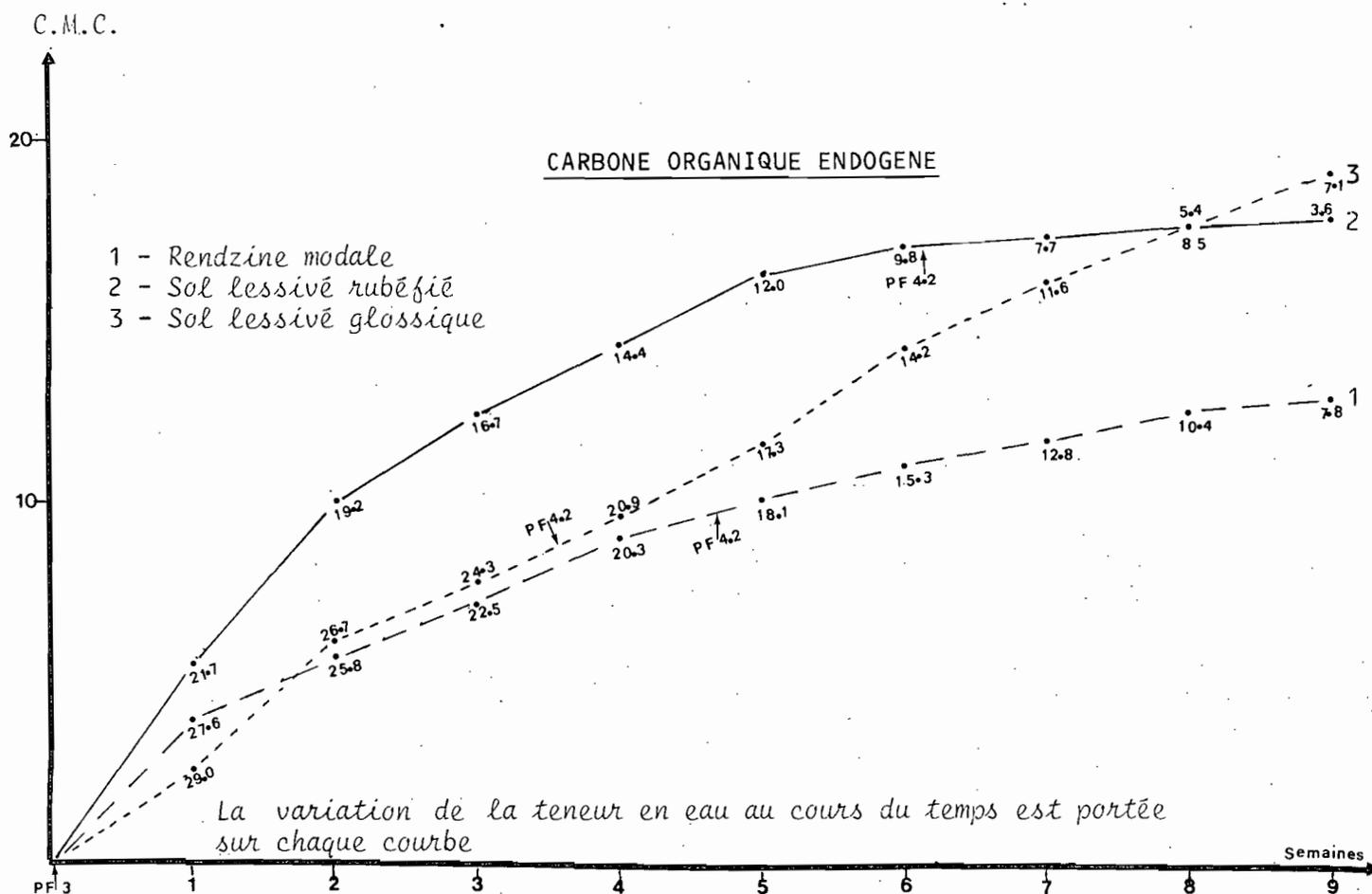


Figure 47 - Courbes cumulatives du coefficient de minéralisation du carbone sur neuf semaines d'incubation à 28°C des différents sols de la séquence soumis à une dessiccation progressive allant de pF 3 à pF 5,6.

On constate, pour la rendzine modale et le sol lessivé rubéfié, que la dessiccation de plus en plus poussée des échantillons freine progressivement la minéralisation du carbone organique endogène. Celle-ci devient pratiquement nulle après 9 semaines d'incubation. Par contre, le dessèchement de plus en plus intense a beaucoup moins d'effet sur le sol lessivé glossique, où la minéralisation n'est que peu ralentie aux pF élevés. Cette différence de comportement entre les sols à mull et le sol à moder doit être liée à la composition de la microflore qui évolue avec le pH du sol.

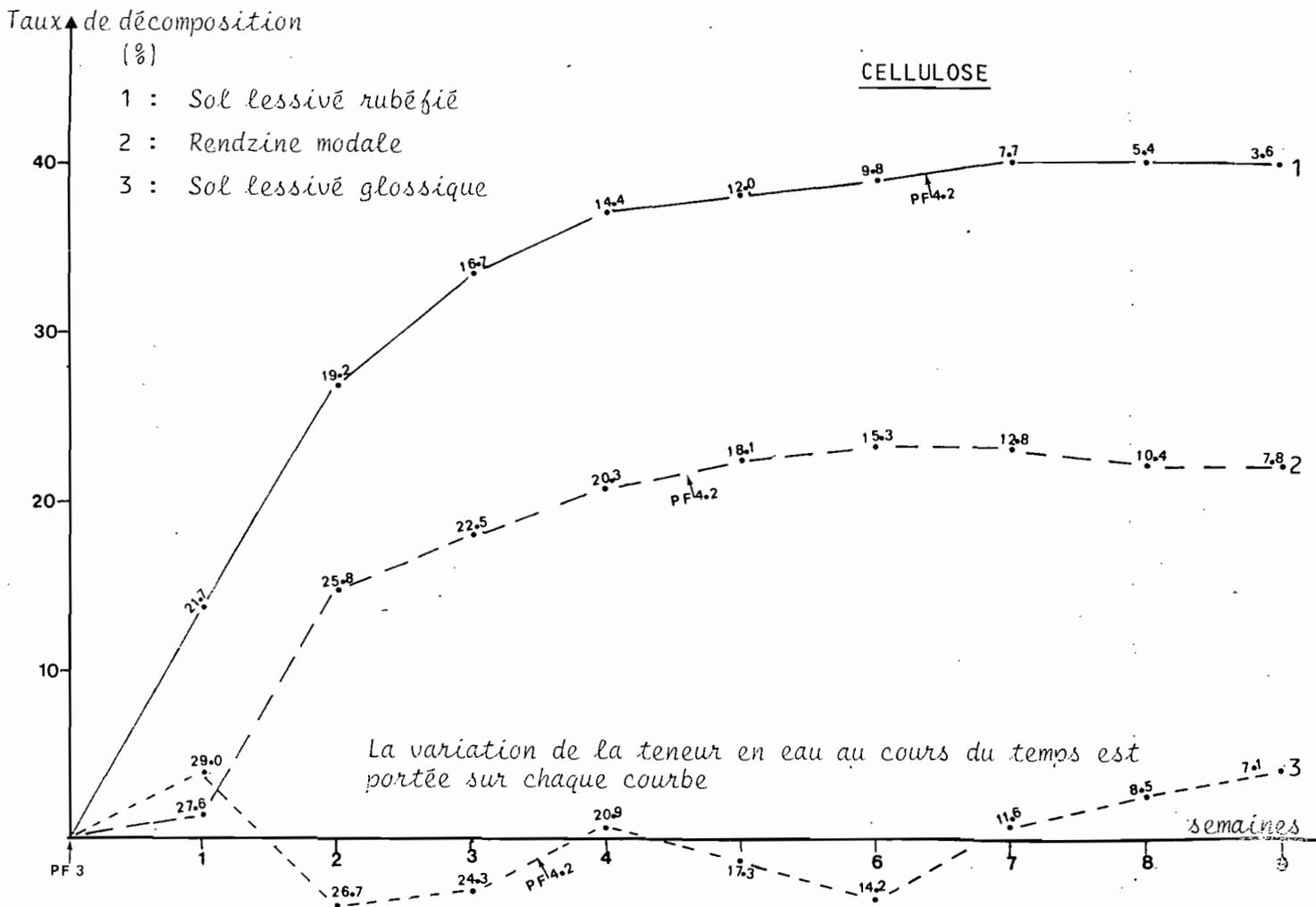


Figure 48 - Estimation du taux de décomposition (%) de la cellulose après 9 semaines d'incubation à 28°C dans différents sols de la séquence soumis à une dessiccation progressive allant de pF 3 à pF 5,6.

Dans les mêmes conditions, la cellulolyse (Figure 48) se poursuit jusqu'à pF 4,2 dans les sols à mull. Au niveau du moder (sol lessivé glossique) elle s'effectue normalement la première semaine ; ensuite, des phénomènes d'inhibition apparaissent : le dégagement de CO₂ devient bien inférieur à celui de l'échantillon témoin. La présence de composés antimicrobiens n'est pas à exclure dans ce type de sol. On sait notamment que la présence de tannins inhibe la cellulolyse en inactivant les exoenzymes microbiens responsables de l'hydrolyse des hydrates de carbone (Benoit et Starkey, 1968). Or, le sol lessivé glossique étudié ici est recouvert d'un taillis de chataigniers réputés riches en tannins. La dessiccation du milieu, en concentrant progressivement ces produits dans le sol, permet peut-être d'atteindre un seuil de toxicité.

En ce qui concerne la dégradation de l'hydrocarbure en C-18 (octadécane), on constate (figure 49) que dans la rendzine, sa dégradation, très intense vers pF 3, s'atténue rapidement avec la diminution du taux d'humidité et devient pratiquement nulle vers pF 4,2 (Tableau 55). Dans les deux sols lessivés (et surtout dans le sol lessivé glossique), la décomposition de l'octadécane est beaucoup moins affectée qu'en milieu calcaire par l'assèchement progressif du sol et elle se poursuit jusqu'à des pF bien supérieurs à pF 4,2 (Tableau 55 et figure 49).

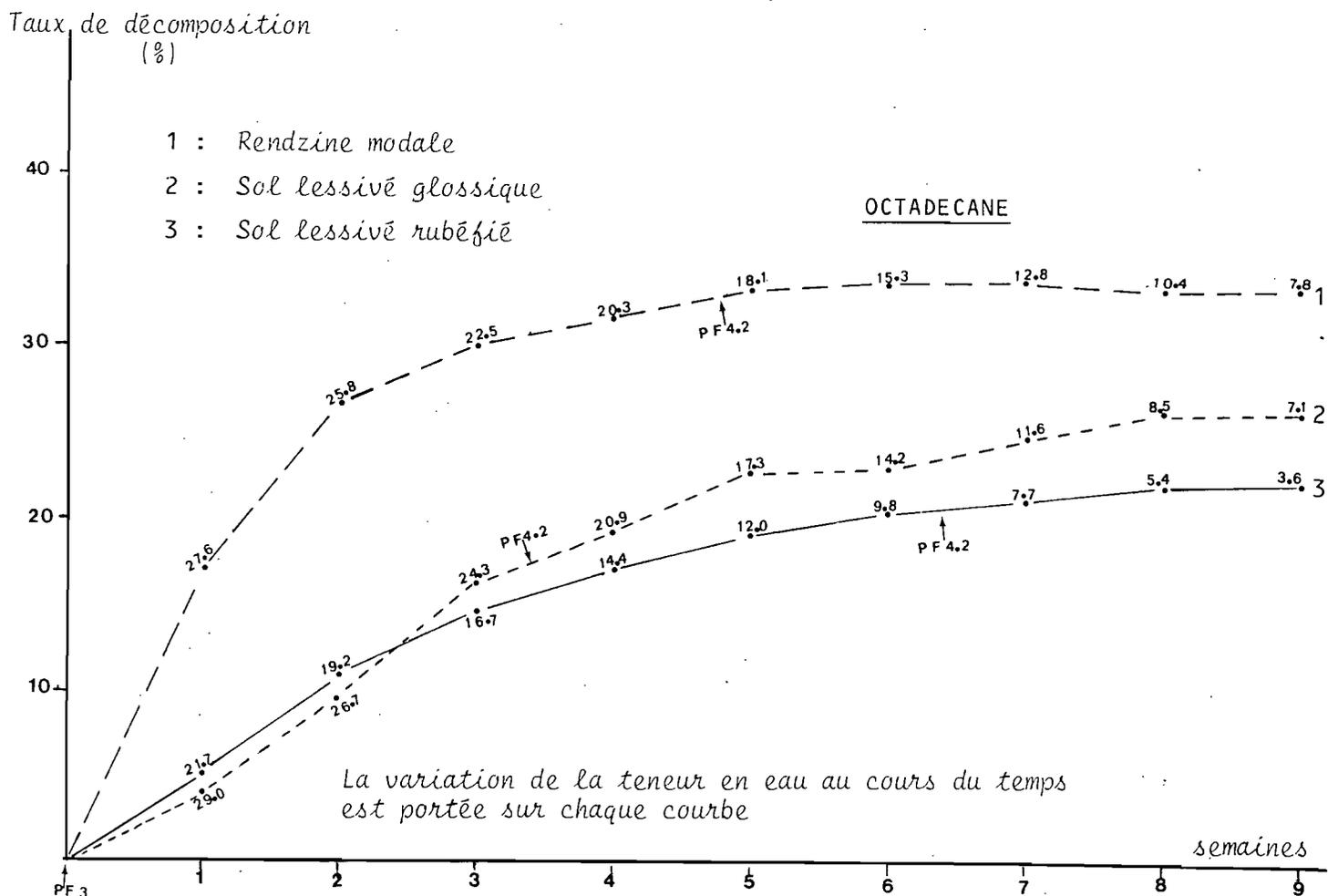


Figure 49 - Estimation du taux de décomposition (%) de l'octadécane après 9 semaines d'incubation à 28°C dans différents sols de la séquence soumis à une dessiccation progressive allant de pF 3 à pF 5,6.

Lipides	Sols	Rendzine modale Saint-Martin de-Fraigneau**	Sol lessivé rubéfié Nalliers 1 *	Sol lessivé glossique St-Sornin 3**
Octadécane		4,1	13,4	23,5
Acide stéarique		3,3	15,0	18,7

* Après la 6ème semaine d'incubation

** Après la 4ème semaine d'incubation

Tableau 55 - Taux de décomposition du substrat lipidique (%) durant une semaine lorsque le pF atteint une humidité voisine de 4,2.

La minéralisation de l'acide gras en C-18 (acide stéarique) s'arrête dans la rendzine vers pF 4,2. Dans le sol lessivé rubéfié, elle continue jusqu'à un pF supérieur à 4,2 tandis que dans le sol lessivé glossique, après des phénomènes d'inhibition qui se manifestent lors des premières semaines d'incubation, la microflore s'adapte et la dégradation se poursuit à un rythme lent jusqu'à des pF très élevés (Figure 50 et tableau 55).

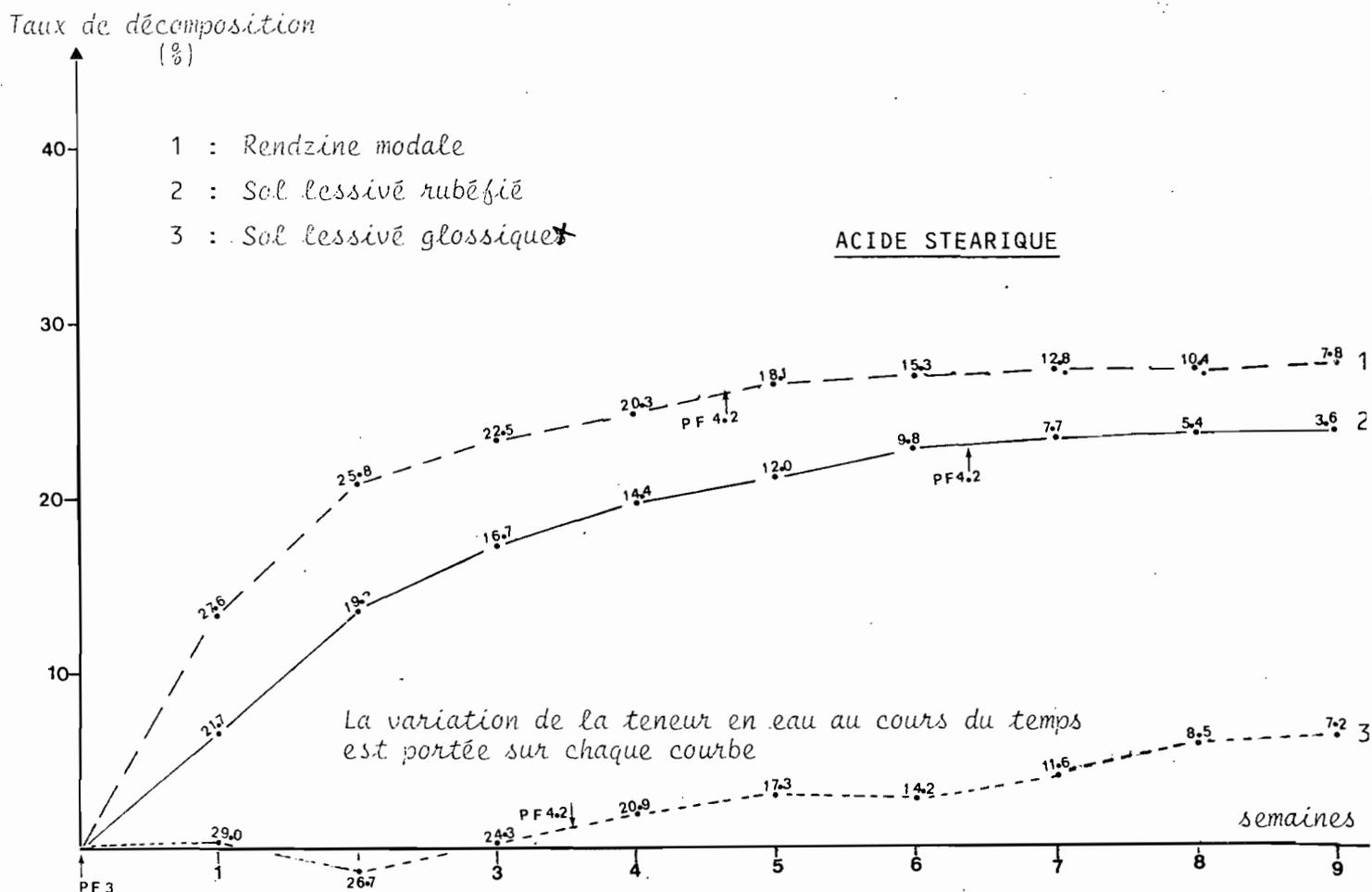


Figure 50 - Estimation du taux de décomposition (%) de l'acide stéarique après 9 semaines d'incubation à 28°C dans différents sols de la séquence soumis à une dessiccation progressive allant de pF 3 à pF 5,6.

Enfin, pour suivre comparativement les variations du taux de décomposition de chaque substrat en fonction de l'humidité du sol, nous avons exprimé le taux de dégradation de chaque forme de matière organique (calculé pour chaque semaine d'incubation) en p. cent de celui obtenu lors de la première semaine (pF voisin de 3). Les calculs effectués portent sur les résultats obtenus à partir des échantillons de sol lessivé rubéfié (Tableau 56). On vérifie qu'en période de dessiccation, la cellulolyse est la plus rapidement freinée; ensuite, c'est la dégradation des acides gras qui est inhibée. Enfin, la dégradation des hydrocarbures se poursuit à un taux non négligeable jusqu'à des pF très élevés.

pF	Semaines	C organique endogène	Cellulose	Octadécane	Acide stéarique
3,0	1	100,0	100,0	100,0	100,0
	2	69,5	97,1	103,0	101,5
	3	44,0	47,1	63,6	54,1
	4	30,5	22,5	41,8	40,0
	5	30,5	8,7	36,4	22,2
4,2	6	13,5	8,0	23,6	20,7
	7	5,1	5,1	18,2	8,9
	8	5,1	0,4	7,3	1,3
5,6	9	3,4	0,1	3,6	1,0

Résultats exprimés en p. cent du taux de dégradation obtenu lors de la 1^{ère} semaine d'incubation.

Tableau 56 - Variation du taux de décomposition de divers substrats dans le sol lessivé rubéfié en cours d'assèchement (Nalliers 1).

Au total, pour les sols biologiquement actifs, les expériences effectuées en milieu constamment sec et celles concernant un milieu en cours d'assèchement semblent donner des résultats contradictoires. En effet, un assèchement progressif ralentit fortement la cellulolyse et la lipidolyse qui sont presque nulles à pF 4,2. Mais lorsque le sol est maintenu à ce même pF, la minéralisation reste assez intense. Dans ce cas, on peut penser que la microflore finit par s'adapter à la sécheresse, ce qui permet la reprise d'une certaine activité minéralisatrice. Cette reprise d'activité peut être liée à une modification des différents groupes représentés dans la microflore. Faurie (1980) a en effet constaté qu'au cours de l'assèchement d'un sol calcaire, la proportion d'actinomyètes, bien moins sensibles que les bactéries à la dessiccation, passe de 30 à 50 % de la microflore totale.

En milieu biologiquement peu actif et nettement acide, où la proportion de champignons (microorganismes résistant bien à la sécheresse) est généralement considérée comme importante, l'effet de la dessiccation est nettement moins marqué : la minéralisation des lipides se poursuit à un rythme lent mais jusqu'à des pF très élevés.

D - CONCLUSION

Si l'on compare l'intensité de la lipidolyse et celle de la cellulolyse aux différents teneurs en eau des sols, on observe les points suivants :

- la lipidolyse atteint son maximum pour des teneurs en eau inférieures à celle correspondant à l'optimum de la cellulolyse ;
- en milieu très sec, la lipidolyse reste plus active que la cellulolyse, mais en milieu très humide, c'est l'inverse qui est observé.

CHAPITRE IV : EVOLUTION DES DEBRIS VEGETAUX LIGNIFIES

Après avoir étudié le pouvoir cellulolytique et lipidolytique des divers sols, nous allons essayer de préciser leur aptitude à dégrader la lignine.

Pour cela, nous avons introduit des fragments de rameaux ligneux (chêne, chataignier, pin maritime et callune) dans les échantillons de sol. Comme Mangenot et Kiffer (1972), nous avons taillé des bûchettes de 1,5 à 2 cm de diamètre et 6 cm de long, non débarrassées de leur écorce. Puis nous avons rempli des vases de culture (diamètre 18 cm) avec des échantillons d'horizons A ou Ap provenant des principaux sols de la séquence (rendzine modale, sol lessivé rubéfié, sol lessivé glossique). Dans chaque pot, nous avons introduit un lot de 5 bûchettes soigneusement séchées à 45°C et pesées. Pour chaque échantillon de sol, nous avons réalisé deux répétitions avec chacune des espèces de bois utilisées. Les vases de culture ont ensuite été placés en conditions naturelles, au champ, pendant dix-huit mois.

A - ETUDE DE LA DECOMPOSITION GLOBALE

Dans un premier temps, il est important de savoir à quelle vitesse disparaît l'ensemble des bioconstituants.

Après avoir récupéré les divers lots de bûchettes, nous les avons soigneusement lavés, séchés à 45°C et pesés. Les pertes de poids correspondant à 18 mois d'incubation sont données dans le tableau 57.

Sols \ Types de bois	Callune	Pin maritime	Chataignier	Chêne
Rendzine modale Saint-Martin-de-Fraigneau	23,5	18,4	38,1	26,0
Sol lessivé rubéfié Nalliers 1	16,2	15,5	26,4	27,4
Sol lessivé glossique Saint-Sornin 3	28,3	18,1	33,1	29,0

Résultats exprimés en p. cent de matériel végétal séché à 45°C.

Tableau 57 - Perte pondérale moyenne des lots de bûchettes après incubation de 18 mois.

