

THÈSE

présentée à
L'INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE
PARIS - GRIGNON

pour obtenir le grade de
DOCTEUR INGÉNIEUR
« Géologie appliquée »

par

Hachemi SIDI

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

Effet de l'apport de matière organique et de gypse sur la stabilité structurale de sols de région méditerranéenne (Mateur - Tunisie)

Soutenue le 30 janvier 1987 devant la commission d'examen

| | | |
|------|-------------|------------|
| MM. | J. BOULAINÉ | Président |
| | R. CALVET | Rapporteur |
| | G. PEDRO | Examineur |
| Mlle | A. M. ROBIN | " |
| MM. | B. DABIN | " |
| | G. BOUTEYRE | " |
| | A. HALITIM | " |

A tous ceux qui contribuent à rendre la terre plus prospère.

A MON PERE

A MA MERE

AVANT-PROPOS

Au terme de ce travail, très enrichissant scientifiquement et humainement, je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont permis de le mener à terme.

Je remercie le Ministère de l'Agriculture et le directeur de l'I. N. R. A. d'Alger, pour m'avoir attribué une bourse qui m'a permis d'aborder ce travail dans les meilleures conditions matérielles.

A monsieur A. RUELLAN, directeur général de l'O. R. S. T. O. M., à monsieur FORESTIER et R. MOREAU, respectivement responsable du département E et de l'U. R. 509, je témoigne ma reconnaissance pour m'avoir accepté dans les laboratoires du centre de Bondy, et pour m'avoir permis de finir ce travail dans de bonnes conditions, en m'accordant les moyens matériels et des allocations de recherche.

Je suis également reconnaissant à Mr. M. SERVANT, pour m'avoir accepté comme pensionnaire dans les locaux de l'O. R. S. T. O. M. à Bondy.

A la suite du D. E. A. et dans le cadre de ma deuxième année d'élève O. R. S. T. O. M., MM VIEILLEFON, MAMI et WILLAIME m'ont guidé pour entreprendre les travaux de terrain sur l'inventaire et l'étude du comportement des sols de la plaine de Mateur en TUNISIE. Je remercie pour cette initiation pratique à la connaissance des sols du Maghreb.

Je remercie également Mr. J. BOULAIN, Professeur à l'I. N. A. P. G., et qui connaît bien les sols d'Afrique du Nord, pour avoir accepté de présider ce jury, ainsi que Mr. G. PEDRO responsable du D. E. A. de science du sol et Mr. Y. BOUTEYRE représentant la profession d'Agropédologie, Mlle A. M. ROBIN représentant l'Université Paris VI, qui ont bien voulu faire partie du jury.

A Mr. R. CALVET et Mr. B. DABIN, j'exprime ma grande reconnaissance pour avoir bien voulu consacrer beaucoup de temps pour m'aider à la mise en route et à la réalisation de ce travail, et pour l'analyse et l'interprétation des résultats obtenus en l'enrichissant de leurs expériences et de leurs critiques constructives.

C'est un plaisir pour moi de pouvoir compter dans ce jury, Mr. HALITIM, qui dans le cadre de l'I. N. A. d'Alger, m'a fait découvrir ce qu'est la science des sols.

Je témoigne également ma gratitude à Mr. P. DE BOISSEZON, animateur scientifique du laboratoire de matière organique du centre de Bondy, pour sa grande disponibilité, pour ses nombreux conseils et pour avoir consacré une grande partie de son temps à la correction de ce manuscrit.

Ma reconnaissance va également à Mr. M. PANSU, responsable de ce laboratoire, qui m'a été d'un grand secours dans l'élaboration de l'analyse statistique et informatique, ainsi que pour ses encouragements incessants.

Je remercie Mr. G. BELLIER, pour ses conseils pratiques pour la mise en oeuvre du dispositif expérimental et pour ses nombreux conseils pratiques pour le choix des techniques analytiques.

J'exprime également ma gratitude pour Mme E. GAVINNELI et Mme M. RICHARD, pour leur soutiens et leur contribution pour les analyses des matières organiques des sols. Je remercie également Mme M. J. POUGET, pour les délicates mesures des taux d'agrégats stables.