Plusieurs faits apparaissent :

- la perte de poids des échantillons ligneux est générale mais, d'un sol à l'autre, les écarts ne sont pas très accentués. La perte est minimum au niveau du sol lessivé rubéfié, ce qui peut paraître contradictoire. En effet, nous

avons constaté précédemment que la minéralisation du carbone organique atteint son maximum dans ce type de sol. De plus, il a été montré que la lignine se dégradait très rapidement dans les mulls modérément acides, aérés et riches en azote, très favorables aux pourritures blanches (Duchaufour, 1977). Mais, en fait, le mull acide du sol lessivé rubéfié n'est sans doute pas très bien aéré lorsqu'il cesse d'être cultivé (ce qui est le cas dans ces expériences de longue durée) car la porosité y est faible et la structure instable. Abandonné à lui-même, le sol devient rapidement compact et une croûte se forme en surface. Or, on sait qu'une mauvaise aération du sol ralentit considérablement la ligninolyse (Gaucher, 1968) et la minéralisation du carbone organique. L'évolution des produits lignifiés peut donc être assez différente lorsque le milieu est périodiquement aéré par les façons culturales.

- Les fragments de bois, en fin d'expérience, ne présentent pas des modifications très apparentes et pratiquement pas de traces de brunissement. Ce dernier n'apparaît que sur les bûchettes de chataignier (riches en tannins) ayant séjourné dans le sol lessivé glossique.

- La perte de poids varie de la manière suivante :

Chataignier > Chêne > Callune > Pin maritime

Cet ordre est le même dans les trois sols étudiés (calcaires ou acides). On voit donc que les bois des feuillus se dégradent plus vite que ceux des éricacées et des pins, plantes généralement considérées comme acidifiantes et dont les litières sont difficilement biodégradables dans le sol.

B - EVOLUTION DE LA COMPOSITION ELEMENTAIRE

Nous avons dosé les principaux éléments qui constituent la matière organique des bûchettes avant et après mise en place (Tableau 58). Ensuite, tenant compte des variations de poids, nous avons établi pour chacun de ces éléments un bilan des pertes ou des gains qui se sont produits durant le séjour du bois dans le sol (Tableaux 59).

A partir de ces tableaux, on peut faire les remarques suivantes :

- Quels que soient l'espèce végétale et le type de sol, on note, après 18 mois, une augmentation du taux de carbone des bûchettes. Cependant, dans tous les cas, il y a eu pertes de carbone. Mais comme ces pertes sont inférieures à celles subies par les autres éléments, on constate finalement un enrichissement relatif en carbone.

- En ce qui concerne l'évolution de l'azote, les résultats varient selon les espèces végétales. Après évolution dans les sols, le taux d'azote des bûchettes de pin et de callune est inférieur au taux initial. Il y a effectivement eu des pertes durant le séjour dans le sol, mais comme celles-ci sont supérieures aux pertes en carbone, le rapport C/N a donc augmenté. Par contre, pour les bûchettes de chataignier et de chêne, le taux relatif d'azote augmente quel que soit le type de sol. En fait, au cours de l'évolution, les bûchettes de chataignier ont perdu de l'azote, mais cette perte est inférieure à celle du carbone, ce qui entraîne une diminution du rapport C/N. Les bûchettes de chêne conservent quant à elles tout leur azote (rendzine) ou même en fixent (sols lessivés) et finalement le rapport C/N diminue là aussi.

- Après évolution dans les divers sols, le taux relatif d'hydrogène de toutes les bûchettes augmente. En fait, il y a bien eu gain d'hydrogène pour la callune et le pin. Par contre, les bûchettes de chataignier et de chêne conser-

vent à peu près leur hydrogène ou même en perdent un peu (rendzine). Mais comme ces pertes sont toujours inférieures à celles de carbone, le rapport C/H diminue finalement dans tous les cas.

- Le taux relatif d'oxygène diminue pour tous les lots de bûchettes et, quel que soit le type de sol, on observe toujours des pertes qui sont supérieures à celles des autres éléments. Ces résultats peuvent surprendre car on admet généralement que le nombre de fonctions COOH augmente au cours de l'évolution. En fait, ces pertes d'oxygène, sans doute liées à la disparition d'une partie des polysaccharides, ne sont pas incompatibles avec une augmentation des fonctions acides.

Au total, au cours des premiers stades de l'humification, l'évolution de la composition élémentaire* des bûchettes dépend essentiellement des espèces végétales considérées. La nature du milieu n'a qu'un rôle tout-à-fait secondaire.

Echantillons	C	N	C/N	H	C/H	O	C/O
NON INCUBES							
Callune	42,59	0,39	109,2	5,43	7,8	51,08	0,8
Pin maritime	45,14	0,46	98,1	5,81	7,8	47,62	0,9
Chataignier	41,22	0,46	89,6	5,42	7,6	51,86	0,8
Chêne	41,80	0,43	97,2	5,41	7,7	51,12	0,8
INCUBES							
<u>Rendzine modale</u>							
Callune	48,12	0,38	126,6	7,93	6,1	42,36	1,1
Pin maritime	47,85	0,27	177,2	7,30	6,5	42,53	1,1
Chataignier	47,87	0,60	79,8	7,05	6,8	42,93	1,1
Chêne	46,66	0,55	84,8	6,90	6,8	43,83	1,1
<u>Sol lessivé rubéfié</u>							
Callune	47,81	0,30	159,4	7,47	6,4	43,03	1,1
Pin Maritime	49,40	0,26	190,0	7,95	6,2	40,57	1,2
Chataignier	46,76	0,51	91,7	7,64	6,2	43,83	1,1
Chêne	48,03	0,76	63,2	7,51	6,4	41,13	1,2
<u>Sol lessivé glossique</u>							
Callune	47,72	0,58	82,3	7,70	6,2	43,21	1,1
Pin maritime	49,51	0,31	159,7	7,26	6,8	41,57	1,2
Chataignier	47,72	0,58	82,3	7,36	6,5	43,16	1,1
Chêne	48,20	0,73	66,0	7,76	6,2	41,81	1,1

Résultats exprimés en % de substance séchée à 45°C.

Tableau 58 - Composition élémentaire des bûchettes avant et après un séjour de 18 mois dans différents sols de la séquence.

* Dosages aimablement effectués par Monsieur PORTAL au Centre de Pédologie Biologique de Nancy. que je remercie.

Echantillons	C	N	H	O
Rendzine modale				
Callune	- 13,5	- 25,4	+ 11,8	- 36,5
Pin maritime	- 13,5	- 52,1	+ 2,5	- 27,2
Chataignier	- 28,0	- 19,2	- 19,6	- 48,7
Chêne	- 17,4	- 2,6	- 5,6	- 36,5
Sol lessivé rubéfié				
Callune	- 5,9	- 35,5	+ 15,3	- 29,6
Pin maritime	- 7,5	- 52,2	+ 15,7	- 28,0
Chataignier	- 24,4	- 18,4	+ 3,7	- 37,8
Chêne	- 16,5	+ 28,4	+ 0,8	- 41,5
Sol lessivé glossique				
Callune	- 19,5	+ 6,8	+ 1,8	- 39,2
Pin maritime	- 10,2	- 44,8	+ 2,3	- 28,5
Chataignier	- 22,8	- 15,9	- 9,4	- 44,5
Chêne	- 18,4	+ 20,2	+ 1,5	- 42,1

Tableau 59 - Taux de perte ou gain (p. cent) pour chacun des éléments après 18 mois de résidence dans le sol.

C - EVOLUTION COMPAREE DES DIVERS BIOCONSTITUANTS DES BUCHETTES (Tableaux 60 à 66)

1 - Produits hydrolysables par H₂SO₄ à chaud

Avant d'étudier l'évolution de la cellulose, de la lignine et des lipides, nous avons suivi la dynamique des produits hydrolysables. Leur taux correspond au complément de 100 de la teneur en lignine brute.

Il se produit toujours des pertes au cours de l'expérience, mais celles-ci ont sensiblement intensité dans tous les sols ; par contre, on observe des différences en fonction du type de végétation. Au stade initial, c'est dans le pin et la callune que le taux de produits hydrolysables est le plus faible. Mais au cours de l'évolution dans le sol, les pertes sont moins importantes pour ces deux plantes que pour les feuillus. Finalement, après dix-huit mois, le taux relatif de produits hydrolysables tend à augmenter pour le pin et la callune alors qu'il tend à diminuer pour les feuillus.

En résumé, les produits hydrolysables issus des bois de pin et de callune sont moins facilement biodégradables que ceux qui proviennent du chêne et du chataignier.

2 - Polysaccharides

Une partie des polysaccharides s'est dégradée durant le séjour des bûchettes dans le sol. La perte est semblable d'un mull à l'autre, mais elle est un peu plus faible au niveau du moder (sol lessivé glossique), où nous avons déjà constaté un ralentissement de la cellulolyse.

Par ailleurs, on observe des différences importantes en fonction de l'origine des bûchettes. Les polysaccharides de callune et de pin (plantes aci-

difiantes) se dégradent beaucoup plus lentement que ceux du chataignier et du chêne. On sait, en effet, que la cellulolyse des plantes acidifiantes se décompose à un rythme lent avec évolution des sucres en produits acides (Duchaufour, 1972).

Echantillons	Produits hydrolysables	Polysaccharides	Lignine nette	$\frac{\text{Produits hydrolysables}}{\text{Lignine nette}}$	Lipides (mg de C/100 g de matériel végétal)
NON INCUBES					
Callune	65,6	9,0	28,2	2,32	484
Pin maritime	57,8	9,9	38,9	1,48	4 731
Chataignier	71,8	12,4	20,8	3,45	278
Chêne	68,2	9,8	23,6	2,90	448
INCUBES					
Rendzine modale					
Callune	69,5	7,6	25,6	2,71	395
Pin maritime	61,1	11,0	36,1	1,69	738
Chataignier	68,7	8,2	25,7	2,67	219
Chêne	72,5	7,5	18,5	3,91	267
Sol lessivé rubéfié					
Callune	70,7	7,8	23,0	3,07	420
Pin maritime	59,1	10,5	36,5	1,62	1 017
Chataignier	71,3	7,9	21,7	3,28	299
Chêne	63,9	7,1	25,4	2,51	418
Sol lessivé glossique					
Callune	62,8	9,1	29,7	2,11	479
Pin maritime	59,4	10,8	36,7	1,61	968
Chataignier	69,5	8,5	23,4	2,97	243
Chêne	67,7	10,7	23,3	2,91	267

Tableau 60 - Distribution de quelques constituants des bûchettes avant et après 18 mois de résidence dans le sol (% matériel végétal séché à 45°C)

3 - Lipides

Les études où la dégradation des lipides dans le sol est comparée à celle des autres bioconstituants sont très rares. Signalons cependant le travail d'Alexandrova (1972).

D'une manière générale, nous constatons, qu'après 18 mois au champ, une fraction importante des lipides a été dégradée. Le plus souvent, leur décomposition est supérieure à celle des polysaccharides : c'est surtout le cas pour les bûchettes des plantes acidifiantes, et notamment celles du pin où une fraction importante des lipides est constituée de produits légers, dont cer-

tains sont volatils. Inversement, au niveau des bûchettes de chêne et de châtaignier, c'est la dégradation des polysaccharides qui l'emporte dans la plupart des cas.

Signalons enfin que malgré une première phase de dégradation rapide, les bûchettes de pin contiennent encore deux à trois fois plus de lipides que celles des autres plantes en fin d'expérience. Il aurait été très intéressant de prolonger ces expériences pour tester les possibilités de dégradation de cette fraction résiduelle.

Echantillons	Produits hydrolysables (%)	Polysaccharides (%)	Lignine nette (%)	Lipides (%)
Rendzine modale				
Callune	15,9	35,5	30,5	37,6
Pin maritime	9,2	9,7	24,3	87,3
Châtaignier	39,4	59,2	23,5	51,2
Chêne	18,1	43,2	41,8	55,9
Sol lessivé rubéfié				
Callune	6,1	27,3	31,5	27,3
Pin maritime	7,8	10,4	20,7	81,8
Châtaignier	25,0	53,3	24,0	20,8
Chêne	28,9	47,0	21,9	32,3
Sol lessivé glossique				
Callune	29,3	27,5	24,4	29,0
Pin maritime	11,0	11,0	22,7	83,3
Châtaignier	33,7	54,5	25,1	41,7
Chêne	26,8	22,6	30,2	57,7

Tableau 61 - Pertes (%) pour quelques constituants des bûchettes après 18 mois de résidence dans le sol.

4 - Lignine

En fonction du milieu, la lignine semble pouvoir se dégrader selon deux ou trois modes différents (Mangenot, 1974 ; Duchaufour, 1977) :

- En milieu calcaire, sous l'influence de pourritures brunes, la lignine se dégrade moins vite que la cellulose. Après destruction de la charpente cellulolytique, il apparaît des sites réactionnels sur les molécules de lignine qui se condensent. La lignine peut également réagir avec les composés azotés et former des complexes ligno-protéïques.
- Sous l'influence des pourritures blanches à des pH généralement plus bas que dans le cas précédent, la lignine est décomposée aussi vite ou plus vite que les polysaccharides. Il y a production de composés phénoliques à petites molécules qui peuvent ensuite se polymériser pour donner des acides fulviques ou des acides humiques bruns. L'intensité de la polymérisation varie selon les conditions du milieu.
- Enfin, il est possible qu'entre ces deux types fondamentaux de pourritures, il existe des intermédiaires. Dans ce cas, la lignine serait décomposée selon des modalités rappelant celles de la pourriture blanche, bien que la cellulose soit décomposée plus vite que la lignine (Haider et Domsch, 1969).

Types de bois	Produits hydrolysables	Polysaccharides	Lignine nette	Lipides
Callune	17,1	30,1	28,8	31,3
Pin Maritime	9,3	10,4	22,6	84,1
Chataignier	32,6	55,7	24,2	37,9
Chêne	24,6	37,6	31,3	48,6

Tableau 62 - Perte moyenne (%) pour chacun des bioconstituants des bûchettes en fonction du type de végétation.

Les résultats obtenus ici montrent que, globalement, la perte de lignine est sensiblement la même pour tous les sols (Tableau 63). Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par Selmi (1975) et Toutain (1974) qui montrent qu'au cours des deux premières années, la lignine disparaît sensiblement à la même vitesse dans le mull et le moder.

Types de sols	Produits hydrolysables (%)	Polysaccharides (%)	Lignine nette (%)	Lipides (%)
Rendzine modale Saint-Martin-de-Fraigneau	20,6	36,9	30,0	58,0
Sol lessivé rubéfié Nalliers 1	17,0	34,5	24,5	40,6
Sol lessivé glossique Saint-Sornin 3	25,2	28,9	25,6	52,9

Tableau 63 - Perte moyenne pour chacun des bioconstituants des bûchettes en fonction du type de sol.

Echantillons	$\frac{\text{Perte polysac.}}{\text{Perte lignine}}$	$\frac{\text{Perte lipides}}{\text{Perte lignine}}$	$\frac{\text{Perte polysac.}}{\text{Perte lipides}}$
Rendzine modale			
Callune	1,16	1,23	0,94
Pin maritime	0,40	3,59	0,11
Chataignier	2,50	2,17	1,15
Chêne	1,03	1,33	0,77
Sol lessivé rubéfié			
Callune	0,86	0,86	1,00
Pin maritime	0,50	3,95	0,12
Chataignier	2,22	0,86	2,56
Chêne	2,14	1,47	1,45
Sol lessivé glossique			
Callune	1,12	1,18	0,94
Pin maritime	0,48	3,67	0,13
Chataignier	2,17	1,66	1,30
Chêne	0,74	1,91	0,39

Tableau 64 - Comparaison des vitesses de dégradation des divers bioconstituants des bûchettes.

La lignine brute obtenue après hydrolyse par H_2SO_4 comprend, à côté de la lignine proprement-dite, des éléments minéraux, des composés phénoliques, des tannins et des protéines (Selmi, 1975). Le rapport C/N de cette fraction insoluble en milieu acide tend à diminuer avec le pH du sol où les bûchettes ont évolué (Tableau 65). En effet, les composés phénoliques et les tannins libérés au cours de la dégradation des bois forment des complexes avec les protéines du milieu. La formation de tels complexes protège ces protéines contre la biodégradation (Handley, 1954). Les composés formés seraient d'autant plus résistants que le milieu est plus acide (Coulson et al., 1960 ; Davies et al., 1964). On explique ainsi la lenteur de la minéralisation de l'azote et la formation d'humus brut en milieu désaturé sous callune (Dommergues et Mangenot, 1970). Il est donc normal que dans nos expériences le rapport C/N de la lignine brute soit minimum au niveau du moder.

Echantillons	Callune	Pin maritime	Chataignier	Chêne
<u>Non incubés</u>	109,4	157,5	64,6	60,3
<u>Incubés</u>				
Rendzine modale (St-Martin-de-F.)	94,0	161,0	84,5	40,1
Sol lessivé rubéfié (Nalliers 1)	83,5	146,1	64,2	34,5
Sol lessivé glossique (St Sornin 3)	51,8	135,6	58,4	41,0

Tableau 65 - Rapport C/N de la lignine brute de différents bois avant et après séjour dans le sol.

Comparons maintenant le taux de dégradation de la lignine nette à celui des polysaccharides pour essayer de déterminer le type de pourriture qui interviendrait dans les processus de dégradation (Tableau 64).

En présence de bûchettes de callune ou de pin, la perte de lignine est supérieure ou sensiblement égale à celle des polysaccharides. La dégradation de ces bois se serait donc faite sous l'influence des pourritures blanches dans tous les sols et quel que soit le pH du milieu.

Les bûchettes de chataignier évoluent d'une manière différente car les polysaccharides sont dégradés au moins deux fois plus vite que la lignine. Dans ce cas, la décomposition peut s'être faite soit sous l'influence des pourritures brunes, soit sous l'influence de microorganismes de type intermédiaire.

Les bûchettes de chêne évoluent comme celles des plantes acidiphiles (rendzine modale, sol lessivé glossique) ou comme celles de chataignier (sol lessivé rubéfié).

Par ailleurs, Mangenot (1974) utilise les valeurs du rapport perte de lignine/perte de poids total. Selon lui, on peut considérer qu'il y a intervention des pourritures blanches lorsque ce rapport est $> 0,6$. Si l'on se réfère à cette valeur critique, il y aurait intervention des pourritures blanches dans tous les cas (Tableau 66). En fait, si l'on confronte les valeurs du rapport perte de polysaccharides/perte de lignine avec les résultats du tableau 66, on peut en conclure que l'évolution des bûchettes de chataignier (et celles de chêne incubées dans le sol lessivé rubéfié) se ferait plutôt selon le type intermédiaire. Remarquons, cependant qu'on observe des traces de brunissement sur les bûchettes de chataignier ayant séjourné dans le sol lessivé glossique.

placées

Types de sols \ Types de bois	Callune	Pin maritime	Chataignier	Chêne
Rendzine modale Saint-Martin-de-Fraigneau	1,29	1,32	0,61	1,60
Sol lessivé rubéfié Nalliers 1	1,94	1,33	0,91	0,80
Sol lessivé glossique Saint-Sornin 3	0,86	1,25	0,75	1,04

Tableau 66 - Variation du rapport perte de lignine/perte poids total en fonction des différents sols et des divers types de végétation.

Au total, tandis que le rythme de dégradation de la cellulose varie beaucoup avec la nature de la végétation, celui de la lignine est sensiblement le même quel que soit le type de sol et l'origine du bois. Dans un premier temps, la décomposition des bûchettes (qu'elle soit de type "pourriture blanche" ou du type "intermédiaire") aboutirait dans tous les cas à la libération de composés phénoliques à petites molécules susceptibles de se condenser en substances humiques faiblement polymérisées.

Il faudrait prolonger ces expériences jusqu'au-delà de la deuxième année.

D - EVOLUTION DE LA FRACTION ALCALINO-SOLUBLE (Tableaux 67 et 68)

Pour les bûchettes non incubées, le taux de substances extractibles par le pyrophosphate de sodium 0,1 M est très variable d'une espèce végétale à l'autre. Par contre, après incubation, il devient remarquablement constant, alors que 60 à 80 % de cette fraction a disparu. Initialement, celle-ci devait donc contenir une part importante de substances non spécifiquement humiques et facilement biodégradables (sucres, acides aminés, lipides à chaînes courtes).

Cette diminution de la fraction alcalino-soluble affecte surtout les acides humiques pour les bûchettes de pin et de callune, et les acides fulviques pour les bûchettes de chataignier et de chêne. En conséquence, le rapport acides fulviques/acides humiques augmente dans le premier cas et diminue dans le second.

On constate donc que la nature des substances humiques qui apparaissent au cours des premiers stades de l'évolution des débris ligneux dépend essentiellement du type de végétation.

E - EVOLUTION DES ELEMENTS MINERAUX (Tableaux 69, 70 et 71)

Initialement, le taux de cendres des bûchettes peut varier du simple au double, d'une espèce végétale à l'autre. Durant l'incubation, des phénomènes d'échange se produisent entre les fragments ligneux et le milieu minéral qui les entoure. Ainsi, en fin d'expérience, la teneur en cendres des bûchettes a nettement augmenté.

Echantillons	Taux ¹ extraction	Acides ² fulviques	Acides ² humiques	AF AH
NON INCUBES				
Callune	10,3	69,2	30,8	2,2
Pin maritime	20,6	44,8	55,2	0,8
Chataignier	15,0	87,9	12,1	7,2
Chêne	12,2	80,1	19,9	4,0
INCUBES				
Rendzine modale				
Callune	4,1	78,5	21,5	3,6
Pin maritime	4,1	68,2	31,8	2,1
Chataignier	3,4	65,1	34,9	1,9
Chêne	3,3	76,6	23,4	3,3
Sol lessivé rubéfié				
Callune	3,2	81,4	18,6	4,4
Pin maritime	3,7	63,9	36,1	1,8
Chataignier	3,5	68,6	31,4	2,2
Chêne	7,2	62,9	37,1	1,7
Sol lessivé glossique				
Callune	4,4	76,0	24,0	3,2
Pin maritime	3,4	69,7	30,3	3,4
Chataignier	4,8	74,4	25,6	4,8
Chêne	4,8	71,3	28,7	4,8

¹ Exprimé en % du carbone total

² Exprimés en % du total extractible

Tableau 67 - Etude quantitative et qualitative de la fraction solubilisée par le pyrophosphate de sodium 0,1 M avant et après séjour dans le sol (% matériel végétal séché à 45°C).

Echantillons	Total extractible (%)	Acides fulviques (%)	Acides humiques (%)	
Rendzine modale	Callune	65,6	61,0	76,0
	Pin maritime	82,5	73,8	90,1
	Chataignier	83,6	87,8	52,6
	Chêne	77,5	78,5	73,5
Sol lessivé rubéfié	Callune	70,9	65,8	82,4
	Pin maritime	83,6	76,6	89,3
	Chataignier	80,6	84,9	49,8
	Chêne	50,9	61,4	8,5
Sol lessivé glossique	Callune	63,3	61,9	72,9
	Pin maritime	85,0	76,7	91,8
	Chataignier	75,4	79,2	48,1
	Chêne	67,5	71,1	53,2

Tableau 68 - Pertes en substances alcalino-solubles après 18 mois de séjour dans le sol.

L'intensité et le sens des échanges varient selon le type de sol et la nature des cations métalliques du milieu. Considérons d'abord la dynamique du potassium. Celui-ci formant des sels très solubles tend à s'éliminer dans tous les cas et plus rapidement que les autres cations. Remarquons que la perte est un peu plus importante pour les bûchettes des feuillus que pour celles de pin maritime et de callune.

En ce qui concerne le calcium, le sens des échanges dépend du type de sol : en milieu calcaire (rendzine), les bûchettes s'enrichissent en calcium alors qu'elles en cèdent au milieu extérieur lorsque le pH du sol est acide (sol lessivé glossique). Par ailleurs, il semble y avoir compétition entre le calcium et le magnésium. En effet, les fragments ligneux tendent à perdre leur magnésium en proportions d'autant plus importantes que le sol est plus riche en calcium échangeable.

Echantillons	Callune	Pin maritime	Chataignier	Chêne
<u>Non incubés</u>	5,1	9,7	10,4	12,4
<u>Incubés</u>				
Rendzine modale	12,1	20,5	15,5	20,6
Sol lessivé rubéfié	13,9	18,2	12,6	25,7
Sol lessivé glossique	7,9	13,5	11,8	15,0

Résultats exprimés en p. mille de substances séchées à 105°C.

Tableau 69 - Taux de cendre.

Echantillons	K	Ca	Mg	Mn	Fe	Al
<u>NON INCUBES</u>						
Callune	1,17	0,84	0,31	0,28	0,10	0,14
Pin maritime	0,67	3,48	0,63	0,05	0,12	0,21
Chataignier	2,29	1,73	0,93	0,20	0,21	0,15
Chêne	1,88	4,20	0,43	0,43	0,09	0,25
<u>INCUBES</u>						
<u>Rendzine modale</u>						
Callune	0,35	5,55	0,14	0,15	0,18	0,26
Pin maritime	0,27	7,89	0,20	0,05	0,26	0,40
Chataignier	0,34	6,51	0,29	0,12	0,14	0,18
Chêne	0,20	7,10	0,21	0,40	0,18	0,23
<u>Sol lessivé rubéfié</u>						
Callune	0,21	2,23	0,12	0,06	0,27	0,46
Pin maritime	0,18	3,53	0,23	0,07	0,69	0,61
Chataignier	0,19	3,20	0,21	0,08	0,31	0,42
Chêne	0,34	8,18	0,34	0,47	0,29	0,45
<u>Sol lessivé glossique</u>						
Callune	0,46	0,62	0,39	0,07	0,13	0,26
Pin maritime	0,17	2,15	0,55	0,04	0,10	0,34
Chataignier	0,22	1,76	0,74	0,11	0,18	0,17
Chêne	0,30	4,85	0,58	0,30	0,09	0,15

Résultats exprimés en mg d'élément/kg de matériel végétal séché à 105°C.

Tableau 70 - Dosages des divers éléments minéraux avant et après séjour de 18 mois dans le sol.

Echantillons	K	Ca	Mg	Mn	Fe	Al
Rendzine modale						
Callune	- 75,8	+ 434,4	- 73,6	- 56,7	+ 45,7	+ 50,2
Pin maritime	- 65,3	+ 95,2	- 72,7	- 14,0	+ 86,6	+ 64,1
Chataignier	- 90,2	+ 148,0	- 79,5	- 60,5	- 56,1	- 20,9
Chêne	- 91,6	+ 34,5	- 61,2	- 26,0	+ 59,1	- 26,8
Sol lessivé rubéfié						
Callune	- 84,1	+ 135,2	- 65,8	- 81,0	+ 139,1	+ 191,5
Pin maritime	- 75,5	- 7,6	- 66,8	+ 27,0	+ 424,8	+ 164,8
Chataignier	- 93,5	+ 44,8	- 82,3	- 68,7	+ 15,6	+ 119,3
Chêne	- 85,9	+ 52,0	- 38,3	- 14,7	+ 151,7	+ 40,6
Sol lessivé glossique						
Callune	- 70,2	- 44,1	- 4,8	- 81,1	- 1,7	+ 40,8
Pin maritime	- 77,8	- 46,1	- 23,8	- 30,0	- 27,2	+ 41,5
Chataignier	- 93,2	- 40,7	- 43,4	- 61,0	- 39,0	- 19,4
Chêne	- 87,8	+ 15,5	+ 3,4	- 46,6	- 23,3	- 54,0

Tableau 71 - Taux de pertes ou gains (%) pour chacun des éléments après 18 mois de séjour dans le sol.

A une exception près, le manganèse tend à s'éliminer de tous les bois en cours de décomposition quel que soit le sol dans lequel on les a introduits.

Dans le cas du fer, les échanges entre le sol et les bûchettes dépendent du type d'humus. Dans les mulls, les fragments de bois se sont enrichis en cet élément alors qu'on observe le contraire au contact du mull-moder. En conséquence, l'humification s'orientera différemment d'un milieu à l'autre : dans les mulls, dès que la lignine libèrera des composés organiques simples, ceux-ci seront insolubilisés et condensés pour former des acides humiques et de l'humine ; par contre, dans le moder, en milieu appauvri en fer, les composés simples dérivant de la lignine pourront persister à l'état libre dans le sol.

Enfin, les bûchettes des plantes acidifiantes (pin maritime, callune) se sont toutes enrichies en aluminium, même celles placées dans la rendzine. On peut penser qu'à leur contact immédiat, lors de la décomposition, il s'est créé un micro-milieu podzolisant avec attaque des minéraux argileux. L'aluminium ainsi mobilisé s'est fixé, pour partie au moins, sur la matière organique des bois en cours de décomposition. On voit donc que le pin et la callune conservent, même en sol calcaire, leurs caractéristiques d'espèces acidifiantes. Bruckert et al. (1971) ont déjà signalé ce phénomène à propos du Pin sylvestre.

En présence de bûchettes de chêne ou de chataignier, on note, au contraire, des pertes en aluminium au cours de l'évolution. Signalons cependant que l'on observe l'inverse au contact du sol lessivé rubéfié. Mais nous avons déjà constaté que ce sol à porosité réduite et structure instable s'était tassé au cours de l'expérience, créant vraisemblablement un milieu mal aéré. Peut-être s'est-il alors produit un léger phénomène de dégradation, ce qui est fréquent en milieu de texture limoneuse acide. Dans la Plaine et le Bas-Bocage vendéens, la dégradation n'apparaît qu'au niveau du sol lessivé glossique. Mais nos expériences ne concernent que les horizons humifères de surface et l'horizon Ap du sol lessivé rubéfié (sous culture) qui est moins bien structuré que l'horizon A₁ du sol lessivé glossique (sous forêt).

F - CONCLUSION

Bien que les sols étudiés soient différents (le pH par exemple passe de 8 à 4 d'une extrémité à l'autre de la séquence), on constate que le rôle de l'espèce végétale est prépondérant au cours des premiers stades de la décomposition des bûchettes.

Le milieu environnant n'est cependant pas complètement sans influence. On observe, en effet, que des échanges de cations s'effectuent entre le sol et les bois en cours de décomposition. Ainsi, les bûchettes s'enrichissent en fer et en calcium dans la rendzine modale, alors qu'elles s'appauvrissent en ces mêmes éléments dans le sol lessivé glossique. Après 18 mois de résidence dans le sol, l'environnement cationique au sein de chaque bûchette est donc très différent selon le milieu dans lequel elle a séjourné. Ainsi, lorsque les débris ligneux évoluent en milieu calcaire, même si dans la première phase d'évolution certains d'entre eux (ceux du pin par exemple) gardent leur caractère acidifiant, on peut prévoir que, par la suite, après une phase d'enrichissement en cations, l'influence du milieu deviendra prépondérante et orientera l'humification vers le type mull.

Par contre, en milieu très acide, l'interaction végétation - milieu minéral est beaucoup plus complexe. Comme dans un premier temps toutes les bûchettes (quelle que soit leur origine végétale) ne cessent de s'appauvrir en fer et en calcium, on peut penser que par la suite leur humification s'orientera vers le moder. On constate donc, avec Védý (1973) et Toutain (1974) qu'en milieu trop pauvre en fer libre, les débris végétaux des plantes améliorantes et ceux des plantes acidifiantes évoluent dans le même sens.

QUATRIEME PARTIE

=====

LA MATIERE ORGANIQUE DES HORIZONS BETA : NATURE ET ORIGINE

A la base des sols lessivés rubéfiés de la Plaine vendéenne, sous l'horizon Bt et au contact du substratum calcaire, Ducloux (1970) a décrit un horizon génétique assez mince et bien individualisé, qu'il a identifié avec l'horizon "Béta" de Bartelli et Odell (1960.a et b). Plusieurs auteurs l'ont également signalé et décrit : Thorez et al. (1971), Mathieu (1971), Baize (1972) et Callot (1976). Cet horizon semble avoir une existence assez générale quand une couverture siliceuse se trouve au contact d'une roche-mère calcaire cohérente.

Dans la Plaine vendéenne, les horizons Béta contiennent toujours de la matière organique dont nous allons essayer de préciser la nature et l'origine. Avant d'aborder cette étude, nous donnerons quelques caractères morphologiques, physico-chimiques et biologiques de ces horizons.

A - CARACTERISATION DES HORIZONS BETA

En ce qui concerne la matière minérale, Ducloux (1970, 1971, 1973) a mis en évidence une illuviation importante de colloïdes minéraux fins ainsi que des processus d'argilisation.

Du point de vue morphologique (voir profil Nalliers 1 décrit en annexe), l'horizon Béta se différencie des horizons illuviaux sus-jacents par :

- une couleur qui va du brun foncé rougeâtre (5 YR 3/4) au brun foncé (7,5 YR 3/2)
- une texture assez peu variable, argileuse en général, quelquefois allégée par le microcolluvionnement des limons provenant des horizons de surface par infiltration à travers les chenaux et les fentes structurales (entraîné par les eaux de pluie après une période de sécheresse)
- une structure prismatique moyenne, qui se développe assez fortement à l'état sec, en se subdivisant en polyèdres subangulaires à angulaires fins.

Les caractéristiques physico-chimiques de l'horizon Béta peuvent être dégagées à partir du tableau 72 :

- le pH est voisin de la neutralité avec un complexe absorbant proche de la saturation (dominance des ions Ca^{++} dont le substratum calcaire constitue la réserve). Au-dessus de l'horizon Béta, l'horizon B a un pH variable ; celui-ci est parfois franchement acide (pH 4,3) comme nous avons pu le constater à partir d'un profil relevé à Sainte-Gemme-la-Plaine, sous forêt.

Horizons	pH eau	Calcaire (%)	Argile (%)	Bases échangeables (exprimées en % de T)				S/T	Fer libre Deb (%)
				Ca	Mg	K	Na		
B _{22t}	6,7	0	38,0	73,3	5,5	1,5	1,1	81,4	2,9
β	7,3	0,5	57,0	85,7	4,9	1,5	1,0	93,3	4,0

Tableau 72 - Caractères analytiques comparés des horizons B et β des sols lessivés rubéfiés (moyennes des résultats obtenus à partir de 5 sols)

- Le calcaire, absent dans les horizons B, se trouve en quantité très faible dans les horizons Béta qui sont en contact avec la roche calcaire.
- Le taux d'argile est toujours élevé (55 % en moyenne) et peut atteindre 70 %. On note une dominance de l'argile fine de diamètre inférieur à 0,1 μ. Du point de vue minéralogique, on y relève la présence de minéraux expansibles accompagnés d'une forte proportion de kaolinite et d'illite (Ducloux, 1978).
- Par rapport à l'horizon B, le taux de fer libre augmente de manière significative au niveau de l'horizon Béta.
- Une des caractéristiques les plus importantes de l'horizon Béta est sa richesse relative en matière organique (Tableau 73). D'une manière générale, celui-ci varie entre 1 et 2,5 %. Il est approximativement le double de celui de l'horizon B. Enfin, nous remarquons, au niveau de l'horizon Béta, que le rapport C/N, tout en restant faible, est cependant toujours supérieur à celui de l'horizon B.

Profils	Horizons	C (%)	N (%)	C/N	Matière organique (%)
Nalliers 1	B	0,38	0,07	5,6	0,65
	β	0,72	0,11	6,5	1,24
Nalliers 4	B	0,31	0,07	4,4	0,53
	β	0,57	0,10	5,7	0,98
Longèves 2	B	0,66	0,09	7,3	1,13
	β	1,43	0,17	8,4	2,46
Longèves 4	B	0,40	0,07	5,7	0,69
	β	0,95	0,15	6,3	1,63
St-Martin-de-Fraigneau 2	B	0,46	0,07	6,6	0,79
	β	0,88	0,11	8,0	1,52
Ste-Gemme-la-Plaine 1	B	0,20	0,05	4,0	0,34
	β	0,56	0,07	8,0	0,96

Résultats exprimés en % de la terre séchée à 105°C

Tableau 73 - Teneur en carbone et azote organiques des horizons profonds des sols lessivés rubéfiés (d'après Ducloux, 1978).

Par ailleurs, une datation au $^{14}\text{C}^*$ attribuée à cette matière organique un taux de renouvellement de 2300 ± 70 ans B.P. Scharpenseel et Pietig (1969) ont obtenu des résultats semblables à partir de la matière organique d'horizons argiliques de sols lessivés.

* Mesure aimablement effectuée par B. GUILLET du Centre de Pédologie Biologique de Nancy.

La numération de la microflore totale a été effectuée selon la technique de Pochon et Tardieux (1962). Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau 74.

Horizons	Microflore totale	Champignons
B _{22t}	4,9.10 ⁶	240.10 ³
Béta	8,6.10 ⁶	245.10 ³

Résultats exprimés en nombre de germes par g de terre séchée à 105°C.

Tableau 74 - Détermination des populations microbiennes

On remarque que le nombre total de germes de l'horizon Béta est assez réduit : il est près de 50 fois plus faible que celui de l'horizon Ap du même sol (Tableau 9, p. 19) ; mais il est le double de celui de l'horizon B situé juste au-dessus. Parmi la population microbienne, les champignons occupent une place très importante puisque dans les horizons B et Béta, ils ne sont que 3 fois moins abondants qu'en surface. En profondeur, c'est donc essentiellement la population bactérienne qui diminue très fortement.

L'activité minéralisatrice de cette microflore vis-à-vis du carbone organique total a été également testée. Nous avons procédé par incubation à 28°C et comparé les résultats obtenus à partir des horizons Ap, B et Béta d'un même profil relevé près de Nalliers.

Les résultats regroupés dans le tableau 75 indiquent que le taux de minéralisation journalier est beaucoup plus élevé dans les horizons B et Béta que dans l'horizon Ap. En ce qui concerne les horizons profonds, 50 à 75 % du CO₂ formé en un mois se dégagent au cours de la première semaine d'incubation (Figure 51). On peut donc en conclure que ces horizons contiennent, d'une part, une matière organique très facilement biodégradable et, d'autre part, une microflore qui devient très active lorsqu'on la place dans de bonnes conditions d'aération et de température.

Horizons	Carbone organique total (%)	Taux de minéralisation journalier			Taux de minéralisation cumulatif (28 jours)
		1 semaine	2 semaines	4 semaines	
Ap	1,38	1,4	1,2	0,9	25,4
B _{22t}	0,34	6,9	3,4	2,8	78,4
Béta	0,73	4,7	2,3	2,1	60,2

Résultats exprimés en mg de C dégagé sous forme de CO₂/g de carbone organique total

Tableau 75 - Taux de minéralisation journalier du carbone organique total. 28 jours d'incubation (28°C) à l'humidité de prélèvement Profil Nalliers 1.

Ces résultats sont conformes à ceux obtenus par Toutain (1974) à partir d'un horizon B de sol brun à mull acide. Ils sont également analogues à ceux obtenus par Guillet (1972) et Roger et al. (1969) à partir d'horizon Bh de podzols.

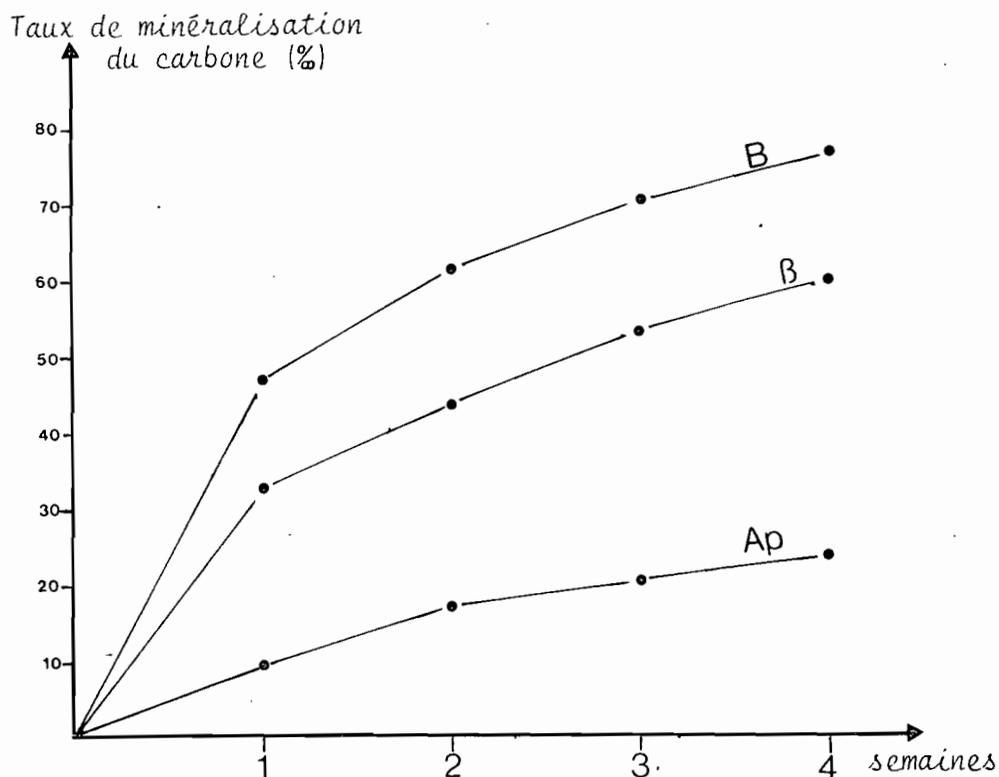


Figure 51 - Taux de minéralisation du carbone organique total dans l'horizon Ap et les horizons profonds B et B du sol lessivé rubéfié (Nalliers 1)

En conclusion, on peut donc penser que la matière organique présente en quantité notable dans les horizons profonds de certains sols s'y conserve d'autant mieux que les conditions de milieu y sont plus défavorables à sa minéralisation.

B - NATURE DE LA MATIÈRE ORGANIQUE DES HORIZONS BETA

Nous avons fractionné la matière organique de deux horizons Béta relevés à la base de sols lessivés rubéfiés, l'un près de Nalliers (Nalliers 1), l'autre dans la forêt de Sainte-Gemme-la-Plaine (Ste-Gemme-la-Plaine 1).

1 - Polysaccharides (Tableau 76)

Selon Guckert (1973), parmi les facteurs susceptibles de favoriser la présence de polysaccharides dans le sol, on peut retenir :

- un pH élevé
- une teneur en argile relativement importante
- un taux élevé de cations échangeables et particulièrement de calcium

Toutes ces conditions sont réalisées dans les horizons Béta. Il est donc normal que les polysaccharides y représentent une fraction importante de la matière organique (15 %). Par ailleurs, l'accumulation de polysaccharides pourrait être reliée à la présence de racines, accumulation que nous avons pu observer nettement sous forêt. L'interface sol - substratum calcaire est une zone privilégiée d'accumulation des racines attirées par l'élévation du pH et des différences d'humidité dans des couches granulométriquement dissemblables. En effet,

Bartelli et Odell (1960) y voient un niveau humide par blocage des eaux d'infiltration.

Lieu de prélèvement des horizons Bêta	Polysaccharides (% C total)		
	Extrait eau chaude	Extrait en milieu acide	Extrait total
Sainte-Gemme-la-Plaine 1	0,37	14,82	15,19
Nalliers 1	0,16	14,80	14,96

Tableau 76 - Dosage des polysaccharides dans les horizons Bêta.

Les polysaccharides accumulés dans l'horizon Bêta sont généralement considérés comme des substances facilement biodégradables. Le taux de minéralisation élevé que nous avons obtenu au laboratoire pourrait correspondre en grande partie à leur biooxydation.

2 - Lipides

Ils sont généralement absents des horizons profonds des sols. Les horizons Bêta ne font pas exception, bien qu'ils contiennent quelquefois des fragments d'anciennes racines arrêtées par le calcaire dur.

3 - Substances humiques

Nous avons effectué le fractionnement de la matière organique selon la méthode de Duchaufour et Jacquin (1966), puis Perraud et al. (1971). Ces méthodes permettent d'isoler divers extraits comme nous l'avons vu précédemment lors du fractionnement de l'humus des horizons A₁ ou Ap.

A l'exception des podzols, on trouve peu d'études concernant le fractionnement de l'humus dans les horizons profonds des sols. On peut cependant citer les travaux de Guckert (1973). Etudiant des horizons B de sols bruns et bruns lessivés, il constate que les acides fulviques y sont plus abondants que les acides humiques, ces derniers étant mieux retenus en surface lorsque l'humification y est importante.

Les résultats que nous avons obtenus sont consignés dans le tableau 77.

Profils	Humus directement extractible en milieu alcalin				Humine liée au fer				Humine liée aux argiles				Humine non solubilisable
	C ext.	AF	AH	AF/AH	C ext.	AF	AH	AF/AH	C ext.	AF	AH	AF/AH	
Ste-Gemme 1	32,9	29,0	3,9	7,4	16,4	11,2	5,2	2,1	9,0	6,9	2,1	3,3	40,3
Nalliers 1	24,8	20,4	4,4	4,6	32,3	22,1	10,2	2,2	16,4	11,1	5,3	2,1	25,9

Tableau 77 - Fractionnement de la matière organique des horizons Bêta. (Résultats exprimés en p. cent du C.O.T.)

Ces résultats nous conduisent à des conclusions analogues. En effet, dans les horizons Béta, les acides fulviques l'emportent largement sur les acides humiques. Il en est ainsi pour toutes les fractions directement et indirectement extractibles en milieu alcalin. La proportion d'acides fulviques semble très variable d'un sol à l'autre et dépendre des conditions du milieu, notamment de l'acidité des horizons supérieurs.

Au total, les substances humiques des horizons Béta semblent essentiellement formées de molécules peu condensées et/ou faiblement polymérisées. La proportion élevée d'acides fulviques que l'on y observe est à rapprocher de celle que l'on trouve dans les horizons Bh de podzols où l'on est en présence de substances qui ont migré à partir des horizons supérieurs du sol. Cela pose le problème de l'origine de la matière organique des horizons Béta que nous allons étudier maintenant.

C - ORIGINE DE LA MATIÈRE ORGANIQUE DES HORIZONS BÉTA

La matière organique des horizons Béta a trois origines possibles qui peuvent éventuellement se combiner (Mouçawi et al., 1977). Elle peut être :

- soit héritée du calcaire dont le résidu décalcarifié contient souvent plus de 1 % de carbone organique ;
- soit dérivée de l'évolution sur place des racines arrêtées par la roche dure ;
- enfin, elle peut être issue des horizons supérieurs par migration et précipitation au contact du calcaire.

Nous allons donc comparer la matière organique présente dans l'horizon Béta avec celle des autres horizons du profil et celle du calcaire situé au-dessous.

1 - Comparaison de la matière organique de l'horizon Béta avec celle de l'horizon B et celle du calcaire

Comme nous l'avons déjà vu, l'horizon Béta contient toujours plus de matière organique que l'horizon B. Il en contient au moins autant et quelquefois bien plus que le résidu de décalcarification du calcaire jurassique sur lequel il repose (Tableau 78).

Horizons	C (%)	N (%)	C/N	Matière organique (%)
B _{22t} (*)	0,40	0,07	5,7	0,69
Béta (*)	0,85	0,12	7,1	1,46
Résidu de décalcarification du calcaire	0,88	0,07	12,0	1,52

(*) Moyenne des résultats obtenus à partir de 6 sols

Tableau 78 - Taux moyens du carbone et de l'azote organique des horizons B et Béta (sols lessivés rubéfiés) comparés à ceux d'un résidu de décalcarification du calcaire bathonien.