A Mme DORE et à Mr. PEYNS, responsable de la formation, qui se sont beaucoup démenés pour régler mes divers problèmes administratifs, j'exprime ma profonde reconnaissance. A Mme MASCRET, qui dans le cadre du centre O. R. S. T. O. M. de Bondy, s'est intéressée de près aux problèmes administratifs et matériels rencontrés durant les années de formation.

Que tous ceux que j'ai oublié me pardonnent et trouvent ici ma profonde gratitude pour leur côté humain qui a contribué à rendre mon séjour en FRANCE agréable et instructif.

SOMMAIRE

| | Pages |
|--|-------|
| RESUME | |
| INTRODUCTION | 1 |
| PREMIER CHAPITRE : MILIEU NATUREL | 5 |
| 1.1 Géologie et géomorphologie | 7 |
| 1.2 Localisation géographique | 7 |
| 1.3 Hydrographie | 9 |
| 1.4 Le climat | 11 |
| 1.5 Végétation et paysage agricole | 14 |
| 1.6 Développement de la culture de la betterave à sucre | 14 |
| 1.6.1 Présentation | 14 |
| 1.6.2 Exigences climatiques | 15 |
| 1.6.3 Exigences pédologiques | 16 |
| 1.6.4 Tolérance à la salure | 17 |
| 1.6.5 Irrigation | 18 |
| DEUXIEME CHAPITRE : LES SOLS | 19 |
| 2.1 Emplacement de ces sols dans le paysage | 21 |
| 2.2 Les sols étudiés | 22 |
| 2.2.1 Sol peu évolué d'apport à tendance verticale | 22 |
| 2.2.2 Sol salé carbonaté | 28 |
| 2.3 Conclusion | 30 |
| TROISIEME CHAPITRE : INFLUENCE DES CONSTITUANTS DU SOL SUR LA STABILITE STRUCTURALE | 31 |
| 3.1 Généralités | 33 |
| 3.2 Influence des matières organiques | 34 |
| 3.2.1 Les substances humiques | 34 |
| 3.2.2 Les polysaccharides | 35 |

| | | |
|--|--|--------|
| 3.3 | Action des colloïdes minéraux | 37 |
| 3.4 | Influence des cations | 37 |
| 3.4.1 | Cations liés aux colloïdes | 37 |
| 3.4.2 | Cations de la solution du sol | 38 |
| QUATRIEME CHAPITRE : PROTOCOLE ET CHOIX DES METHODES EXPERIMENTALES | | 39 |
| 4.1 | Les sols étudiés | 41 |
| 4.2 | Protocole expérimental | 41 |
| 4.2.1 | Dispositif | 41 |
| 4.2.2 | L'apport de matière végétale | 43 |
| 4.2.3 | L'apport de gypse | 43 |
| 4.2.4 | Processus de l'expérimentation | 44 |
| 4.3 | Méthodes d'analyse utilisées | 45 |
| 4.3.1 | Le carbone | 45 |
| 4.3.2 | Etude des agrégats | 46 |
| 4.3.3 | Conclusion | 52 |
| CINQUIEME CHAPITRE : INFLUENCE DES TRAITEMENTS SUR LE COMPORTEMENT DES DEUX TYPES DE SOLS | | 53 |
| 5.1 | Evolution des matières organiques | 55 |
| 5.1.1 | Carbone organique (C. O.) | 55 |
| 5.1.2 | Carbone minéral (C. M.) | 57 |
| 5.1.3 | Matière organique légère (M. O. L.) | 57 |
| 5.1.4 | Acides fulviques libres (A. F. L.) | 60 |
| 5.1.5 | Acides fulviques extractibles par le pyrophosphate de Na (A. F. P.) | 62 |
| 5.1.6 | Acides fulviques extractibles à la soude (A. F. S.) | 62 |
| 5.1.7 | Acides humiques extractibles par pyrophosphate de Na (A. H. P.) | 65 |
| 5.1.8 | Acides humiques extractibles à la soude (A. H. S.) | 67 |