Le rapport C/N augmente avec la profondeur et on peut se demander si la répartition des fonctions azotées est la même dans les trois niveaux. Après hydrolyse par HCl 6 N et dosage des différentes formes de l'azote, on constate que leur répartition se fait selon deux types bien distincts (Tableau 79). Le premier type correspond aux horizons B et Béta, où l'azote hydrolysable représente environ 70 % de l'azote total ; celui-ci se répartit également entre les formes ammoniacale et aminée. Par rapport aux horizons de surface, il y a donc diminution en profondeur de l'azote aminé au profit de l'azote ammoniacal. Ce phénomène est général dans les sols non podzolisés (Decau, 1968) et traduirait :

- un degré d'humification avancé dans les horizons profonds comparés aux horizons de surface ;
- une destruction plus grande des acides aminés au cours de l'hydrolyse dans les milieux pauvres en matière organique par rapport aux milieux riches.

Le deuxième type de répartition correspond au résidu de décalcarification du calcaire. Dans ce cas, la fraction non hydrolysable devient prépondérante et représente les deux-tiers de l'azote total, tandis que l'azote aminé est pratiquement inexistant.

Lieux de prélèvement	N total ¹	N hydroly- ² sable	N ammo- ² niacal	N aminé ²	N non hy- ² drolysable
B ₂₂ t Nalliers 1	0,07	69,4	34,8	34,6	30,6
Béta Ste-Gemme la Plaine 1	0,06	68,2	33,2	34,9	31,9
Béta Nalliers 1	0,10	76,8	(37,2)	(39,6)	23,2
Résidu de décalca- rification du cal- caire Nalliers 1	0,07	32,3	(28,4)	0,9	67,7

¹ Exprimés en p. cent de terre séchée à 105°C

² Exprimés en p. cent de l'azote total

Tableau 79 - Répartition des différentes formes de l'azote

Au total, l'azote est essentiellement sous une forme peu évoluée, donc facilement minéralisable, dans les horizons B et Béta. Il est, au contraire, à l'état évolué et très stable dans le calcaire. Ces différences tendent à montrer que le taux d'humification, la nature et la proportion des bioconstituants diffèrent d'un niveau à l'autre. C'est ce que nous allons voir maintenant.

a - Lipides (Tableau 80)

Nous avons déjà vu que ceux-ci sont absents de l'horizon Béta. Il en est de même pour l'horizon B. Par contre, ils représentent 10 % de la matière organique du calcaire. Les lipides de cette formation peuvent correspondre à des produits initiaux conservés dans la roche ou résulter de la diagenèse.

b - Polysaccharides (Tableau 80)

Il y a peu de différences entre les horizons B et Béta. Signalons

seulement que les formes solubles dans l'eau, donc facilement mobilisables, représentent 10 % des polysaccharides totaux au niveau de l'horizon B et seulement 1 à 2 % au niveau de l'horizon Béta. Dans le calcaire, l'analyse ne révèle que des traces de polysaccharides ; ceux-ci sont éliminés dans les premiers stades de la diagenèse (Degens, 1967).

Lieux de prélèvement	Polysaccharides (% C total)			Lipides (% C total)
	Extrait eau chaude	Extrait milieu acide	Extrait total	
B ₂₂ t Nalliers 1	1,19	10,33	11,52	0
Béta Ste-Gemme-la-Plaine 1	0,37	14,82	15,19	0
Nalliers 1	0,16	14,80	14,96	0
Résidu de décalcarification du calcaire (Nalliers 1)	0	0,04	0,04	10,9

Tableau 80 - Dosage des polysaccharides et des lipides

c - Substances humiques

- Fractionnement

Les résultats obtenus à partir des horizons B, Béta et du résidu de décalcarification sont regroupés dans le tableau 81 ainsi que sur la figure 52.

Lieu de prélèvement	C total	Humus directement extractible en milieu alcalin ²			Humine solubilisable ²				Humine non soluble
		C ext. C t.	AF AH	AH mob. AH immob.	Liée au fer		Liée aux argiles		
					C ext. C t.	AF AH	C ext. C t.	AF AH	
B ₂₂ t									
Ste Gemme-la-P. 1	0,31	18,4	13,1	0,3	5,9	1,9	19,0	3,6	55,4
Nalliers 1	0,20	16,5	2,0	0,2	30,1	1,8	21,2	2,1	29,3
Béta									
Ste-Gemme-la-P. 1	0,57	32,9	7,4	0,4	16,4	2,1	9,0	3,3	40,3
Nalliers 1	0,56	24,8	4,6	0,3	32,3	2,2	16,4	2,1	25,9
Résidu de décalcarification du calcaire Nalliers 1	0,88	33,0	0,2	0,1	23,6	0,2	12,0	0,4	30,9

¹ Exprimés en p. cent de terre séchée à 105°C

² Exprimés en p. cent de C total

Tableau 81 - Fractionnement de l'humus

Ces données permettent également de rapprocher les horizons B et Béta. Dans les deux niveaux, les acides fulviques l'emportent largement sur les acides humiques. Il en est ainsi dans toutes les fractions extractibles en milieu alcalin (directement ou indirectement). Cependant, les formes de liaison

entre la matière organique et la matière minérale ne sont pas tout-à-fait les mêmes dans les deux horizons ; en effet, lorsque l'on passe de l'horizon B à l'horizon Béta, on constate une augmentation des formes directement extractibles et des humines liées au fer aux dépens des humines liées aux argiles et des humines non solubilisables. Cette évolution des formes pourrait être reliée à la richesse en fer libre et en calcium échangeables de l'horizon Béta. A côté de cela, la matière organique du calcaire est essentiellement formée d'acides humiques (rapport AF/AH = 0,2) et contraste avec celle de l'horizon Béta (rapport AF/AH = 3 à 4).

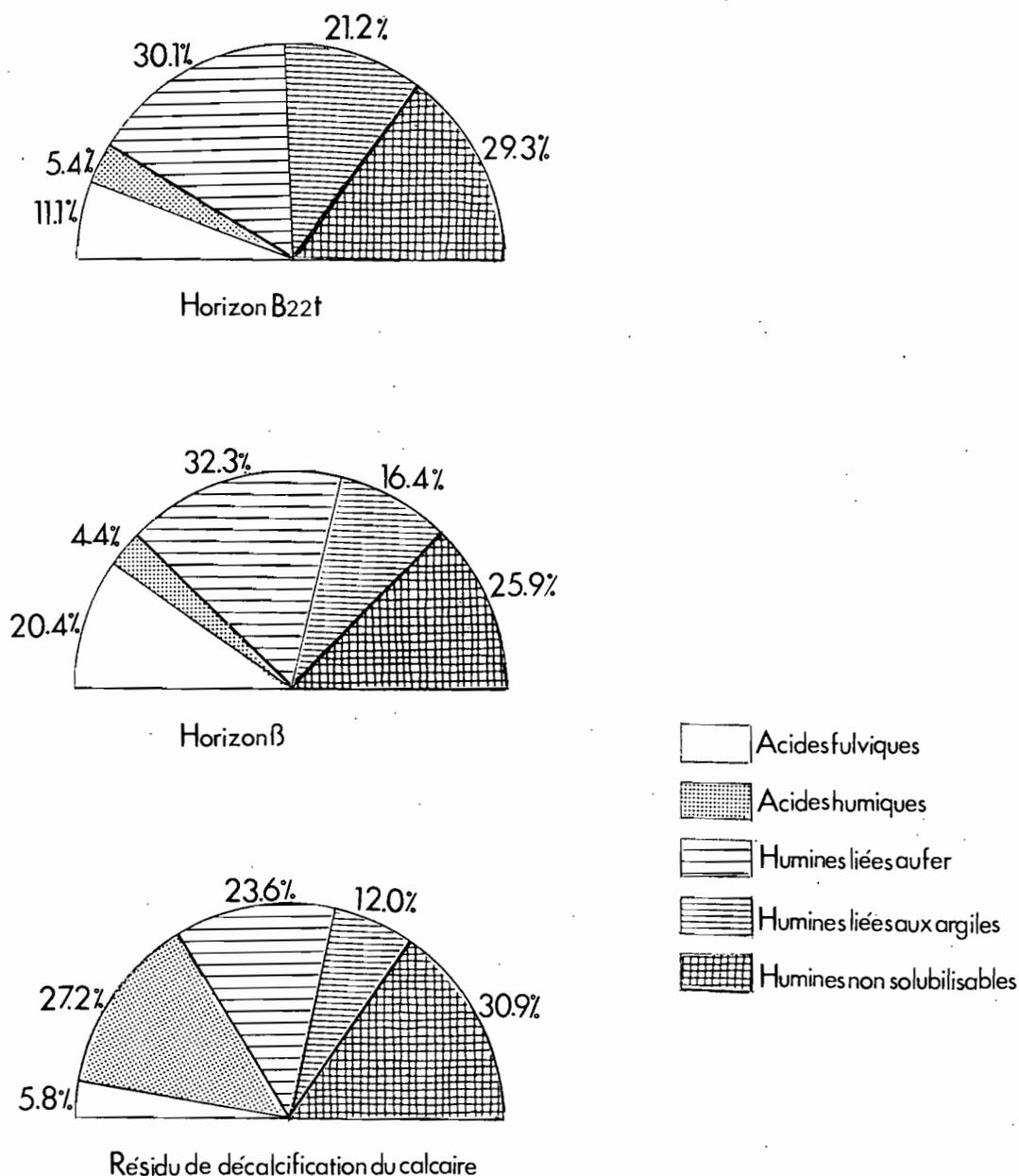


Figure 52 - Répartition des différentes fractions de la matière organique des horizons profonds (Profil Nalliers 1).

- Etude comparative de la structure des substances humiques

A l'aide de la spectroscopie infrarouge, nous avons comparé la structure des acides humiques et celle des humines non solubilisables.

Comme la quantité de matière organique extraite est faible, nous avons mélangé les extraits pyrophosphoriques et sodiques, d'une part (substances direc-

tement extractibles), les substances humiques liées au fer et aux argiles d'autre part (composés humiques indirectement extractibles).

Examinons d'abord les résultats obtenus à partir des acides humiques. L'examen des spectres infrarouges (Figure 53) et l'établissement des rapports entre densités optiques aux fréquences les plus caractéristiques (Tableau 82) montrent que les acides humiques de la fraction directement extractible par les réactifs alcalins des horizons B et Béta ont une structure très semblable. Cependant, les acides humiques issus de l'horizon Béta présentent seuls les bandes caractéristiques des liaisons peptides à 1640 et 1540 cm^{-1} . Les acides humiques extraits du calcaire s'opposent aux précédents par leur caractère aliphatique plus marqué et une acidité carboxylique plus forte.

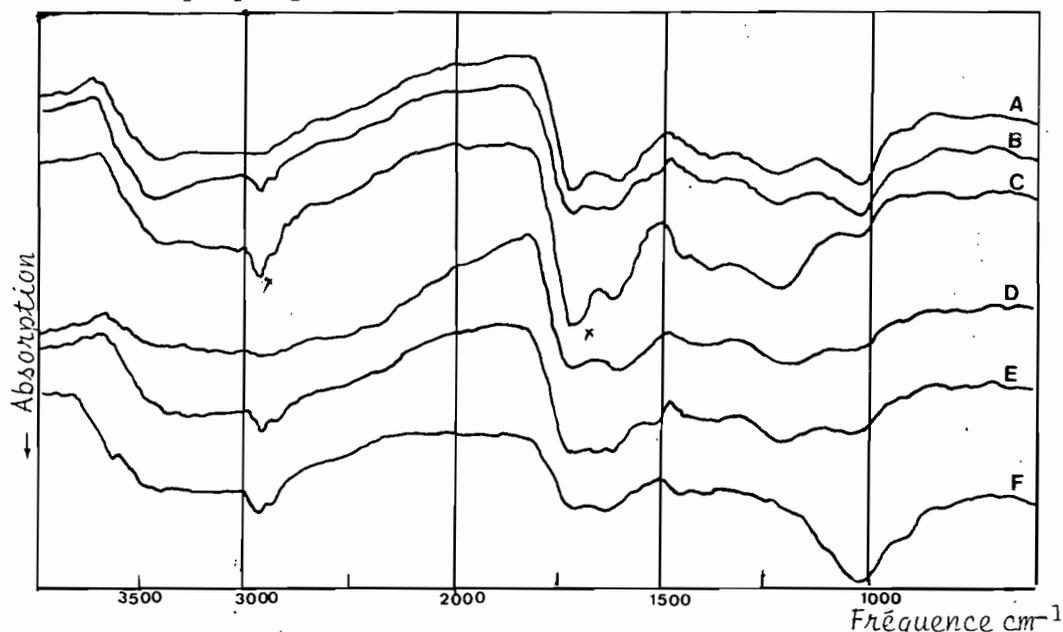


Figure 53 - Spectres d'absorption infrarouge des acides humiques du sol lessivé rubéfié (Nalliers 1)

- Fraction directement extractible

- A : B₂₂t
- B : Béta
- C : Calcaire

- Fraction extractible après élimination du fer et de l'argile

- D : B₂₂t
- E : Béta
- F : calcaire

Lieux de prélèvement	Fraction directement extractible		Fraction liée au fer et aux argiles	
	D.O. 2920	D.O. 1720	D.O. 2920	D.O. 1720
	D.O. 1510 ₁	D.O. 1510 ₂	D.O. 1510 ₁	D.O. 1510 ₂
Horizon B ₂₂ t Nalliers 1	1,2	1,5	1,1	1,3
Horizon Béta Nalliers 1	1,2	1,5	1,1	1,3
Résidu de décalcarification du calcaire Nalliers 1	1,5	2,3	1,4	1,3

¹ C-H aliphatiques / C=C aromatiques
² C=O des acides / C=C aromatiques

Tableau 82 - Rapports entre densités optiques des acides humiques aux fréquences caractéristiques exprimées en cm^{-1} .

D'autre part, si l'on compare entre eux les différents acides humiques extraits après élimination du fer et des argiles, on retrouve les mêmes convergences et les mêmes différences que ci-dessus avec des écarts moins importants.

L'étude de la structure des humines non solubilisables a nécessité les traitements successifs suivants :

- 1ère étape : déminéralisation par chauffage en milieu fluorhydrique et lavage du résidu avec HCl dilué
- 2ème étape : hydrolyse par HCl 6 N à chaud
- 3ème étape : oxydation ménagée par H₂O₂ à 3 %.

Nous avons enregistré un spectre infrarouge après chaque étape (Figure 54).

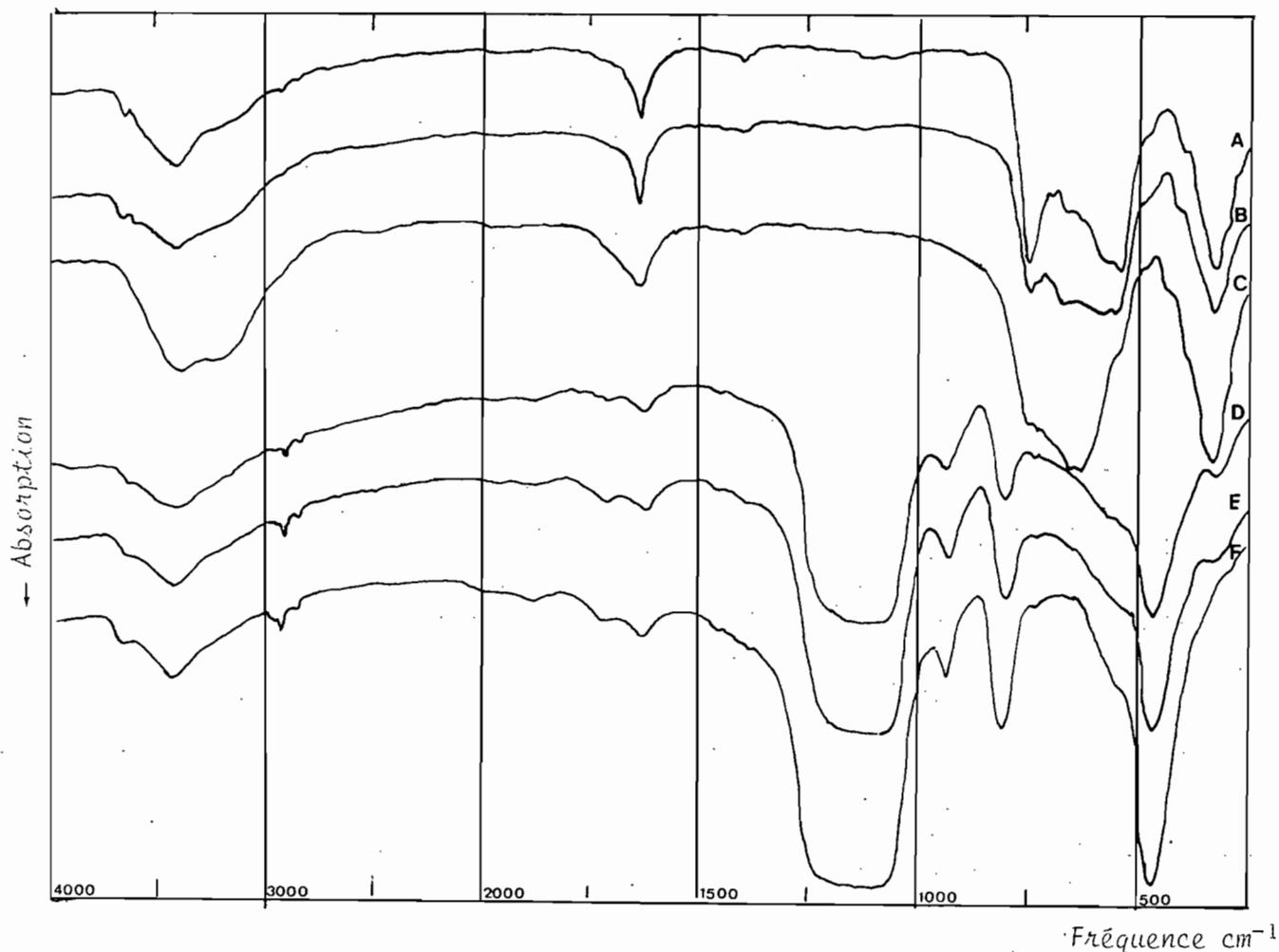


Figure 54 - Spectres d'absorption IR des humines non solubilisables des horizons profonds du sol lessivé rubéfié (Nalliers 1).

Déminéralisées

A : B_{22t}
 B : B_{éta}
 C : Calcaire

Déminéralisées et hydrolysées par HCl 6 N

D : B_{22t}
 E : B_{éta}
 F : Calcaire

Leur examen permet d'aboutir aux conclusions suivantes :

Après déminéralisation, les humines issues des horizons B et Béta sont tout-à-fait semblables et ont une structure proche de celle des acides humiques. Ces humines sont associées à des composés amidiques non protéiques. En effet, le spectre des protéines et des polypeptides présente à la fois des bandes amide I (1640 cm^{-1}) et amide II (1540 cm^{-1}). Ici, en l'absence quasi totale de la bande amide II, nous pensons que les amino-acides libérés par hydrolyse proviennent plutôt de produits amidiques.

Après oxydation ménagée, les spectres correspondant aux humines non solubilisables des horizons B et Béta sont encore très semblables. Il apparaît une nouvelle bande, très intense, à 1665 cm^{-1} attribuée à la formation de quinones, et deux bandes, faibles, à 1840 et 1775 cm^{-1} reliées à la formation d'anhydrides d'acides.

L'humine non solubilisable du calcaire est assez différente. Elle présente une structure beaucoup plus aliphatique. Elle ne libère pratiquement pas d'acides aminés par hydrolyse acide. Après une oxydation ménagée, son spectre n'est pas modifié.

2 - Comparaison de la matière organique de l'horizon Béta avec celle de l'horizon Ap

En fait, nous n'avons comparé que les acides humiques entre eux à l'aide de la spectroscopie infrarouge. Pour cela, nous avons établi des rapports entre densités optiques aux fréquences les plus caractéristiques (Tableau 83).

Horizons	AH directement extractibles		AH indirectement extractibles	
	$\frac{D.O. 2920}{D.O. 1510}$	$\frac{D.O. 1720}{D.O. 1510}$	$\frac{D.O. 2920}{D.O. 1510}$	$\frac{D.O. 1720}{D.O. 1510}$
Ap (Nalliers 1)	0,9	1,1	0,8	1,0
Béta (Nalliers 1)	1,2	1,5	1,1	1,3

C-H aliphatiques/C=C aromatiques
C=O des acides/C=C aromatiques

Tableau 83 - Rapports entre densités optiques à des fréquences caractéristiques exprimées en cm^{-1} .

On remarque que les acides humiques des horizons Béta sont à la fois plus acides et plus aliphatiques que ceux des horizons Ap. On aboutit aux mêmes conclusions lorsqu'on compare les acides humiques d'horizons A₁ avec ceux d'horizons Bh de podzol (Righi, 1977). En effet, les molécules les plus susceptibles de migrer sont celles qui portent de nombreuses chaînes aliphatiques terminées par des groupements acides carboxyliques.

D - DISCUSSION ET CONCLUSION

Les substances humiques des horizons Béta sont essentiellement formées de petites molécules comme les acides fulviques. D'après la nature des composés et celle des fonctions azotées, on peut considérer la matière organique de l'horizon Béta comme faiblement polymérisée et peu évoluée. En effet, dans ce milieu, le calcium échangeable est très abondant ; il sature les sites libres des substances humiques et limite leur polycondensation (Chouliaras, 1976).

Par la nature de ses constituants, la matière organique des horizons Béta se différencie nettement de celle du calcaire qui a subi une évolution particulière liée à la diagenèse ; par contre, elle est tout-à-fait semblable à celle de l'horizon B tant par la répartition des fractions que par leur structure.

En définitive, la matière organique de l'horizon Béta doit résulter, pour une large part, de la migration à partir des horizons supérieurs de composés mobiles ; ceux-ci peuvent être libres ou associés à de l'argile fine puisque Ducloux (1978) a montré l'existence de phénomènes d'illuviation au niveau des horizons Béta.

Par ailleurs, la matière organique de l'horizon Béta peut aussi provenir en partie de la transformation en place des débris de racines mortes : la présence d'une fraction polysaccharidique importante témoigne dans ce sens. Enfin, l'héritage des composés libérés par dissolution du calcaire ne représenterait, s'il existe, qu'une portion infime de la matière organique de l'horizon Béta : sa datation au ^{14}C le confirme.

CONCLUSIONS GENERALES

=====

Nos recherches ont eu pour but de préciser la nature et l'évolution des principaux constituants de la matière organique du sol le long d'une séquence pédologique théorique de désaturation relevée en Vendée méridionale.

Dans cette région, la répartition des sols dans le paysage est liée à la présence d'une couverture limoneuse dont l'épaisseur varie en fonction du modelé de détail. La nature du substratum portant les limons intervient également dans la dynamique des profils.

De la Plaine au Bas-Bocage, on peut distinguer quatre ensembles de sols classés par ordre de désaturation croissante :

- sols bruns calcaires et rendzines modales
- sols bruns calciques
- sols lessivés rubéfiés
- sols lessivés glossiques

Le type d'humus développé en surface évolue avec la nature du sol. On rencontre successivement les types suivants lorsque l'on passe du milieu calcaire au milieu acide :

mull calcaire → mull calcique → mull acide → mull-moder → moder

A côté de la matière organique des horizons superficiels, nous avons également étudié celle des horizons Béta développés à la base des sols lessivés rubéfiés.

A - HORIZONS SUPERFICIELS (A₁ ou Ap)

A ce niveau du sol, l'abaissement du pH correspond essentiellement à (l'élimination progressive du calcium échangeable puis à l'apparition de l'aluminium libre en milieu très acide. L'installation du processus de lessivage en milieu partiellement désaturé conduit à une diminution du taux d'argile et du fer libre au niveau des horizons humifères superficiels.

1 - Matière organique totale

Le taux de matière organique des horizons superficiels est minimum au niveau du sol lessivé rubéfié (mull acide), où la minéralisation du carbone organique est maximum. Dans le mull acide, la baisse du taux de matière organique s'accompagne d'une dégradation des conditions physiques du milieu qui se traduit par une diminution de la porosité et de la stabilité structurale des agrégats du sol.

2 - Composés humiques

Le taux d'humification varie peu d'un mull à l'autre, même si l'on compare le mull calcaire au mull acide. Il semble donc qu'en milieu calcaire cultivé l'enrobage des débris végétaux par des cristaux de carbonate de calcium soit très réduit. Il n'en est pas de même dans d'autres sols calcaires développés en milieu forestier (Chouliaras, 1976). Par ailleurs, au niveau du moder, on observe une baisse très nette du taux d'humification, comme cela est généralement le cas dans ce type d'humus.

Les phénomènes de polymérisation et/ou de condensation des composés humiques formés apparaissent très limités dans tous les sols car le rapport acides fulviques/acides humiques reste toujours élevé. De plus, environ 80 p. cent de l'azote organique est sous une forme hydrolysable. Enfin, plus de la moitié des acides humiques ont un poids moléculaire inférieure à 50.000. Cependant, au niveau du sol lessivé glossique, où il ne reste que très peu de calcium échangeable (ce qui n'est pas le cas dans les autres sols), la proportion d'acides humiques de poids moléculaire élevé augmente. Le calcium inhibe la polymérisation des substances humiques par saturation de leurs sites acides (Chouliaras, 1976). Mais, dans ces sols, où la lignine évolue lentement en humine résiduelle, on peut également se demander si les acides humiques de grande taille ne correspondent pas à des fragments de lignine oxydée qui aurait évolué par biodégradation des chaînes aliphatiques et peut-être par condensation.

Des processus d'insolubilisation des composés humiques apparaissent dans tous les sols, mais avec une intensité différente. Ils peuvent être liés à la présence dans le sol de cations ou d'hydroxydes métalliques (calcium, fer, aluminium) ; l'insolubilisation est alors réversible. Elle apparaît nettement en milieu calcaire où elle porte préférentiellement sur les plus grosses molécules (acides humiques) ; par contre, elle semble très limitée dans le moder.

En se liant aux composés humiques, les argiles provoquent également une insolubilisation réversible qui porte préférentiellement sur des molécules de petites tailles, ayant une fraction aliphatique importante. En milieu calcaire, ces petites molécules se trouvent immobilisées, mais en milieu acide, elles doivent pouvoir migrer avec l'argile lors du lessivage. On pourrait ainsi expliquer pourquoi la proportion de petites molécules humiques est si forte dans les horizons argiliques.

Parmi les acides humiques insolubilisés réversiblement (humines solubilisables), si l'on exclut la fraction liée aux argiles, le reste est tout-à-fait semblable aux acides humiques facilement extractibles quant à la taille des molécules. A ce type d'insolubilisation ne semble donc pas correspondre une condensation des acides humiques. Remarquons seulement que les acides humiques les plus facilement extractibles ont une acidité carboxylique toujours supérieure à celle des acides humiques insolubilisés réversiblement.

Par ailleurs, les substances humiques insolubilisées irréversiblement (humine d'insolubilisation non extractible) paraissent formées de molécules semblables à celles qui persistent à l'état extractible. Seul leur caractère hydrophile a diminué, en relation avec leur (décarboxylation progressive.) Le fer libre du sol qui contribue à la formation d'humine d'insolubilisation non extractible pourrait être responsable de cette décarboxylation, comme il l'est pour les acides aminés (Andreu, 1978).

A côté des phénomènes d'insolubilisation, signalons que le mode d'occupation du sol agit sur l'évolution de l'humus. Ainsi, par rapport au milieu cultivé, on constate dans les sols forestiers :

- (- un ralentissement de la minéralisation du carbone organique, donc une augmentation du taux de matière organique totale ;
- un ralentissement des phénomènes d'humification avec formation de composés humiques moins liés à la matière minérale et plus proches de la lignine.

Ces différences entre milieu cultivé et milieu forestier sont d'autant plus accusées que le sol est plus acide.

Dans l'ensemble, les mécanismes d'évolution de l'humus se modifient progressivement lorsque l'on passe du mull calcaire au mull acide, puis au moder.

- Dans les mulls calcaires, bien que l'activité biologique soit intense, la minéralisation du carbone organique est freinée, mais non l'humification dans les sols cultivés. Il se forme un humus à petites molécules (acides fulviques dominants) qui s'insolubilisent sans se condenser.
- Dans les moders, la minéralisation du carbone organique et l'humification sont très ralenties car le milieu est défavorable à une bonne activité biologique. La lignine se transforme lentement en humine résiduelle peu ou pas liée à la matière minérale du sol. Par ailleurs, il apparaît relativement peu de composés humiques extractibles, mais ceux-ci persistent à l'état solubilisable dans le sol car les phénomènes d'insolubilisation sont réduits.
- Enfin, dans les termes intermédiaires de type mull ^{moder} acide, où la minéralisation du carbone organique atteint son maximum, la proportion de substances humiques directement extractibles augmente aux dépens des humines non solubilisables. C'est là que l'on rencontre les composés humiques les moins acides, donc les moins agressifs vis-à-vis de la matière minérale du sol.

3 - Polysaccharides

Le rythme de dégradation de la cellulose varie beaucoup avec la nature des débris végétaux. Il subit également des variations saisonnières en relation avec l'humidité et la température du sol, les contrastes saisonniers étant beaucoup plus marqués dans les mulls que dans le moder. La cellulolyse atteint sa plus forte intensité pour des teneurs en eau du sol très élevées ; par contre, elle est pratiquement nulle à pF 4,2.

Le long de la séquence, elle est maximum au niveau du mull acide, où l'on enregistre le taux de polysaccharides le plus faible. Du milieu calcaire au milieu acide, l'état des polysaccharides contenus dans les horizons humifères évolue : avec l'abaissement du pH, ceux-ci deviennent de moins en moins liés aux colloïdes minéraux et de plus en plus solubles donc mobilisables.

4 - Lipides

Dans le sol, la lipidolyse atteint son maximum pour des teneurs en eau inférieures à celles correspondant à l'optimum de la cellulolyse. En milieu très sec, la lipidolyse reste plus active que la cellulolyse, mais en milieu très humide, c'est l'inverse que l'on observe. Il semble donc que la dégradation des lipides soit fortement affectée par un manque d'oxygène.

Parmi les autres facteurs du milieu, le pH semble avoir une importance primordiale car il influe sur l'activité biologique intrinsèque des sols. Dans des milieux biologiquement actifs, tels que la rendzine et le sol lessivé rubéfié, les lipides sont facilement dégradés, mais dans un milieu acide, tel que le sol lessivé glossique, le taux de décomposition est toujours plus faible.

Nous avons également constaté que l'intensité de la lipidolyse varie avec les saisons qui peuvent modifier la composition et l'activité de la microflore du sol.

Par ailleurs, le taux de biodégradation des lipides dépend également de leur nature chimique. Ainsi, pour les hydrocarbures, nous avons constaté que les composés saturés et insaturés se dégradent sensiblement à la même vitesse. Par contre, la longueur des chaînes carbonées a une influence nette sur la biodégradation des alcanes qui est variable avec le type de sol : en milieu biologiquement actif (mull), le taux de décomposition des hydrocarbures ne dépend que très légèrement de la longueur des chaînes, mais en milieu acide (moder) le taux de décomposition décroît très nettement à mesure que la longueur de la chaîne carbonée augmente. De plus, dans ce dernier cas, on observe toujours un temps de latence. Celui-ci augmente de manière significative avec le nombre d'atomes de carbone du substrat.

En présence d'acides gras, on constate que des composés insaturés, comme l'acide oléique, se décomposent rapidement dans tous les sols de la séquence. Mais il n'en est pas de même avec l'acide saturé correspondant (acide stéarique). En milieu biologiquement actif, celui-ci est presque aussi facilement métabolisé que l'acide oléique, mais en milieu désaturé, il n'est que faiblement dégradé. Par ailleurs, l'effet de la longueur des chaînes carbonées sur la décomposition des acides gras est très net. Ceux à longue chaîne, comme l'acide montanique, sont réfractaires à la biodégradation dans tous les sols. De plus, en milieu acide, ils inhibent la minéralisation du carbone endogène du sol.

Le taux de décomposition de l'acide estérifié est comparable à celui de l'acide libre correspondant. Cependant, en milieu désaturé, l'addition d'un ester peut faire apparaître des phénomènes d'inhibition qui ne se produisent pas en présence de l'acide libre. Pour que les esters puissent être utilisés par les microorganismes du sol, il semble qu'une hydrolyse enzymatique préalable soit nécessaire. Enfin, les alcools et les cétones se dégradent sensiblement comme les acides libres correspondants.

Une grande partie des lipides du sol vient de la végétation. L'importance de l'apport peut beaucoup varier d'une espèce végétale à l'autre. Après avoir extrait des lipides de différentes plantes et les avoir incorporés au sol, on constate, après incubation, qu'une partie de ceux-ci est décomposée, tandis qu'une autre fraction demeure à l'état extractible ; le reste s'insolubilise. Cette insolubilisation est surtout importante en milieu biologiquement actif. Elle peut correspondre à une réutilisation directe par les microorganismes de certains composés à chaîne courte ; mais elle peut également être liée à une incorporation de lipides aux substances humiques dont le squelette contient de longues chaînes aliphatiques.

Parmi les lipides venant des plantes, on distingue :

- (- des endolipides à chaîne courte facilement métabolisables et fortement insolubilisés dans le sol ; ceux-ci dominent dans les feuilles de maïs par exemple.
- ? (- des exolipides (lipides des cires) à longue chaîne, qui sont facilement biodégradables et faiblement insolubilisés. Ils s'accumulent dans le sol où en

milieu acide, ils peuvent provoquer des phénomènes d'inhibition et faciliter l'installation des processus de podzolisation. De tels lipides sont fournis en abondance au sol par les feuilles d'éricacées.

En ce qui concerne les lipides naturels des sols de la Plaine et du Bas-Bocage vendéens, leur taux est minimum au niveau des sols lessivés rubéfiés où la lipidolyse est le plus souvent maximum. Tandis que la proportion de polysaccharides dans l'humus tend à diminuer avec l'acidification du milieu, on observe l'inverse pour les lipides. Ceux-ci sont donc mieux représentés dans les humus acides où, de même que les substances humiques, ils sont moins liés aux colloïdes organo-minéraux qu'en milieu neutre. Comme cette liaison protège les lipides contre la biodégradation (Weiss, 1965), la persistance dans le sol d'une quantité importante de composés lipidiques libres ne doit être possible qu'en milieu biologiquement peu actif et également désaturé car la présence de certains cations, notamment le calcium, active les lipases du sol.

Par ailleurs, le degré de liaison varie avec la nature des substances lipidiques, les composés insaturés et branchés étant proportionnellement beaucoup plus liés que les composés linéaires saturés.

Pour les sols de la Plaine et du Bas-Bocage vendéens, si l'on compare les différentes familles de composés lipidiques extraits d'une rendzine (pH 8,1) et d'un sol lessivé glossique (pH 4,1), on constate que dans les deux cas la fraction acide est plus importante que la fraction neutre. Il en est généralement ainsi dans la plupart des sols, à l'exception des milieux hydromorphes. Les composés les plus oxygénés sont surtout abondants dans le sol lessivé glossique car l'activité microbienne réduite de ce sol conduit plutôt à une bio-transformation limitée qu'à une minéralisation des lipides.

5 - Lignine

Nous constatons, en accord avec Toutain (1974) et Selmi (1975), que dans un premier temps, la lignine se dégrade sensiblement à la même vitesse dans le mull et dans le moder. En ce qui concerne les débris ligneux du pin et de calune, la première phase d'évolution semblerait se faire sous l'influence des pourritures blanches dans tous les sols. Mais en présence de rameaux de feuillus (chêne, chataignier), la dégradation se ferait plutôt selon un type intermédiaire entre celui des pourritures brunes et celui des pourritures blanches.

9 (A la suite de cette première phase d'évolution, le rapport C/N de la lignine brute tend à diminuer avec le pH du sol. De plus, les échanges cationiques importants se sont produits entre le sol et les fragments ligneux, aboutissant à un enrichissement en fer et en calcium dans les mulls et à un appauvrissement en ces mêmes éléments dans le moder. Ce sont vraisemblablement ces environnements cationiques différents qui conditionnent la suite de l'évolution des débris ligneux. En milieu bien pourvu en calcium, la lignine sera rapidement fragmentée en petites molécules. Celles-ci sont rapidement insolubilisées dans le mull calcaire. Mais dans le mull acide, l'insolubilisation ne semble pas aussi intense puisqu'on solubilise en même temps que les composés humiques, une quantité notable de glucosides phénoliques. Dans le moder, en milieu appauvri en azote, en fer et en calcium, l'évolution de la lignine sera très limitée, ce qui conduira à la formation d'humine résiduelle.

B - MATIERE ORGANIQUE DES HORIZONS BETA

Après avoir étudié la matière organique des horizons superficiels, nous avons essayé de préciser la nature et l'origine de celle des horizons Béta développés à la base de certains sols lessivés rubéfiés. Pour cela, nous l'avons comparée à la matière organique de l'horizon B situé au-dessus et à celle du calcaire situé en dessous. Nous avons constaté que, dans l'horizon B comme dans l'horizon Béta, on trouve un humus à petites molécules qui se différencie nettement de celui du calcaire. La matière organique de l'horizon Béta résulterait donc, pour une grande part, de migrations à partir des horizons supérieurs du sol. Mais cette matière organique peut aussi provenir, en partie, de la transformation sur place d'un feutrage de racines arrêtées par le calcaire dur.

Au total, les divers résultats obtenus montrent qu'au niveau des horizons humifères de surface le degré et le mode de transformation ainsi que le "turn over" des différents constituants de la matière organique du sol varient en fonction de la nature des composés organiques apportés au sol mais aussi, pour une bonne part, en relation avec les conditions du milieu. Cela conduit à l'évolution progressive du type d'humus (au sens large) observée le long de la séquence.

ANNEXE I
=====

CARACTERES DESCRIPTIFS ET ANALYTIQUES DE DIFFERENTS TYPES DE SOLS

DE LA SEQUENCE ETUDIEE

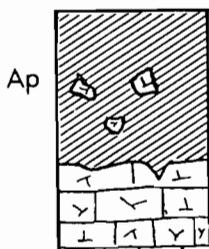
PROFIL DE SAINT-MARTIN-DE-FRAIGNEAU (1 CHA) : RENDZINE MODALE

Situation : Chalais, Commune de Saint-Martin-de-Fraigneau (Vendée)

Roche-mère : Calcaire marneux (Callovien)

Végétation : Champ cultivé (chaume de blé)

Description



Ap (0-20 cm) : Horizon humifère gris brun (10 YR 4/2) à l'état frais. Structure grumeleuse à polyédrique subangulaire fine. Texture argileuse. Présence de nombreux cailloux calcaires. Horizon poreux et très aéré. Activité biologique intense.

Au-dessous de 20 cm : Calcaire fragmenté en plaquettes

Résultats analytiques

Horizon	Granulométrie (%)							Mat. org. (%)	C (%)	N (%)	C/N
	A	LF	LG	SF	SG	Calc. total	Calc. actif				
Ap (0-20 cm)	29,0	17,4	1,1	2,6	12,7	31,0	13,8	4,1	2,43	0,33	7,3
Horizon	pH eau	Bases échangeables (2)							Fer libre (%)		
		Ca	Mg	K	Na	S	T	S/T			
Ap (0 - 20 cm)	8,1	21,9	0,96	0,46	0,17	-	16,5	sat.	3,2		

¹ Après décalcification

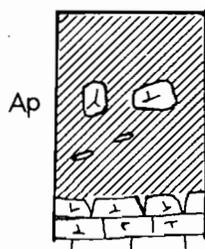
² Résultats exprimés en mēq p. cent g de terre fine

PROFIL DE SAINT-ETIENNE DE BRILLOUET (4 SEB) : RENDZINE ANTHROPIQUE

(Terre de Groie mince)

Situation : Commune de Saint-Etienne de Brillouet (Vendée)
 Roche-mère : Dépôts limoneux minces sur calcaire bathonien
 Végétation : Champs labouré

Description



Ap (0 - 25 cm) : Horizon de couleur brun grisâtre (7,5 YR 4/2) à l'état frais. Structure polyédrique subangulaire fine à grumeleuse moyenne. Texture argilo-limoneuse. Présence de graviers calcaires auxquels s'adjoignent des pisolithes et quelques quartz.

Au-dessous de 25 cm : Calcaire en dalles disjointes sub-horizontales. A la partie inférieure des blocs, un encroûtement en "choux-fleurs" ou calcin se développe sur 3 à 4 mm d'épaisseur.

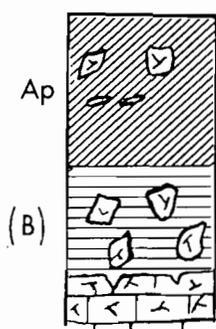
Résultats analytiques

Horizon	Granulométrie (%) après décalcarification						
	A	LF	LG	SF	SG	Calcaire total	Calcaire actif
Ap	19,6	20,4	16,7	3,5	0,9	32,9	11,5
Horizon	Mat. Org. (%)	C (%)	N (%)	C/N	pH eau	Fer libre (%)	
Ap	4,6	2,65	0,35	7,6	8,1	2,5	

PROFIL DE MONTREUIL (1 MTR) : SOL BRUN CALCIQUE

Situation : NE de Montreuil, Lieu-dit "Les Champs-Roulots" (Vendée)
 Roche-mère : Dépôts limoneux sur calcaire dur du Bathonien
 Végétation : Chaume

Description



Ap (0 - 20 cm) : Horizon humifère de couleur brun grisâtre (7,5 YR 4/2) à l'état frais. Structure polyédrique subangulaire fine. Texture limono-argileuse. Peu graveleux. Quelques fragments de quartz, des concrétions et surtout des graviers calcaires. La transition avec l'horizon suivant est distincte.

(B) (20 - 35 cm) : Horizon brun grisâtre (7,5 YR 4/2) à l'état humide. Structure polyédrique angulaire fine. Texture argileuse. Présence de fragments angulaires de calcaire.

Au-dessous de 35 cm : Calcaire bathonien en dalles horizontales disjointes.

Résultats analytiques

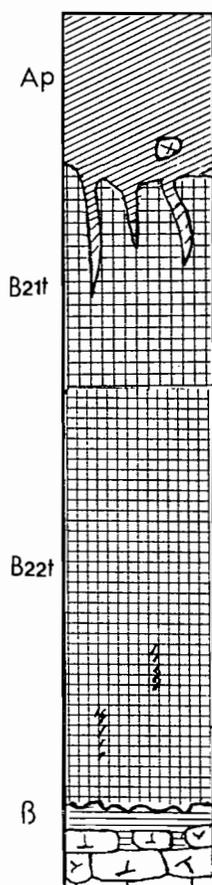
Horizon	Granulométrie (%)						Mat. org. (%)	C (%)	N (%)	C/N	pH eau
	A	LF	LG	SF	SG	Calc total					
Ap (0-20 cm)	25,0	30,0	29,8	5,2	3,0	0	2,76	1,60	0,22	7,3	7,2
Horizon		Bases échangeables (*)									
		Ca	Mg	K	Na	S	T	S/T			
	Ap (0 - 20 cm)	18,7	1,7	0,6	0,2	21,3	20,0	sat.			

* Exprimés en mēq p. cent g de terre fine

PROFIL DE NALLIERS 1 (1 NAL) : SOL LESSIVE RUBEFIE

Situation : Commune de Nalliers (Vendée)
 Roche-mère : Limons sur calcaire dur du Bathonien
 Végétation : Chaume de céréales

Description du profil



Ap (0-20 cm) : Horizon organo-minéral de teinte brun foncé (10 YR 3/4) à l'état frais. Structure grumeleuse à polyédrique subangulaire fine peu exprimée. Texture limoneuse. On note la présence d'une semelle de labour vers 10 cm de profondeur. La limite avec l'horizon suivant est distincte et régulière.

B₂₁t (20-50 cm) : Teinte brune (7,5 YR 5/6) à l'état frais. Structure prismatique grossière bien exprimée. Texture limono-argileuse. Présence de pisolithes ferrugineux. Les surfaces structurales des agrégats possèdent des revêtements argileux (coatings) brun rougeâtre foncé (2,5 YR 3/4) à l'état frais. Les limons sus-jacents s'infiltrent entre les éléments structuraux et dans les tubulations des vers ; limite inférieure graduelle et régulière.

B₂₂t (50-115 cm) : Horizon rouge jaunâtre (5 YR 5/6) à l'état frais. Structure prismatique. Texture limono-argileuse. Présence de pisolithes ferrugineux. Revêtements argileux développés, rouges (2,5 YR 4/6). Infiltrations des limons dans les fentes structurales et les tubulations de vers. Limite nette, régulière à ondulée.

β (115-120 cm) : Horizon frais, brun rougeâtre foncé (5 YR 3/3) à l'état frais. Structure polyédrique fine très bien exprimée. Texture argileuse. Les agrégats présentent des revêtements relativement discrets avec de petites stries.

Cet horizon repose sur la roche calcaire (Bathonien)

Résultats analytiques

Horizons	Granulométrie (%)					Mat. org. (%)	C (%)	N (%)	C/N	pH eau
	A	LF	LG	SF	SG					
Ap (0-20 cm)	19,5	37,0	30,6	10,2	2,0	2,24	1,30	0,14	8,9	7,6
B ₂₁ t (20-50 cm)	36,8	28,5	23,2	6,2	1,5	0,70	0,43	0,07	6,0	7,7
B ₂₂ t (50-115 cm)	24,8	40,4	23,8	6,7	1,5	0,53	0,31	0,07	4,4	7,4
Béta (115-120 cm)	52,0	33,1	8,9	1,6	0,5	0,83	0,57	0,10	5,7	7,6
Horizons	Bases échangeables *							Fer libre (%)		
	Ca	Mg	K	Na	S	T	S/T			
Ap (0 - 20 cm)	14,0	1,09	0,46	0,17	15,6	14,4	sat.	2,60		
B ₂₁ t (20 - 50 cm)	15,5	1,06	0,28	0,19	17,0	19,0	89,5	2,85		
B ₂₂ t (50-115 cm)	15,5	1,00	0,28	0,23	17,0	21,7	78,5	2,88		
Béta (115-120 cm)	29,2	1,60	0,41	0,30	31,5	33,0	95,5	3,80		

*Exprimés en mēq p. cent g de terre fine

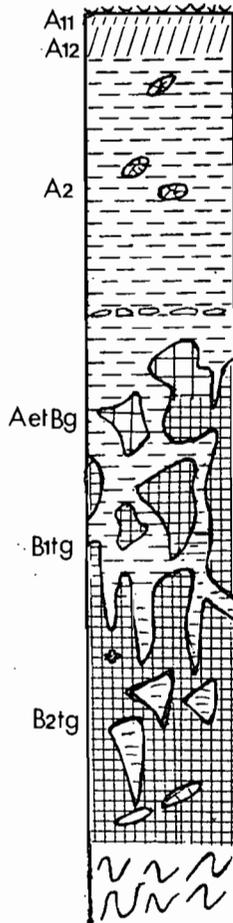
PROFIL DE SAINT-SORNIN 3 (3 SOR) : SOL LESSIVE GLOSSIQUE 9

Prun acide (T hydromorphe)

Situation : Saint-Sornin (Vendée)
 Roche-mère : Dépôts limoneux sur schistes
 Végétation : Taillis de chataignier ; fougère aigle

Description

T/1R melle ou modér a



A₁₁ (0 - 3 cm) : En surface, litière de chataignier. Horizon humide, brun grisâtre foncé (10 YR 3/2) à l'état frais. Structure grumeleuse fine à moyenne. Texture limoneuse légère. Matière organique en voie de décomposition. Matériau friable, fragile. Limite inférieure nette et régulière.

A₁₂ (3-7 cm) : Couleur brune (10 YR 4/3) à l'état humide. Structure polyédrique angulaire fine à particulaire juxtaposée. Texture limono-sableuse. Matière organique incorporée. Horizon poreux et fragile. Limite inférieure irrégulière.