| | |
|---|------------|
| 5.1.9 Acides humiques gris, intermédiaires et bruns | 69 |
| Acides humiques gris (A. H. G.) | 69 |
| Acides humiques intermédiaires (A. H. I.) | 71 |
| Acides humiques bruns (A. H. B.) | 71 |
| 5.1.10 L'humine | 74 |
| 5.1.11 Les polysaccharides | 74 |
| 5.1.12 Conclusion | 76 |
| | |
| 5.2 Evolution de l'agrégation | 81 |
| 5.2.1 Sol d'apport à tendance verticale | 82 |
| 5.2.2 Sol salé carbonaté non enrichi en gypse | 84 |
| 5.2.3 Sol salé carbonaté enrichi en gypse | 86 |
| 5.2.4 Comparaison des taux d'agrégats stables après prétraitement au benzène (Agb.) | 88 |
| 5.2.5 Variation de la dispersion et de l'indice Is | 91 |
| La dispersion (A + L) | 91 |
| L'instabilité structurale (Is) | 91 |
| | |
| 5.3 Evolution simultanée des caractéristiques des constituants et des propriétés physiques | 94 |
| 5.3.1 Relation entre la matière organique et Agb. | 94 |
| Agb en relation avec le carbone organique | 94 |
| Agb en relation avec les fractions humiques | 95 |
| Agb en relation avec les polysaccharides | 97 |
| 5.3.2 Relation entre le gypse et Agb | 98 |
| | |
| 5.4 Conclusion | 99 |
| | |
| SIXIEME CHAPITRE : MODELISATION DE L'EVOLUTION HUMIQUE DES SOLS ET ETUDE STATISTIQUE DE L'EFFET DES FRACTIONS HUMIQUES SUR LA STABILITE DES AGREGATS | 101 |
| | |
| 6.1 Introduction | 103 |
| | |
| 6.2 Evolution humique des sols : Cinétique de décomposition du carbone. | 103 |
| 6.2.1 Le modèle de HENIN et Al. 1959 | 105 |
| 6.2.2 Traitement des données | 106 |
| 6.2.3 Modélisation de l'influence des apports organiques | 110 |
| 6.2.4 Bilan des ajustements et temps de demi-vie | 112 |
| 6.2.5 Conclusion | 114 |

| | | |
|---|--|---------|
| 6.3 | Influence des fractions humiques sur la stabilité des agrégats. | 114 |
| 6.3.1 | Rappels théoriques | 114 |
| 6.3.2 | Sol d'apport à tendance vertique | 121 |
| 6.3.3 | Sol salé carbonaté (sans apport de gypse) | 126 |
| 6.3.4 | Sol salé carbonaté (avec apport de gypse) | 131 |
| 6.3.5 | Analyse comparative du sol salé carbonaté avec ou sans apport de gypse | 135 |
| 6.3.6 | Conclusion | 137 |
| SEPTIEME CHAPITRE : DISCUSSION ET SYNTHESE | | 139 |
| 7.1 | Discussion des résultats | 141 |
| 7.1.1 | Agrégation rapide et éphémère | 141 |
| 7.1.2 | Désagrégation rapide | 143 |
| 7.1.3 | Agrégation stationnaire | 144 |
| 7.1.4 | Amélioration secondaire de l'agrégation | 145 |
| 7.2 | Synthèse | 145 |
| 7.2.1 | Action microbienne | 145 |
| 7.2.2 | Action de la matière organique humifiée | 146 |
| CONCLUSION GENERALE | | 147 |
| REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES | | 153 |
| ANNEXES | | 159 |

.....

" EFFET DE L'APPORT DE MATIERE ORGANIQUE ET DE GYPSE SUR LA STABILITE STRUCTURALE DE SOLS DE REGION MEDITERRANEENNE (Mateur-TUNISIE) "

RESUME :

Les propriétés physiques des sols à argiles gonflantes de la plaine de Mateur (TUNISIE), posent des problèmes, notamment pour la culture de la betterave à sucre, (structure battante, faible perméabilité). Une expérimentation de laboratoire a donc été réalisée, pour déterminer les améliorations que peuvent apporter des amendements organiques et gypseux sur un sol à tendance vertique et un sol salé carbonaté.

Trois doses de matière organique (paille de blé) ont été apportées avec en sous-traitement un apport de gypse pour le sol salé carbonaté. Les échantillons ont été incubés dans des conditions de température constante (28°C), et d'humidité contrôlée. L'incubation a duré 9 mois.

Sur les échantillons prélevés au cours de ces expériences, nous avons étudié :

- L'évolution des matières organiques, en particulier des matières humiques extractibles et des polysaccharides.
- L'évolution des agrégats stables à l'eau (tests HENIN-MONNIER).