A₂ (7 - 40 cm) : Horizon brun jaunâtre foncé (10 YR 4/6) à l'état humide. Structure polyédrique angulaire fine à moyenne. Texture limono-sableuse. Pisolithes et concrétions. Présence de graviers de quartz à la base de l'horizon. Transition nette et irrégulière.

A & B_g (40-53 cm) : Horizon jaune brunâtre (10 YR 6/6) à l'état frais. Structure lamellaire moyenne. Texture limono-sableuse. Présence de glosses (10 %) de 10 cm de long sur 5 cm de large, irrégulières ou en trainées verticales. Quelques taches rouille (1 %). Pas de revêtements. Limite inférieure nette, irrégulière.

B_{tg} (53-85 cm) : Horizon jaune rougeâtre (7,5 YR 6/6) à l'état frais. Structure polyédrique moyenne à surstructure feuilletée, grossière à moyenne. Texture limono-sableuse. Taches anastomosées (40 %), souvent associées aux racines. Autres taches brun pâle (10 YR 6/3) associées aux racines (20 %). Présence de revêtements sur les faces des agrégats. Transition distincte, nette, régulière.

Au-dessous de 85 cm : Horizon marmorisé comme le précédent, dont il se différencie par sa structure prismatique généralisée.

Résultats analytiques

mat. organique en eau différente de l'acide ?

Horizons	Granulométrie (%)					M.O. (%)	C (%)	N (%)	C/N	pH eau	pH KCl
	A	LF	LG	SF	SG						
A ₁₁	13,5	32,8	34,2	13,3	6,2	14,3	8,30	0,44	18,9	4,1	3,2
A ₁₂	12,8	33,6	34,4	12,7	6,5	5,9	3,40	0,19	17,9	4,2	3,4
A ₂	12,9	33,6	31,1	15,3	7,1	1,3	0,77	0,05	15,4	4,4	4,1
A & B _g	14,3	35,7	30,5	13,4	6,1	0,7	0,43	0,04	10,7	4,5	4,1
B _{tg}	26,0	31,8	25,6	11,8	4,8	-	0,22	-	-	4,6	3,8

Horizons	Bases échangeables *							Fer libre (%)	Al libre (%)
	Ca	Mg	K	Na	S	T	S/T		
A ₁₁ (0 - 3 cm)	1,47	2,42	0,55	0,22	4,36	18,9	23,1	0,86	0,19
A ₁₂ (3 - 7 cm)	0,29	0,68	0,21	0,11	1,29	9,5	13,7	0,90	0,30
A ₂ (7 - 40 cm)	0,14	0,15	0,10	0,09	0,48	3,6	18,2	1,04	0,46
A & B _g (40-53 cm)	0,11	0,15	0,10	0,08	0,44	3,6	12,3	1,07	0,40
B _{tg} (53-85 cm)	0,18	0,81	0,18	0,11	1,28	7,3	15,6	2,04	0,76

* Exprimés en mēq p. cent g de terre fine

ANNEXE II

=====

1 - ANALYSES COURANTES DE LABORATOIRE

- pH : Il a été mesuré à l'électrode de verre après dispersion de 10 g de sol dans 25 ml d'eau distillée.
- Calcaire total : Calcimètre de Bernard.
- Calcaire actif : Il a été dosé selon la méthode de J. Dupuis et T. Dupuis (1966) qui prévoit une extraction du calcaire actif par l'oxalate d'ammonium, puis un dosage par manganimétrie après élimination des matières organiques solubilisées.
- Granulométrie : Méthode internationale modifiée par l'emploi de la pipette de Robinson.
- Carbone organique total : Après destruction des carbonates par HCl, le carbone est dosé par combustion sous courant d'oxygène et carbonatation d'une solution sodique dont on mesure les variations de conductivité (Carmograph 8 de Wösthoff).
- Matière organique totale : Taux de carbone organique total x 1,724.
- Azote organique total : Méthode de Kjeldahl.
- Fer et aluminium libres : Méthode "Tamm + hydro" qui consiste à combiner le réactif de Tamm (tampon oxalique à pH 3,2), agent complexant de l'aluminium, à l'hydrosulfite de sodium, agent réducteur de la méthode Deb, pour l'extraction du fer libre.
- Capacité totale d'échange : Méthode de Pleven (1968)
- Bases échangeables :
 - Na, K et Mg : Déplacement par l'acétate d'ammonium à pH 7.
 - Calcium : Méthode Hissik, 1925.
 - Dosages de Na et K par photométrie de flamme
 - Dosages de Ca et Mg par spectrophotométrie d'absorption atomique
- Stabilité structurale : Déterminée selon la méthode de Hénin et al. (1958) en utilisant l'appareil de Féodoroff (1958-1961).
- Détermination de la teneur en eau à différentes valeurs de pF : Sur plaques de porcelaine poreuse selon la méthode de Baver (1961).

2 - ANALYSES SPECIFIQUES DE LABORATOIRE

A - Azote protéique et autres formes d'azote

Les échantillons de sol ou de matières humiques sont traités par HCl 6 N à ébullition et reflux pendant 16 heures.

Sur des parties aliquotes des fractions solubles et insolubles, on dose :

- l'azote non hydrolysable (floculat) et hydrolysable (solution) par la méthode de Kjeldahl ;
- l'azote ammoniacal de la solution par entraînement à la vapeur d'eau en présence de soude normale (Decau, 1968) ;
- l'azote aminé (fraction soluble) selon la méthode de Moore et Stein (1954).

B - Polysaccharides : Nous avons utilisé la technique de Brink et al. (1960), modifiée par Guckert (1973). Les sucres libres sont extraits par macération durant 24 heures dans l'eau distillée à 80°C. Les autres formes par macération pendant 24 heures dans H₂SO₄ 3 N à 80°C. Dosages par colorimétrie à 625 mμ après coloration à l'anthrone en utilisant une gamme étalon de glucose. Le taux de carbone des polysaccharides est égal au taux de sucres x 0,4 (Handa, 1972).

C - Substances humiques

- Fractionnement des substances humiques Méthode de Duchaufour et Jacquin (1966) et Perraud et al. (1971)

+ Séparation densimétrique par mélange bromoforme - alcool de densité 1,8 avec action des ultrasons ;

+ Extraction

- sur le surnageant (mull moder seulement) : extraction des acides fulviques et humiques par une solution de pyrophosphate 0,1 M. Séparation de l'humine héritée par solubilisation des débris végétaux qui l'accompagnent par le bromure d'acétyle selon le protocole décrit par Jambu (1971).

- Sur le culot de centrifugation du fractionnement densimétrique :

. Solubilisation des substances humiques directement extractibles par des solutions alcalines (pyrophosphate de sodium 0,1 M) ajustées à pH 10, puis à pH 12 par addition de soude.

. Extraction des humines solubilisables dites "liées au fer" par une solution de soude 0,1 N après déferrification du sol par HCl 6 N à 60°C durant 30 minutes (6 répétitions)

. Extraction des humines solubilisables dites "liées aux argiles" par NaOH 0,1 N après destruction des argiles par un mélange à proportions égales HCl N et HF N à 60°C durant 30 minutes (6 répétitions), puis 2 attaques avec HF N seul. Enfin, lavage avec HCl N/5 puis eau distillée.

. L'humine non solubilisable liée reste dans le culot ayant subi ces différentes extractions successives.

+ Séparation des acides fulviques et humiques par acidification à pH 1,5 puis centrifugation.

une partie
de l'humine
héritée
est extraite
après destruction
des argiles

- Caractérisation des composés humiques

+ Fractionnement des acides fulviques sur charbon animal selon la méthode de Forsyth (1947). Différents éluants successifs ont été utilisés dans l'ordre suivant :

- . HCl 0,1 N (fraction A)
- . Acétone à 10 % d'eau (fraction B)
- . Eau distillée (fraction C)
- . NaOH 0,5 N (fraction D).

+ Déminéralisation des substances humiques

- . Décationisation des acides fulviques et humiques : ceux-ci sont placés dans les tubes de cellophane et dialysés contre de l'eau distillée additionnée de 1 ml HCl et 1 ml HF par litre d'eau. Les solutions acides sont renouvelées deux fois par jour durant 8 jours. Les acides sont ensuite éliminés par dialyse contre de l'eau distillée. Les préparations déminéralisées sont séchées par lyophilisation.
- . Déminéralisation des humines non solubilisables : on utilise le mélange à quantités égales d'HCl 1/2 - HF 1/2 au bain de sable à 105°C jusqu'à poids constant. Les métaux libérés sont ensuite éliminés par HCl 0,1 N.

+ Enregistrement des spectres d'absorption infrarouge

Nous avons utilisé la technique des pastilles au Kbr (300 mg de Kbr pour 1 mg de composés humiques). Les pastilles ont été vitrifiées sous une pression de 10 tonnes par cm^2 et séchées à 50°C. Nous avons enregistré les spectres avec un spectrophotomètre Beckman 4120 entre 4000 et 300 cm^{-1} .

+ Les courbes d'analyse thermique sous oxygène ont été enregistrées selon des techniques mises au point au Laboratoire de Pédologie de Poitiers (Dupuis et al., 1970 ; Abrioux et al., 1972) à l'aide d'un microanalyseur Setaram M4, équipé d'un enregistreur Kipp et Zonen Micrograph BD6.

+ L'encombrement moléculaire est déterminé par chromatographie sur colonnes de gels "Séphadex". Les acides humiques sont élués dans une solution 0,02 M de borate de sodium ajustée à pH 9,5. (Dell'Agnola et al., 1964, 1965). On recueille l'éluat par fraction de 5 ml. Leur absorption est mesurée à 420 m μ .

+ Détermination du rapport Q 4/6 (Welte, 1955)

Nous avons préparé des solutions selon la technique utilisée par Jacquin (1963). Les acides humiques sont d'abord dispersés dans du bicarbonate de sodium 0,1 N (proportion de 1/10). Les solutions sont ensuite amenées à la même concentration de 136 mg/l de carbone par addition d'une solution tampon à pH 7,5 (acide borique, chlorure de potassium et carbonate de sodium ; Brunel, 1948). La densité optique des solutions a été mesurée à 420 et 665 m à l'aide d'un spectrophotomètre UV-visible à double faisceau Unicam SP 1800.

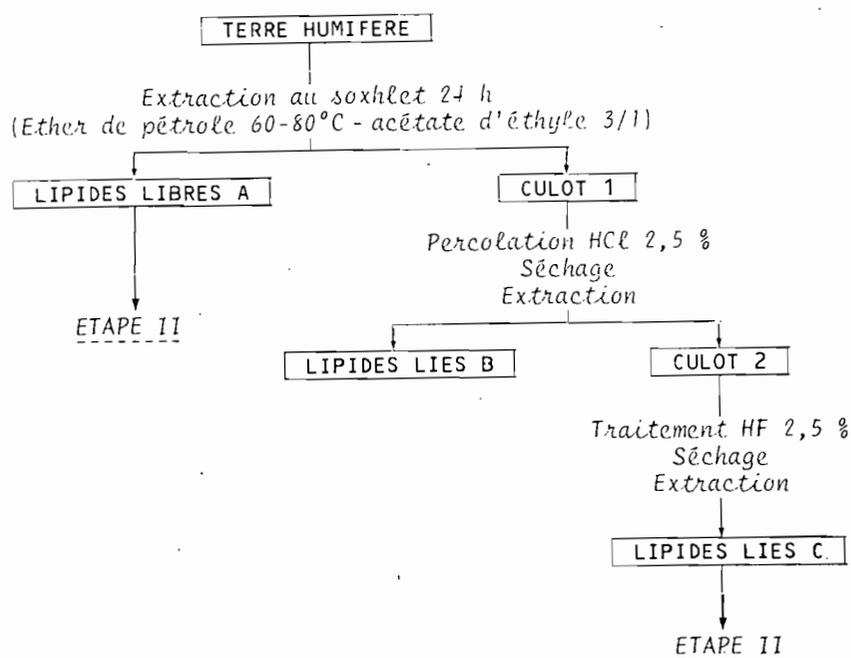
D - Fractionnement des lipides

Le protocole est schématisé sur le tableau donné p. 158.

+ Colonne de Mac Carthy Duthie

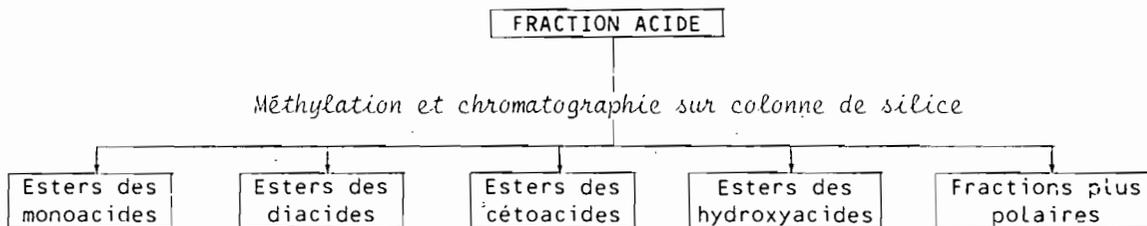
- . Préparation de la silice : 100 g de silice (Mallinckrodt 100 mesh ou Merck 70-325 mesh) sont placés dans un erlenmeyer avec 400 cm^3 de méthanol. Décantation. L'opération est répétée avec 400 cm^3 d'acétone. La silice est rincée à l'éther et séchée.

ETAPE I - Extraction des lipides



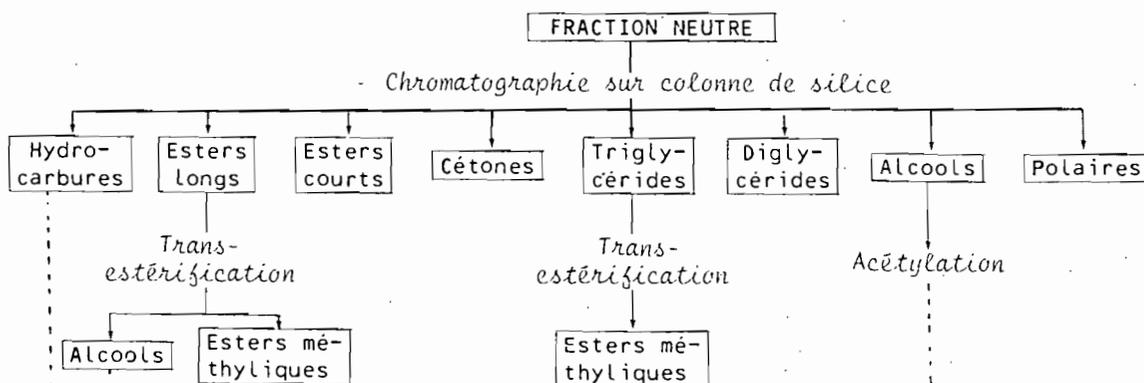
ETAPE II - Chromatographie sur colonne Mac Carthy-Duthie (SiO₂-KOH)
Séparation des fractions neutre, acide et polaire

ETAPE III - Analyse de la fraction acide



Chromatographie en phase gazeuse. Histogramme ou analyse pondérale des divers constituants ; éventuellement contrôle par spectrométrie de masse.

ETAPE IV - Analyse de la fraction neutre



Chromatographie en phase gazeuse. Analyse pondérale et/ou histogrammes des divers constituants ; éventuellement, contrôle par spectrométrie de masse

- . Préparation de la solution de potasse dans l'isopropanol (Méthode décrite par Keeney (1956)). De la potasse en pastilles est dissoute à chaud (50 - 60°C) dans l'isopropanol redistillé à raison de 25 g KOH pour 400 cm³. Après refroidissement et décantation d'une mince couche aqueuse de potasse qui est écartée, on prélève la liqueur surnageante qui contient 50 mg de KOH/ml.
- . Préparation de la colonne : Mettre 5 g de silice pour 10 ml d'isopropanol - potasse et 30 ml d'éther. Rincer la colonne ainsi préparée avec l'éther pour éliminer l'excès d'isopropanol.

Les lipides solubilisés avec un peu d'éther et de chloroforme sont déposés sur la colonne et élués par de l'éther, puis du chloroforme (fraction neutre), puis par une solution d'acide formique à 4 % dans l'éther (fraction acide) ; la fraction polaire est éluée par une solution de méthanol à 10 % dans le chloroforme. Les différentes fractions sont évaporées et pesées.

+ Chromatographie sur gel de silice

Les chromatographies sur gel de silice (80 à 100 g de SiO₂ par g de mélange) sont effectuées par un mélange croissant d'éther dans de l'éther de pétrole ; le gradient de polarité est choisi en fonction de la composition du mélange de lipides déterminé qualitativement par examen en chromatographie sur couche mince (C.C.M.). La séparation est suivie par C.C.M.

+ Méthylation de la fraction acide

A l'extrait acide solubilisé dans le minimum de benzène, on ajoute du méthanol et quelques gouttes de H₂SO₄ concentré. Le tout est porté à reflux pendant 12 heures, suivi d'une extraction au chloroforme.

+ Acétylation des alcools

L'extrait contenant les alcools est solubilisé dans la pyridine. On y ajoute de l'anhydride acétique. On chauffe 15 minutes à 50°C. On ajoute ensuite de l'eau distillée et on laisse agir une nuit. La solution est ensuite extraite à l'éther.

+ Inclusion des hydrocarbures sur tamis moléculaires 5 Å

A une masse donnée de mélange d'hydrocarbure, on ajoute 100 fois son poids de tamis moléculaires 5 Å (ceux-ci ont été auparavant lavés à l'hexane et séchés sous vide à l'aide d'une pompe à palettes à 250°C) et de l'isooctane. On place sous reflux pendant 48 heures. On sépare deux fractions :

- . Les hydrocarbures ramifiés et cycliques contenus dans la solution ;
- . Les hydrocarbures linéaires, inclus dans les tamis, et récupérés après destruction des tamis par HF aqueux et extraction par 3 volumes de benzène.

Lorsque le mélange d'hydrocarbure était inférieur à 10 mg, nous avons amélioré la séparation en ajoutant au mélange au moins 30 mg de n-undécane.

+ Enregistrement des chromatogrammes

L'injection en chromatographie en phase gazeuse (CPV) a été réalisée sur un appareil Packard, modèle 427 (colonne capillaire stainless steel : 0,25 mm x 40 m OV 17 ; pression d'azote = 0,9 atmosphère ; débit 2,5 ml par minute. La température initiale est de 150°C et la température finale est de 280°C. La programmation est de 2°C par minute.

Les composés lipidiques ont été aussi identifiés par couplage chromatographie en phase gazeuse et spectrométrie de masse (Perkin Elmer Sigma 3 g.C-AEI MS 25 m.s) et dans les mêmes conditions que celles de CPV. Le temps de rétention et le spectre de masse des composés lipidiques sont comparés à ceux de lipides standards (Fluka chemicals).

E - BIODEGRADATION DE LA MATIERE ORGANIQUE

Les échantillons prélevés ont été soit laissés à leur humidité de prélèvement (cas de la minéralisation saisonnière du carbone organique endogène), soit amenés aux 2/3 de la capacité au champ (dégradation des lipides). Nous avons introduit l'équivalent de 100 g de terre séchée à 105°C dans des bocaux de 750 ml ferment hermétiquement. 200 mg de substrat (lipides ou cellulose) sont incorporés soigneusement.

Les échantillons sont mis à incuber à 28°C : le CO₂ dégagé est recueilli dans une solution de 25 ml de NaOH N/5 placée dans un béccher au fond de chaque bocal. Il est dosé à intervalles réguliers par une solution de H₂SO₄ N/5 après addition de 5 ml de BaCl₂ à 20 % et 4 gouttes d'une solution de thymol-phtaléine à 1 %. Trois répétitions ont été effectuées pour chaque test. Deux bocaux vides contenant la même quantité de soude ont permis, pour chaque cas, de doser le CO₂ de l'atmosphère.

Calculs

Soit : Q_1 = nombre de ml de H₂SO₄ N/5 versés par bocal témoin

Q_2 = nombre de ml de H₂SO₄ N/5 versés par bocal contenant un échantillon de sol

4,4 mg de CO₂ correspondant à 1 ml de H₂SO₄ N/5 versé, le poids de CO₂ dégagé s'exprime de la manière suivante :

$$P = (Q_1 - Q_2) \times 4,4 \text{ mg}$$

F - DOSAGE DE LA LIGNINE (Méthode de Cowling, 1960)

400 mg de poudre végétale sont placés dans un béccher de 25 ml auxquels on ajoute 3 ml de H₂SO₄ 72 %. Après agitation de deux heures à 30°C, on transvase avec 84 ml d'eau distillée ; l'ensemble est porté à 120°C pendant 55 minutes. Après refroidissement, la solution est versée sur un creuset en verre fritté n° 4 et lavée 5 fois avec de l'eau distillée pour ramener le pH du résidu à la neutralité. On sèche à 105°C une nuit et on pèse : on obtient la lignine brute. Les hydrates de carbone sont obtenus par différence (prise d'essai - résidu). Pour obtenir la lignine nette, on déduit de la "lignine brute" les cendres et les protéines (N x 6,25).

Les cendres sont dosées par calcination de la lignine brute à 800°C (la température est élevée à 450°C pendant 2 heures, puis à 800°C et maintenue 2 heures à cette même température.

Le taux de cendres des bûchettes de bois a été dosé de la même manière.

BIBLIOGRAPHIE

- ABRIOUX M.F., DUPUIS T. et JAMBU P., 1972 - Contribution de l'analyse thermique à l'étude des acides humiques et de leurs sels de sodium. *Journal of Thermal Analysis*, 4, 383-401.
- ALEKSANDROVA L., 1967 - Organo-mineral humic acid derivatives and methods of studying them. *Soviet Soil Science*, 7, 903-913.
- ALEKSANDROVA L., 1972 - Study on the humification of plant residues and of the nature of newly formed humic acid. *Soviet Soil Science*, 4, 429-437.
- ALEKSANDROVA L., 1975 - Nomenclature used in the study of soil humus. *Soviet Soil Science*, 7, 96-100.
- ALFORD J.A., PIERCE D.A. and SUGGS F.G., 1964 - Activity of microbial lipases in natural fats and synthetic triglycerides. *J. Lipid. Res.*, 5, (3), 390-394.
- ANDREASEN A. and STIER T.J.B., 1953 - Anaerobic nutrition of *Saccharomyces Cerevisiae*. *J. Cell. Comp. Physiol.*, 41, 23-26.
- ANDERSON H.A., FRASER A.R., HEPBURN A. and RUSSEL J.D., 1977 - Chemical and infrared spectroscopic studies of fulvic acid fractions from a podzol. *Journ. Soil Sci.*, 28, 4, 623-633.
- ANDREUX F., 1978 - Etude des étapes initiales de la stabilisation physico-chimique et biologique d'acides humiques modèles. Thèse Doct. Etat, Univ. Nancy I, 161 p.
- ANTONIEWSKI J. and SCHAEFER R., 1972 - Recherches sur les réactions microbiennes de sols imprégnés par des hydrocarbures. Modifications de l'activité microbienne. *Ann. Inst. Pasteur*, 123, 805-819.
- BACHELIER G., 1968 - Contribution à l'étude de la minéralisation du carbone. Mém. O.R.S.T.O.M., Paris, 30, 145 p.
- BAGNOULS F. et GAUSSEN H., 1957 - Les climats biologiques et leur classification. *Ann. Géogr.*, XXVI, 355, 193-220.
- BAILLY J.R., 1976 - Infrared spectroscopy of some humic acid fraction obtained on sephadex. *Plant Soil*, 45, (1), 95-111.
- BAIZE D., 1972.a - Les sols développés dans la couverture des plateaux jurassiques de Bourgogne. *Pédogenèse et origine. Sci. Sol*, 1, 37-44.
- BAIZE D., 1972.b - Micromorphologie des "Terres d'Aubues" des plateaux de Bourgogne. *Bull. A.F.E.S.*, 1-2, 63-72.
- BARCELONA M.J. and ATWOOD D.K., 1979 - Gypsum-organic interactions in the marine environment : sorption of fatty acids and hydrocarbons. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 43, 47-53.
- BARTELLI L. et ODELL R., 1960.a - Fields studies. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 24, 388-390.
- BARTELLI L. et ODELL R., 1960.b - Laboratory studies and genesis of a clay enriched horizon in the lowest part of the solum of som brunizem and gray-brown podzolic soil in Illinois. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 24, 390-395.
- BASCOMB C., 1968 - Distribution of pyrophosphate-extractable iron and organic carbone in soils of various groups. *Journ. Soil Sci.*, 19, 257-271.

- BAVER L.D., 1961 - Soil physics. John Wiley, New-York ed., 1 vol., 475 p.
- BELLAMY L., 1958 - The infrared spectra of complex molecules. Methuen, London, ed., 1 vol., 425 p.
- BELLAMY L., 1968 - Advances infrared group frequencies. Methuen, London, ed., 1 vol., 304 p.
- BENOIT R.E. et STARKEY R.L., 1968 - Inhibition of decomposition of cellulose and some other carbohydrates by tannin. *Soil Sci.*, 105, 5, 291-296.
- BILLES G., CORTEZ J. et LOSSAINT P., 1975 - Etude comparative de l'activité biologique des sols sous peuplements arbustifs et herbacés de la garrigue méditerranéenne. I - Minéralisation du carbone et de l'azote. *Rev. Ecol. Biol. Sol*, 12, (1), 115-139.
- BILONG P., 1979 - Evolution des composés humiques et lipidiques des sols des Landes du Plateau de Millevaches. Thèse Doct. 3ème cycle, Univ. Poitiers, 111 p.
- BONNEAU M. et SOUCHIER B., 1979 - Pédologie. 2 - Constituants et propriétés du sol. Masson, Paris, éd., 459 p.
- BORDES F., 1952 - Stratigraphie du lœss et évolution des industries paléolithiques dans l'Ouest du Bassin parisien. *L'Anthropologie*, 56, 1-2, 18.
- BRAIDS O.C. et MILLER R.H., 1975 - Fats, waxes and resins in soil. In *Soil Components. I - Organic components*. GIESEKING ed., London, 343-368.
- BRINK R., DUBACH P., LYNCH D., 1960 - Measurement of carbohydrates in soil hydrolyzates with anthrone. *Soil Science*, 89, 157-166.
- BROOKS J.D., GOULD K. et SMITH J., 1969 - Isoprenoid hydrocarbons in coal and petroleum. *Nature*, 222, 257.
- BRUCKERT S., 1970 - Influence des composés organiques solubles sur la pédogenèse en milieu acide. Thèse Doct. ès-Science, Univ. Nancy, imprimée INRA, 72 p.
- BRUCKERT S., TOUTAIN F., TCHICAYA et JACQUIN F., 1971 - Influence des pluviollessivats de hêtre et de pin sylvestre sur les processus d'humification. *Écol. Plant.*, 6, 329-339.
- BRUNEL A., 1948 - *Traité pratique de chimie végétale*. Imp. Georges, Tourcoing, 4 vol.
- BUTLER J.H., DOWNING A.D.T. et SWABY R.J., 1964 - Isolation of a chlorinated pigment from green soil. *Australian Journ. Chem.*, 17, 817-819.
- BUTTLER J.H.A. et LADD J.N., 1969 - Effect of extractant and molecular size on the optical and chemical properties of soil humic acids. *Aust. Journ. Soil Res.*, 7, 229-239.
- CAILLEUX A., 1953 - Les lœss et les limons éoliens de France. *B.S.C.G.F.*, II, 240.
- CALLOT G., 1976 - Analyse d'un système géo-pédologique régional. Etude sédimentologique des sols et formations superficielles sur plate-forme calcaire peu déformée. Thèse, Univ. Sci. et Tech. Languedoc, Montpellier, 2 t., 107 p.
- CASALICCHIO G. and FERRI G., 1971 - Ricerche sulla costituzione della frazione lipidica del suolo. II - Gli acidi grassi presenti in terrini forestali litoranei e collinari. *Agro-Chimica*, XV, 4-5, 301-312.
- CASALICCHIO G. and LERCKER G., 1973 - Ricerche sulla costituzione lipidica del suolo. III - Composizione in acidi organici (acidi grassi, acidi aromatici, acidi diterpinici) di specie erbacee, di foglie e rami di specie arboree e loro variazioni in profili di terreni naturali. *Agrochimica*, XVII, 3-4, 318-329.

- CASALICCHIO G. and LERCKER G., 1974 - Ricerche sulla costituzione della frazione lipidica del suolo. V - Sul contenuto e sulla dinamica degli alcoli (alifatici, triterpenici) in piante erbacee, in rami e foglie di piante arboree e nei rispettivi profili di terrono. *Agrochimica*, XVIII, 4, 382-392.
- CHARPENTIER M., 1968 - Rapport général. *Ann. Inst. Pasteur*, 115, 4, 497-537.
- CHENG H. et van HOVE J., 1964 - Characterization of organic matter in European soils by nitrogen fractionation. *Pedologie*, 14, (1), 8-23.
- CHOULIARAS N., 1976 - Evolution de la matière organique dans une rendzine. Thèse Docteur-Ingénieur, Nancy I, 109 p.
- CHOULIARAS N., VEDY J.C. et JACQUIN F., 1975 - Fractionnement et caractérisation de la matière organique dans les rendzines. *Bull. E.N.S.A.I.A.*, Nancy, 17, (1), 65-74.
- CLARK R.C. et BLUMER M., 1967 - Distribution of n-paraffins in marine organisms and sediments. *Limn. Ocean.*, 12, 79-87.
- CLARK F. et TAN K., 1969 - Identification of a polysaccharide ester linkage in humic acid. *Soil Biol. and Biochem.*, 1, 75-81.
- COOPER J.E. et BRAY E.E., 1963 - A postulated role of fatty acids in petroleum formation. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 27, 1123.
- COQUAND A., 1860 - Description physique, géologique, paléontologique et minéralogique du département de la Charente. 2 t., 542 p., 420 p., Marseille.
- CORNFIELD A.H., 1959 - The mineralization during incubation of the nitrogen of soil during incubation : influence of pH, total nitrogen and organic carbon contents. *Journ. Soil Food Agric.*, 3, 343-349.
- CORTEZ J., 1977 - Biodégradation, *in vitro*, de deux lipo-polysaccharides bactériens ^{14}C dans un sol rouge méditerranéen. *Geoderma*, 18, 3, 177-192.
- COULSON C.B., DAVIES R.I. et LEWIS D.A., 1960.a - Polyphenols in plant, humus and soil. 1 - Polyphenols of leaves, litter and superficial humus from mull and morsites. *Journ. Soil Sci.*, 11, 20-29.
- COULSON C.B., DAVIES R.I. et LEWIS D.A., 1960.b - Polyphenols in plant, humus and soil. 2 - Reduction and transport by polyphenols of iron in model columns. *Journ. Soil Sci.*, 11, 30-44.
- COWLING E.B., 1960 - Methods for chemical analysis of decayed woods. *Forest Products laboratory, Madison*, n° 2177.
- CROSS A., 1967 - Introduction à la pratique de la spectroscopie infrarouge. Azoulay, Paris, 129 p.
- DARASELIYA N.A. et KALATOZA G.B., 1968 - Influence of the moisture content of red earth soil on its biological activity. *Soviet Soil Sci.*, 11, 1572-1582.
- DASTILLUNG M. et OURISSON G., 1977 - Acides libres, liés, solubles et liés insolubles des sédiments. In *Géochimie organique des sédiments marins profonds*. ORGON I, Mer de Norvège, p. 237-246.
- DAVIS J.B., 1967 - Biosynthesis of chemical products in petroleum microbiology. Elsevier Publishing Co., 283-346.
- DAVIES J.A. et HUGHES I., 1968 - The biochemistry and microbiology of Crude oil in biodegradation. In *Symp. Biol. Effects Oil Poll.*, 139-144.
- DAVIES R.I., COULSON C.B. et LEWIS D.A., 1964.a - Polyphenols in plant, humus and soil. III - Stabilization of gelatin by polyphenol tanning. *Journ. Soil Sci.*, 15, 2, 299-309.
- DAVIES R.I., COULSON C.B. et LEWIS D.A., 1964.b - Polyphenols in plant, humus and soil. IV - Factors leading to increase in biosynthesis of polyphenol in leaves and their relationship to mull and mor formation. *Journ. Soil Sci.*, 15, 2, 310-318.

- DECAU J., 1968 - Contribution à l'étude de l'influence de l'azote dans le sol. I - Principales formes d'azote obtenues par hydrolyse. *Ann. Agron.*, 19, (16), 653-685.
- DEGENS E. (1967) - Diagenesis of organic matter. In *Diagenesis in sediments*, CHILINGAR ed. Elsevier, Amsterdam, 343-390.
- DELL'AGNOLA G., FERRARI G. et MAGGIONI A., 1964 - Gel filtrazione dell'humus. Nota II - Frazionamento della sostanza organica del terreno mediante gel filtrazione con vari tipi di sephadex. *Ric. Sci.*, 34, IIB, 347-352.
- DELL'AGNOLA G. et MAGGIONI A., 1965 - Gel filtrazione dell'humus. Nota V - Effetto della soluzione eluente sul frazionamento della sostanza organica del terreno con sephadex. *Bull. Sci. Facoltà di Chimica Industriale Bologna*, 23, 231-332.
- DELL'AGNOLA G. and FERRARI G., 1971 - Molecular sizes and functional groups of humic substances extracted by 0.1 M pyrophosphate from soil aggregates of different stability. *Journ. Soil Sci.*, 3, 342-349.
- DIBBLE J.T. et BARTHA R., 1976 - Effect of iron on the biodegradation of petroleum in seawater. *Appl. Environ. Microbiol.*, 31, (4), 544-550.
- DIBBLE J.T. et BARTHA R., 1979.a - Effect of environmental parameters on the biodegradation of oil sludge. *Appl. Environ. Microbiol.*, 34, (4), 729-739.
- DIBBLE J.T. et BARTHA R., 1979.b - Leaching aspects of oil sludge biodegradation in soil. *Soil Sci.*, 127, (6), 365-370.
- DIBBLE J.T. et BARTHA R., 1979.c - Rehabilitation of oil-inundated agricultural land : a case history. *Soil Sci.*, 128, (1), 56-60.
- DOMMERMUES Y., 1960 - La notion de coefficient de minéralisation du carbone dans les sols. *Agronomie Tropicale*, 15, (1), 45-60.
- DOMMERMUES Y., 1962.a - Contribution à l'étude de la dynamique microbienne des sols en zone semi-aride et en zone tropicale sèche. *Ann. Agron.*, 13, 4, 265-324.
- DOMMERMUES Y., 1962.b - Contribution à l'étude de la dynamique microbienne des sols en zone semi-aride et en zone tropicale sèche. *Ann. Agron.*, 13, 5, 391-468.
- DOMMERMUES Y., 1963 - Evaluation du taux de fixation de l'azote dans un sol durable reboisé en filau. *Agrochimica*, VII, 4, 335-340.
- DOMMERMUES Y., 1968 - Dégagement tellurique de gaz carbonique : mesure et signification. *Ann. Inst. Pasteur*, 115, (4), 627-656.
- DOMMERMUES Y. et MANGENOT F., 1970 - *Ecologie microbienne du sol*. Masson et Cie Paris, ed., 796 p.
- DORMAAR J., JACQUIN F. et METCHE M., 1970 - Extraction and purification of humic acids from a rendzine Ah and a podzol Bh horizon. *Soil Biol. and Biochem.*, 2, 285-293.
- DUCHAUFOR Ph. 1953 - Humus actif et humus inerte. *Recherches expérimentales sur la minéralisation de l'humus*. *Ann. E.N.E.F.*, XIII, 2, 400-454.
- DUCHAUFOR Ph., 1970 - *Précis de pédologie*. Masson et Cie, Paris, 3ème édition, 481 p.
- DUCHAUFOR Ph., 1972 - *Processus de formation des sols*. Biochimie et Géochimie. C.R.D.P. Nancy, coll. "Etudes et Recherches", 182 p.
- DUCHAUFOR Ph., 1973 - Action des cations sur les processus d'humification. *Sci. Sol*, 3, 151-161.
- DUCHAUFOR Ph., 1976 - Dynamics of organic matter in soils of temperate regions : its action on pedogenesis. *Geoderma*, 15, 1, 31-41.

- DUCHAUFOR Ph., 1977 - Pédologie. I - Pédogenèse et classification. Masson et Cie, Paris, éd., 477 p.
- DUCHAUFOR Ph. et JACQUIN F., 1966 - Nouvelles recherches sur l'extraction et le fractionnement des composés humiques. *Bull. E.N.S.A. Nancy*, 8, (1), 3-24.
- DUCHAUFOR Ph. et JACQUIN F., 1975 - Comparaison des processus d'humification dans les principaux types d'humus forestiers. *Sci. Sol*, 1, 29-36.
- DUCLoux J., 1970 - L'horizon Béta des sols lessivés sur substratum calcaire de la Plaine vendéenne. *Bull. A.F.E.S.*, 3, 29-36.
- DUCLoux J., 1971 - Les sols de la Plaine vendéenne sur substratum calcaire bathonien. *Bull. A.F.E.S.*, 3, 11-28.
- DUCLoux J., 1973 - Essai de quantification au niveau micromorphologique. Application aux sols d'une toposéquence sur substratum calcaire de la Plaine vendéenne. *Sci. Sol*, 2, 81-89.
- DUCLoux J., 1976 - Essai de caractérisation semi-quantitative des revêtements argileux des sols lessivés glossiques du Bocage vendéen méridional à l'aide du microscope électronique à balayage. *Sci. Sol*, 1, 23-36.
- DUCLoux J., 1978 - Contribution à l'étude des sols lessivés sous climat atlantique. Lessivage en milieu neutre et en milieu désaturé: Influence des actions paléo-pédologiques (exemples pris aux confins du Bassin Aquitain et du Massif Armoricaïn : Plaine et Bas-Bocage vendéens). Thèse Doct. ès-Sci. Nat., Univ. Poitiers, 200 p.
- DUCLoux J. et RANGER J., 1975 - Les sols lessivés glossiques des limons du Bocage vendéen méridional. *Ann. Soc. Sci. Nat. Char. Marit.*, VI, 2, 115-132.
- DUCLoux J. et RANGER J., 1977 - Les fragipans des sols lessivés glossiques du Bas-Bocage vendéen. C.R. Vth intern. working-meeting of soil micromorph., Grenade, t. II, 815-832.
- DUPUIS J. et DUPUIS T., 1966 - Technique nouvelle pour le dosage du calcaire actif dans les sols humifères par la méthode à l'oxalate d'ammonium. *Sci. Sol*, 1, 31-37.
- DUPUIS T., JAMBU P. et DUPUIS J., 1970 - Etude par analyse thermique différentielle des substances organiques extraites des sols hydromorphes calcaïques. *Ann. Agron.*, 21, (1), 75-94.
- DUPUIS T. et JAMBU P., 1972 - Sur quelques propriétés des humates et fulvates de calcium. C.R. Acad. Sci. Paris, 276, 489-492.
- DUPUIS T., JAMBU P. et RIGHI D., 1975 - Structure and origin of humins in podzols from the "Landes du Médoc", France. *Trans. of the Intern. Symp. "Humus et Planta VI"*, Praha, 441-445.
- EGLINTON G. et HAMILTON R.J., 1967 - Leaf epicuticular waxes. *Science*, 156, 1322.
- FAURIE G., 1980 - Devenir de l'ammonium en sol calcaire : nitrification et volatilisation de l'ammoniac. Thèse Doct. Etat, Lyon I, 256 p.
- FEODOROFF A., 1958 - Un appareil pour le tamisage de la terre sous l'eau. *Ann. Agron.*, IV, 537-546.
- FEODOROFF A., 1961 - Evaluation de la stabilité structurale d'un sol (indice S). Nouvelles normes d'emploi pour l'appareil à tamiser. *Bull. A.F.E.S.*, 8, 6-15.
- FLAIG W., BEUTELSPACHER et RIETZ E., 1975 - Chemical composition and physical properties of humic substances. In J.E. GIESEKING ed : *Soil components. I - Organic components*, 534 p. Springer Verlag, Berlin, p. 1-212.
- FORSYTH W.G.C., 1947 - Studies on the more soluble complexes of soil organic matter. I - A method of fractionation. *Biochem. Journ.*, 41, 176-181.

- FROMENT A., 1971 - La minéralisation de la matière organique dans les sols calcimorphes du plateau forestier de Virelles (Belgique). *Bull. A.F.E.S.*, 3, 39-44.
- FUSTEC-MATHON E., 1970 - Contribution à l'étude écologique des milieux dunaires sur le littoral atlantique du Centre-Ouest de la France. *Thèse Doct. Etat, Poitiers*, 204 p.
- FUSTEC-MATHON E., RIGHI D. et JAMBU P., 1975. - Influence des bitumes extraits des landes du Médoc sur la microflore tellurique. *Rev. Ecol. Biol. Sol*, 12, (1), 393-404.
- FUSTEC-MATHON E., JAMBU P., JOLY G. et JACQUESY R., 1977 - Analyse et rôle des bitumes dans les sols sableux acides. *Soil Organic Matter Studies*, IAEA/FAO, Vienne, II, 105-114.
- FUSTEC-MATHON E., JACQUESY R. et JAMBU P., 1978 - Ecological importance of lipids in soils. *Abstr. IInd Intern. Cong. Ecology, Jérusalem*, p. 124.
- FUSTEC E., JAMBU P., BILONG P., AMBLES A. et JACQUESY R., 1981 - Interrelations entre les lipides et le fer dans les sols. Influence de l'addition de fer à un horizon A de podzol. *Proc. Symp. Migrations organo-minérales dans les sols tempérés*, C.N.R.S., Paris, 215-225.
- GAUCHER G., 1968 - *Traité de Pédologie agricole. Le sol et ses caractéristiques agronomiques*. Dunod, Paris, 578 p.
- GRAY T.R.G., 1976 - Survival of vegetative microbes in soil. In GRAY T.R.G. et POSTGATE J.R. Ed., *The survival of vegetative microbes. The Society for General Microbiology, Symposium 26, Cambridge, Univ. Press*, 327-364.
- GUCKERT A., 1973 - Contribution à l'étude des polysaccharides dans les sols et leur rôle dans les mécanismes d'agrégation. *Thèse Doct. Etat, Nancy I*, 138 p.
- GUILLET B., 1972 - Relation entre l'histoire de la végétation et la podzolisation dans les Vosges. *Thèse Etat, Nancy*, 112 p.
- GUNSTONE F.D., 1967 - *An introduction to the chemistry and biochemistry of fatty acids and their glycerides*. Chapman and Hall, London.
- GUPTA O. et SOWDEN F., 1964 - Isolation and characterization of cellulose from soil organic matter. *Soil Sci.*, 97, 15, 328-333.
- GURR M.I., 1980 - The biosynthesis of triacylglycerols. In *The Biochemistry of plants. Vol. 4 Lipids : structure and function*. P.K. STUMPF, 205-248.
- HAIDER K. et DOMSCH K., 1969 - Abbau und Umsetzung von lignifiziertem pflanzenmaterial durch mikroskopischen Bodenpilze. *Arch. Mikrobiol.*, 64, 338-348.
- HAN J. et CALVIN M., 1969 - Hydrocarbon distribution of algal and microbiological activity in sediments. *Proc. Nat. Acad. Sci., U.S.A.*, 64, 436-444.
- HANCE R.J. et ANDERSON G., 1963.a - Extraction and estimation of soil phospholipids. *Soil Sci.*, 96, 94.
- HANCE R.J. et ANDERSON G., 1963.g - Identification of hydrolysis products of soil phospholipids. *Soil Sci.*, 96, 157.
- HANDA N., 1972 - Organo-géochimical studies of a 200 meters Core sample from Lake Biwa. The determination of carbo-hydrate and organic carbon. *Proc. Japan Acad.*, 48, (7), 510-515.
- HANDLEY W.R.C., 1954 - A mull and mor formation in relation to forest soils. *For. Comm. Bull.*, 23, H.M.S.O. London.
- HARMSSEN G.W. et VAN SCHREVEN D.A., 1955 - Mineralization of organic nitrogen in soil. *Adv. Agron.*, 7, 299-398.
- HARWOOD J.L., 1980 - Plant acyl lipids : structure, distribution and analysis. In *The Biochemistry of plant ; vol. 4 : Lipids : structure and function* P.K. STUMPF ed., 1-55.

- HAUG P. et SEVER J.R., 1971 - A study of the mechanism of formation of the acids in a marine sediments : acids of the excello shale and Surtsey Lagoonal sediment. In *Advances in organic Geochemistry*, GAERTNER H.R.V. et WEHNER H. ed., Pergamon Press, 293-302.
- HEDGES J.I., 1977 - The association of organic molecules with clay minerals in aqueous solutions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 41, 1119-1123.
- HEINEN W. et VRIES H. de, 1966 - Stages during the breakdown of plant cutin by soil microorganisms. *Arch. Mikrobiol.*, 54, (4), 331-338.
- HENIN S., 1976 - Cours de Physique du sol. I - Texture, structure, aération. ORSTOM Editest, 159 p.
- HENIN S. et AUBERT G., 1945 - Relation entre le drainage, la température et l'évolution des sols. *C.R. Acad. Sci.*, 220, 230-232.
- HENIN S., MONNIER G. et COMBEAU A., 1958 - Méthode pour l'étude de la stabilité structurale des sols. *Ann. Agron.*, 1, 71-90.
- HENIN S., GRAS R. et MONNIER G., 1969 - Profil cultural. L'état physique du sol et ses conséquences agronomiques. Masson et Cie, Paris, 2ème ed., 332 p.
- HISSINK D.J., 1925 - Base exchange in soils. *Trans. Faraday Soc.*, XX, 560-562.
- HITCHCOK C. et NICKOLS B.W., 1971 - Plant lipid biochemistry. Academic Press, New-York.
- JACQUIN F., 1963 - Contribution à l'étude des processus de formation et d'évolution de divers composés humiques. Thèse Doct. Etat, Nancy, 156 p.
- JACQUIN F. et CHOULIARAS N., 1976 - Evolution de la matière organique dans une rendzine et son interférence sur une classification génétique des humus. *Sci. Sol*, 4, 241-246.
- JACQUIN F. et MERLET D., 1975 - Variations saisonnières de l'humification sous climats tempérés. *Bull. E.N.S.A.I.A.*, Nancy, XVII, 1, 75-86.
- JAMAGNE M., 1967 - Bases et techniques d'une cartographie des sols. *Ann. Agron.*, 18, hors série, 142 p.
- JAMBU P., 1971 - Contribution à l'étude de l'humification dans les sols hydromorphes calciques. Les sols du Marais Poitevin. Thèse Etat, Poitiers, 192 p.
- JAMBU P., DUPUIS T. et DUPUIS J., 1970 - Etude par spectroscopie infrarouge de bitumes extraits de sols calciques hydromorphes. *Sci. Sol*, 1, 31-41.
- JAMBU P. et DUPUIS T., 1975 - Characterization of soil humic substances and their organo-metallic derivatives by thermal analysis. *Transact. Intern. Symp. "Humus et Planta VI, Praha*, 69-72.
- JAMBU P., DUPUIS T. et DUPUIS J., 1972 - Etude de quelques aspects de la fixation du fer par les acides humiques. *Ann. Agron.*, 23, (3), 333-354.
- JAMBU P., DUPUIS T. et GARAIS M., 1975 - Caractérisation par analyse thermique différentielle des complexes métalliques fulviques et humiques. I = Caractérisation des complexes préparés au laboratoire. *Journ. Thermal Anal.*, 8, 87-97.
- JAMBU P., FUSTEC E. et JACQUESY R., 1978 - Les lipides des sols : nature, origine, évolution, propriétés. *Sci. Sol*, 4, 229-240.
- JENSEN V., 1964 - On the occurrence of yeasts in forest soils. *Trans. 8th Intern. Cong. Soil Science, Bucharest*, 3, 561-567.
- JOBSON A., COOK F.D. et WESTLAKE D.W.S., 1972 - Microbial utilization of crude oil. *Appl. Microbiol.*, 23, (6), 1082-1089.
- JONES J.G., 1970 - The origin and distribution of hydrocarbons in an Upland Moorland Soil and Underlying shale. *Journ. Soil Sci.*, 21, 2, 330-339.

- KANEDA T., 1967 - Biosynthesis of long chain hydrocarbons. I - Incorporation of L-valine, L-threonine, L-isoleucine and L-leucine into specific branched-chain hydrocarbons in Tobacco. *Biochem.*, 6, 2023-2031.
- KEENEY M., 1956 - A survey of united states butterfats constants. II - Butyric acid. *Ass. Agric. Chemists*, 39, 212.
- KHAN S., 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), 401-409.
- KHAN S.U. et SCHNITZER M., 1972 - The retention of hydrophobic organic compounds by humic acid. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 36, 745-754.
- KIFFER E. et MANGENOT F., 1968 - Activités cellulolytiques de quelques sols forestiers. *Ann. Inst. Pasteur*, 115, 4, 582-595.
- KLUG M.J. et MARKOVETZ A.J., 1967 - Olefin oxidation by the genus *Candida*. 154th A.C.S. Nat. Meet. Chicago Abst., Paper 6.
- KOLATTUKUDY P.E., 1968 - Further evidence for an elongation decarboxylation mechanism in the biosynthesis of paraffins in leaves. *Plant Physiol.*, 43, 375-383.
- KOLATTUKUDY P.E., 1970 - Composition of the surface lipids of pea leaves (*Pisum sativum*). *Lipids*, 5, (4), 398-402.
- KOLATTUKUDY P.E., 1975 - In *Recent advances in the chemistry and biochemistry of plant lipids*, 203-246.
- KOLATTUKUDY P.E., 1980 - Cutin, suberin and waxes. *The biochemistry of plants. vol. 4 : Lipids, structure and function.*, P.K. STUMPF, Ed., 571-645.
- KOLATTUKUDY P.E. et WALTON T.J., 1972 - The biochemistry of plant cuticular lipids. *Progr. Chem.*, 13, 121-175.
- KOLATTUKUDY P.E. et WALTON T.J., 1973 - The biochemistry of plant cuticular lipids. *Prog. Chem. Fats and other lipids*, 13, 119-175.
- KONG K.J. et DOMMERGUES Y., 1970 - Limitation de la cellulolyse dans les sols organiques. I - Etude respirométrique. *Rev. Ecol. Biol. Sol*, 7, 4, 441-456.
- KONONOVA M., 1967 - Methods of determining humus composition and their rationalization. *Soviet Soil Sci.*, 7, 894-903.
- KONONOVA M., 1972 - Current problems in the study of soil organic matter. *Soviet Soil Sci.*, 4, (4), 420-428.
- KUNC F. et STOTZKY G., 1974 - Effect of clay minerals on heterotrophic microbial activity in soil. *Soil Sci.*, 18, (3), 186-195.
- LADD J.N., 1956 - The oxidation of hydrocarbons by soil bacteria. I - Morphological and biochemical properties of a soil dipteroid. *Australian Journ. Biol. Sci.*, 9, 92-104.
- LADRAT R.S., 1978 - Les lipides des sols : accumulation, évolution et origine. Thèse Doct. 3ème cycle, Poitiers, 97 p.
- LEO R.F., 1966 - The geochemistry of fatty acids in recent marine sediments. M.A. Thesis, Univ. Texas.
- LE TACON F., 1976 - La présence de calcaire dans le sol : influence sur le comportement de l'épicéa et du pin noir d'Autriche. Thèse Etat, Univ. Nancy I, 214 p.
- LINERES M., 1977 - Contribution de l'ion calcium à la stabilisation biologique de la matière organique des sols. Thèse 3ème cycle, Bordeaux III, 60 p.
- LUKOSHKO E.S., 1965 - Changes in the chemical composition of peat-forming plants during decomposition of peat-forming layers under aerobic and anaerobic conditions. *Vestis Akad. Navuk Belarusk. SSR. Ser : Khim. Navuk* 90. Chem. Abstr. 64 : 4212 d (1966).

- MAGNOUX P., 1980 - Influence de l'apport de kaolinite sur l'évolution des lipides dans un podzol des Landes du Médoc. D.E.A., Univ. Poitiers, 51 p.
- MARTONNE E. de, 1926 - Une nouvelle fonction climatique : l'indice d'aridité. *La Météorologie*, 19, 449-459.
- MANGENOT F., 1974 - Propos liminaires sur l'humification. C.R. 1er coll. intern. Biodégradation et Humification, Nancy I, 1-14.
- MARTIN J.T. et JUNIFER B.E., 1970 - The cuticula of plants. ST-Martin's Press, New-York.
- MATHIEU C., 1971 - Contribution à l'étude des formations argileuses à silex de Thiérache, France. *Pedologie*, Gand, XXI, 1, 5-94.
- MAZLIAK P., 1963 - La cire épicuticulaire des pommes. *Rev. Gen. Bot.*, 70, 437-553.
- MEHTA N., DUBACH P. et DEUEL H., 1961 - Carbohydrates in the soil. *Adv. Carbohydrates Chem.*, 16, 335-355.
- MEINSCHEN W.G., 1969 - Hydrocarbons. Saturated, unsaturated and aromatic. In *Organic geochemistry*, G. EGLINTON et M.T.J. MURPHY Ed., 330-356.
- MITCHELL B., 1960 - The differential thermal analysis of humic substances and related materials. *Scient. Proc. Royal Dublin Soc.*, 1, (4), 105-114.
- MONNIER G., 1965 - Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols. Thèse, Paris, 140 p.
- MOORE S. et STEIN W., 1954 - A modified ninhydrin reagent for the photometric determination of amino-acids and related compounds. *Journ. Biol. Chem.*, 211, 907-913.
- MORRIS R.J. et CALVERT S.E., 1975 - Fatty acid uptake by marine sediment particles. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 39, 377-381.
- MORTENSEN J., 1960 - Physico-chemical properties of a soil polysaccharide. 7th intern. congr. Soil Sci., Madison (Wisconsin), 2, 98-104.
- MOUCAWI J., 1977 - Contribution à l'étude de l'humification sous climat atlantique dans une séquence pédologique de désaturation progressive (de la Plaine au Bocage vendéens). Thèse 3ème cycle, Univ. Poitiers, 76 p.
- MOUCAWI J., FUSTEC E., JAMBU P., AMBLES A. et JACQUESY R., 1981.a - Biooxydation of added and natural hydrocarbons in soils. Effect of iron. *Soil Biol. Biochem.* (sous presse).
- MOUCAWI J., FUSTEC E., JAMBU P. et JACQUESY R., 1981.b - Decomposition of lipids in soils. Free and esterified fatty acids, alcohols and ketones. *Soil Biol. Biochem.* (sous presse).
- MOUCAWI J., JAMBU P., DUPUIS T. et DUCLOUX J., 1977 - Nature et origine de la matière organique des horizons β des sols lessivés sur substratum calcaire de la Plaine poitevine. *Sci. Sol*, 4, 254-251.
- MUFTIC M.K., 1957 - Series of papers concerning the properties and the mechanism of action of the enzyme, Cerase. *Enzymologia*, 18, 7-21.
- NGUYEN KHA, 1973 - Recherche sur l'évolution des sols à texture argileuse en conditions tempérées et tropicales. Thèse Doct. Etat, Nancy I, 157 p.
- NTSIKOSSALABONGUI B., 1980 - Etude préliminaire de relation azote - matière organique dans un sol "carencé". D.E.A. Univ. Poitiers, 71 p.
- OGNER G. et SCHNITZER M., 1970 - The occurrence of alkanes in fulvic acid, a soil humic fraction. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 34, 921-928.
- ORLOV D., ROZANOVA O. et MATYUKHINA S., 1962 - Spectrographie infrarouge des acides humiques. *Pochvovedenie*, 1, 17-25.

- ORO J.D.W., NOONER A., ZLTKIS S.A., WILKSTROM et BARGHOORN E.S., 1965 - Hydrocarbons of biological origin in sediments about two billion years old. *Science*, 148, 77-79.
- OUDOT J., 1975 - Contribution à l'étude de la dégradation bactérienne des hydrocarbures. Thèse Docteur-Ingénieur, Dijon, 121 p.
- PANCHOLY S.K. et LYND J.Q., 1973 - Interactions with soil lipase activation and inhibition. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 37, 1, 51-52.
- PARSONS J.W. et TINSLEY J., 1975 - Nitrogenous substances. In GIESEKING J.E. Ed. : *Soil components. vol. I, organic components*, 263-304.
- PATRICK Z.A., 1971 - Phytotoxic substances associated with the decomposition in soil of plant residues. *Soil Sci.*, III, 1, 13-18.
- PERRAUD A., NGUYEN KHA et JACQUIN F., 1971 - Essai de caractérisation des formes de l'humine dans plusieurs types de sols. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 272, 1594-1597.
- PLEVEN J., 1968 - Sur les conditions d'extraction du calcium échangeable. *Bull. A.F.E.S.*, 2, 5-24.
- POCHON J. et BARJAC H. de (1958) - *Traité de microbiologie des sols*. Dunod, Paris, 685 p.
- POCHON J. et TARDIEU P., 1962 - *Techniques d'analyses en microbiologie du sol*. De La Tonelle, ed, Saint-Mandé, 108 p.
- POSNER A.M., 1966 - The humic acids extracted by various reagents from a soil. Part I : Yield, inorganic components and titration curves. *Journ. Soil Sci.*, 17, 65-78.
- POSNER A., THENG B. et WAKE J., 1968 - The extraction of soil organic matter in relation to humification. 9th Intern. Congr. Soil Sci., Adelaïde, Australia, *Trans.*, 111, 153-162.
- RANGER J., 1974 - Les sols sur limons du bocage vendéen méridional. Thèse 3ème cycle, Poitiers, 118 p.
- RATLEDGE C., 1978 - Degradation of aliphatic hydrocarbons. In WATKINSON R.J. *Developments in biodegradation of hydrocarbons. vol. 1. Applied Science Publishers L.T.D.*, 1-46.
- REMACLE J., 1964 - Caractérisation microbiologique de trois types d'humus de l'Ardenne Condruzienne. *Ann. Inst. Pasteur*, 107, 3, 257-263.
- RHEAD M.M., EGLINTON G. et ENGLAND P.J., 1971 - Products of the short-term diagenesis of oleic acid in an estuarine sediment. In GAERTNER H.R.V. et WEHNER H. : *Advances in organic geochemistry*, Pergamon Press, 1972, 323-333.
- RICHTER M., MIZUNO I., ARANGUEZ S. et URIARTE S., 1975 - Densimetric fractionation of soil organo-mineral complexes. *Journ. Soil Sci.*, 26, (2), 112-123.
- RIFFAULT L., 1837 - *Statistiques agricoles de la France. Annexe à l'enquête de 1829. Monographie agricole du département de la Vienne*, Impr. Union, Poitiers, 299 p.
- RIGHI D., 1977 - Genèse et évolution des podzols et des sols hydromorphes des Landes du Médoc. Thèse Doct. ès Sciences Nat., Poitiers, 144 p.
- ROBERT M., POUCHON J., MILKOWSKA A. et FALCON J., 1964 - Etude biologique des sols au cours de l'épreuve d'incubation. III - Aspects microbiologiques. *Ann. Inst. Pasteur, Paris*, 107, 268-281.
- ROGER P., BRUCKERT S. et JACQUIN F., 1969.a - Etude de l'évolution de l'acide oxalique dans un sol brun lessivé et dans un podzol. Comparaison avec la dynamique de l'acide citrique. *Bull. E.N.S.A. Nancy*, 11, 3-11.

- ROGER P., BRUCKERT S. et JACQUIN F., 1969.b - Evolution de l'acide citrique dans un sol brun lessivé et dans un podzol humo-ferrugineux. *Science Sol*, 2, 99-113.
- RUSSEL E., 1961 - Soil conditions and plant growth. Longmans, London, 9th ed.
- SAKUN N.E., 1942 - The interaction of humate with the mineral part of the soil. *Pochvodenie*, 8.
- SALIN R., 1969 - Contribution à l'étude du climat et de l'économie en eau des sols du Marais Poitevin (Marais Mouillé). Thèse 3ème cycle, Poitiers, 151 p.
- SANSON J., 1949 - Climatologie appliquée. Blondel-La Rougerie, Paris ed., 209 p.
- SCHARPENSEL H.W. et PIETIG F., 1969 - Altersbestimmung von Böden durch die Radio-Kohlenstoffdatierung methode. *Zeits. Pflanzen. Boden.*, 122, 2, 145-152.
- SCHLICHTING E., 1953.a - Zur Kenntnis des Heidehumus. 1 - Fraktionierung und Untersuchung des ganzen Humuskörpers. *Z. Pflanzenernähr., Düng. Bodenk.*, 61, 1-12.
- SCHLICHTING E., 1953.b - Zur Kenntnis des Heidehumus. 2 - Die Fulvosäuren. *Z. Pflanzenernähr., Düng. Bodenk.*, 61, 97-107.
- SCHNITZER M., 1977 - Recent findings on the characterization of humic substances extracted from soils from widely differing climatic zones. *Soil Organic Matter Studies*, I.A.E.A., Vienne, II, 117-132.
- SCHNITZER M. et HOFFMAN I., 1964 - Pyrolysis of soil organic matter. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 28, 520-525.
- SCHNITZER M. et KHAN S.U., 1972 - Humic substances in the environment. Marcel Dekker, New-York, 327 p.
- SELMI M., 1975 - Contribution à l'étude de l'humification des litières de hêtre dans l'Est de la France. Thèse 3ème cycle, Nancy I, 65 p.
- SHAW N., 1974 - Lipid composition as a guide to the classification of bacteria. *Adv. Appl. Microbiol.*, 17, 63-108.
- SHORLAND F.B., 1963 - Chemical plant taxonomy. SWAIN T. Academic Press, London and New-York.
- SPRINGER V. et LEHNER A., 1952.a - Decomposition and the synthesis of humus by aerobic and anaerobic decomposition of organic substances important in agriculture and forestry. 1. *Z. Pflernähr. Düng.*, 58, 193.
- SPRINGER V. et LEHNER A., 1952.b - Decomposition and the synthesis of humus by aerobic and anaerobic decomposition of organic substances important in agriculture and forestry. 2. *Z. Pflernähr. Düng.*, 59, 1.
- STEVENSON F.J., 1960 - Chemical nature of the nitrogen in the fulvic fraction of soil organic matter. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 17, 31-34.
- STEVENSON F.J., 1966 - Lipids in soil. *Amer. Oil. Chem. Soc.*, 43, (4), 203-210.
- STEVENSON F. et GOH K., 1971 - Infrared spectra of humic acids and related substances. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 35, 471-483.
- SUESS E., 1970 - Interaction of organic compounds with CaCO₃. I - Association phenomena and geochemical implications. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 34, 157-168.
- SZEGI J., 1962 - Cellulose decomposition activity of some soils of Hungary. *Studies about humus. Symp. Humus Plant*, Prague, Borno, 281-288.
- TERS M., 1961 - La Vendée littorale. Etude géomorphologique. Thèse Fac. Lettres, Paris. Impr. Oberthur, Paris, 578 p.
- THENG B. et POSNER A., 1967 - Nature of the carbonyl groups in soil humic acid. *Soil Sci.*, 102, 191-201.

- THOREZ J., BULLOCK P., CATT J.A. et WEIR A.H., 1971 - The petrography and origin of deposits filling solution pipes in the chalk near South Mimms, Hertfordshire. *Geol. Mag.*, 108, 5, 413-423.
- THORNTHWAITE C.W., 1948 - An approach towards a relational classification of climates. *Geographical Rev.*, 38, 1, 59-94.
- TISSIER M.J. et SPYCKERELLE C., 1977 - Hydrocarbures polyaromatiques des sédiments. ORGON I, Mer de Norvège, ed. C.N.R.S., 229-236.
- TISSOT B., OUDIN J.L. et PELET R., 1971 - Critères d'origine et d'évolution des pétroles. Application à l'étude géochimique des bassins sédimentaires. In *Advances Organic Geochemistry*, Pergamon Press, Oxford - Braunschweig (1972), 113-134.
- TOUTAIN F., 1974 - Etude écologique de l'humification dans les hêtraies acidiphiles. Thèse Doct. Etat, Nancy I, 114 p.
- TULLOCH A.P., 1976 - Epicuticular wax of *agropyron smithii* leaves. *Phytochemistry*, 15, (7), 1153-1156.
- TURC L., 1953 - Le bilan de l'eau des sols : relation entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement. Thèse, Paris, 252 p.
- TURC L., 1961 - Evaluation des besoins en eau d'irrigation. Evapotranspiration potentielle. *Ann. Agron.*, 12, (1), 13-49.
- TURC L., HLAVEK R., GOBILLOT Th. et LECARPENTIER C., 1963 - Carte d'évapotranspiration potentielle : interprétation et utilisation. *Bull. Tech. Génie Rural*, 60, 20 p.
- VAN VLEET E.S. et QUINN J.G., 1979 - Early diagenesis of fatty acids and isoprenoid alcohols in estuarine and coastal sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 43, 289-303.
- VEDY J.C., 1973 - Relation entre le cycle biogéochimique des cations et l'humification en milieu acide. Thèse Doct. Etat, Nancy I, 115 p.
- VEDY J.C. et JACQUIN F., 1972 - Formation "in situ" d'horizons humifères sur "matériau acide" en présence de litières améliorantes ou acidifiantes. *Science du Sol*, 2, 103-113.
- WAGNER G. et STEVENSON F., 1965 - Structural arrangement of functional groups in soil humic acid as revealed by infrared analysis. *Soil Sci.*, 29, (1), 43-48.
- WAKSMAN S.A. et STEVENS K.R., 1929 - Contribution to the chemical composition of peat. 5 - The role of microorganisms in peat formation and decomposition. *Soil Sci.*, 28, 315.
- WAKSMAN S. et IYER K., 1933 - Contribution to our knowledge of the chemical nature and origin of humus. IV - Fixation of proteins by lignin and formation of complexes resistant to microbial decomposition. *Soil Sci.*, 36, 69-82.
- WAKSMAN S.A., TENNY F.G. et STEVENS K.R., 1928 - The role of microorganisms in the transformations of organic matter in forest soils. *Ecology*, 9, 126.
- WALTER H. (1955) - Die Klimagramme als Mittel zur Beurteilung der Klimaverhältnisse für Okologische, vegetations Kundliche und land wirtschaftliche Zwecke. *Ber Dtsch. Bot. Ges.*, Bd 68.
- WANG R.S.C., LIANG YU-CHENG et SHEN WEI CHIANG, 1969 - Method of extraction and analysis of higher fatty acids and triglycerides in soils. *Soil Sci.*, 17, 3, 181-187.
- WEISS A., 1965 - In G. ROLOFF - Über die Rolle glimmerartiger schicht silicate bei der Entstehung von Erdöl und Erdöllagerstätten. *Diss. Heidelberg*.

- WELTE E., 1955 - *Nene Ergebnisse der Humus Forschung. Z. Angew. Chem.*, 67, 5, 153-155.
- WERSHAW R. et BOHNER G., 1969 - *Pyrolysis of humic and fulvic acids. Geochimica et Cosmochimica Acta*, 33, 757-762.
- WINDSOR J.G. et HITES R.A., 1978 - *Polycyclic aromatic hydrocarbons in gulf of Maine sediments and Nova Scotia soils. Geochemica et Cosmochimica Acta*, 43, 27-33.
- WOOD J., MOSCHOPEDIS S. et HERTOOG W., 1961 - *Studies in humic acid chemistry. II - Humic acid anhydrides. Fuel*, 40, 421-502.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	1.
--------------------	----

PREMIERE PARTIE

L'ENVIRONNEMENT ET LES SOLS DE LA VENDEE MERIDIONALE

<u>CHAPITRE I</u> : CADRE GEOGRAPHIQUE ET FACTEURS DU MILIEU	4.
A - Aspects géographiques	4.
B - Facteurs du milieu	4.
<u>CHAPITRE II</u> : PROFILS PEDOLOGIQUES DES STATIONS D'ETUDES	9.
A - Sols de la Plaine	9.
B - Sols du Bas-Bocage	11.
<u>CHAPITRE III</u> : CARACTERISATION DES HORIZONS HUMIFERES DE SURFACE (A ₁ ou Ap)	13.
A - Analyses physiques	13.
B - Analyses chimiques	17.
C - Activité biologique des sols	18.
D - Conclusion	19.

DEUXIEME PARTIE

CARACTERISATION DE LA MATIERE ORGANIQUE DES SOLS :
NATURE, STRUCTURE, EVOLUTION EN FONCTION DU MILIEU

<u>CHAPITRE I</u> : MATIERE ORGANIQUE TOTALE	21.
A - Carbone organique	21.
B - Azote organique	22.
C - Conclusion	24.
<u>CHAPITRE II</u> : SUBSTANCES HUMIQUES (au sens strict)	25.
A - Fractionnement	25.
B - Caractérisation des substances humiques	36.
C - Relation entre les composés humiques et la matière minérale du sol. Complexes organo-métalliques	51.
<u>CHAPITRE III</u> : POLYSACCHARIDES	56.

<u>CHAPITRE IV</u> :	FRACTIONNEMENT DES LIPIDES	59.
A -	Dosage des lipides totaux	59.
B -	Distribution comparée des lipides dans les sols	61.
C -	Conclusion	77.

TROISIEME PARTIE

ETUDE EXPERIMENTALE DE L'EVOLUTION DE LA MATIERE ORGANIQUE DU SOL
ET DE QUELQUES-UNS DE SES CONSTITUANTS

<u>CHAPITRE I</u> :	MINERALISATION DU CARBONE ORGANIQUE TOTAL ET CELLULOLYSE	79.
A -	La minéralisation du carbone organique total	79.
B -	Cellulolyse	82.
<u>CHAPITRE II</u> :	DEGRADATION DES LIPIDES	85.
A -	Biooxydation des hydrocarbures	85.
B -	Biooxydation des acides gras libres ou estérifiés, des alcools et des cétones	89.
C -	Evolution des lipides naturels extraits des différentes plantes	97.
<u>CHAPITRE III</u> :	EVOLUTION COMPAREE DU CARBONE ORGANIQUE ENDOGENE, DE LA CELLULOSE ET DES LIPIDES A DIFFERENTS NIVEAUX D'HUMIDI- TE DES SOLS	106.
A -	Evolution des divers substrats pour des teneurs en eau des échantillons correspondant aux 2/3 de la capacité au champ	106.
B -	Evolution des divers substrats à différentes teneurs en eau des sols	107.
C -	Evolution des divers substrats au cours de l'assèchement progressif du sol	112.
D -	Conclusion	116.
<u>CHAPITRE IV</u> :	EVOLUTION DES DEBRIS VEGETAUX LIGNIFIES	117.
A -	Etude de la décomposition globale	117.
B -	Evolution de la composition élémentaire	118.
C -	Evolution comparée des divers bioconstituants des bûchettes ..	120.
D -	Evolution de la fraction alcalino-soluble	125.
E -	Evolution de la fraction minérale	125.
F -	Conclusion	129.

QUATRIEME PARTIE

LA MATIERE ORGANIQUE DES HORIZONS BETA : NATURE ET ORIGINE

A -	<u>CARACTERISATION DES HORIZONS BETA</u>	130.
B -	<u>NATURE DE LA MATIERE ORGANIQUE DES HORIZONS BETA</u>	133.

C - <u>ORIGINE DE LA MATIERE ORGANIQUE DES HORIZONS BETA</u>	135.
D - <u>DISCUSSION ET CONCLUSION</u>	142.
<u>CONCLUSIONS GENERALES</u>	143.
<u>ANNEXE I</u> <i>Caractères descriptifs et analytiques des différents types de sols de la séquence étudiée</i>	149.
<u>ANNEXE II</u> <i>Méthodes analytiques</i>	155.
<u>BIBLIOGRAPHIE</u>	161.