L'analyse des résultats obtenus, aboutit aux conclusions suivantes :

Dans ces deux sols, on observe deux phases très nettes d'évolution de l'agrégation. L'une très brève, avec une forte amélioration des taux d'agrégats stables (15 premiers jours), puis une décroissance aussi rapide (15 jours suivants), correspondant à la minéralisation rapide des constituants énergétiques apportés ou préexistants dans ces sols. Elle serait donc essentiellement d'origine biologique. L'autre phase intervient après 6 mois. Elle est moins intense, mais plus durable, et paraît liée à l'action des produits humiques qui se polymérisent (acides humiques gris).

Dans le sol salé carbonaté, le gypse seul a une action limitée sur de l'agrégation. En revanche la synergie avec l'action de l'amendement organique, amplifie nettement les deux phases de l'agrégation. Durant la première, les deux apports conjugués stimuleraient l'activité bactérienne et la synthèse des substances agrégatives. A long terme, cette action porte sur l'agrégation et la polymérisation des acides humiques.

L'ajustement d'un modèle sur l'évolution du carbone organique dans ces sols, montre que la stabilité de l'humus dans le sol à tendance vertique est deux fois plus faible que dans le sol salé carbonaté; et l'apport de gypse accélère très fortement la minéralisation de l'humus.

MOTS CLES :

MATIERE ORGANIQUE - ACIDES HUMIQUES ET FULVIQUES - POLYSACCHARIDES - GYPSE - AGREGATS - STABILITE STRUCTURALE - SOL VERTIQUE - SOL SALE CARBONATE -BETTERAVE SUCRIERE.

" EFFECT OF ORGANIC MATTER AND GYPSUM ON THE SOIL STRUCTURAL STABILITY IN THE MEDITERRANEAN COUNTRY (Mateur-TUNISIA) "

SUMMARY :

The physical properties of soils with swelling clays in the Mateur plain (TUNISIA) raise problems, especially in the cultivation of the sugar-beet (puddled structure, low permeability). Therefore, a laboratory experiment has been conducted in order to determine the improvements likely to be brought by organic and gypseous manures to a vertic soil and a salted calcareous soil.

Three amounts of organic matter (Wheat straw) have been applied along with some gypsum to the salted calcareous soil. Samples have been incubated at a constant temperature (28°C) and under conditions of controlled moisture. The period of incubation amounted to nine months.

The evolution of organic matter and particularly of the extractable humic substances and of polysaccharides as well as the evolution of aggregates which are stable to water (HENIN-MONNIER tests) have been studied on the samples taken during these experiments.

The analysis of the results obtained leads to the following conclusions :

In these two soils, two well-defined evolutionary stages of aggregation have been observed. The first one is very short (the first fifteen days) and is characterized by a high increase of the pourcentages of stable aggregates corresponding to the rapid mineralization of the energy constituents which were brought to these soils or were already present. Therefore, it would be mainly a biological process. An other stage is observed six months latter. It is less intense but it proceeds with a longer period of time and seems to be linked to the action of the humic products which are polymerizing (grey humic acids).

In the salted calcareous soils, gypsum has a limited restricted effect on the improvement of aggregation. On the contrary, its effect added to that of organic manure considerably emphasize the results of the two stages of aggregation. During the first one, the both elements (gypsum and organic manure) would stimulate the bacterial activity and the synthesis of the aggregative substances. Later this process produces the polymerization of humic acids and then improves the aggregation.

The fitting of a model on the evolution of organic carbon in these soils shows that the humus stability in the vertic soil is twice lower than that observed in the salted calcareous soil and that gypsum considerably increases the humus mineralization.

KEY WORDS :

Organic matter - Humic and fulvic acids - Polysaccharides - Gypsum - Aggregates - Structural stability - Vertic soil - Calcareous salted soil - Sugar-beet.

INTRODUCTION

Ce travail fait suite à l'étude cartographique qui a été effectuée en 1983 en Tunisie, dans la région de Mateur. Dans cette étude, nous avons fait ressortir l'existence dans la région étudiée de quelques grands types de sols, tels que les sols d'apport alluviaux à tendance vertique, sols calcimagnésiques, sols fersiallitiques, sols hydromorphes et sols salés carbonatés.

La salinisation provient de la remontée d'une nappe très salée qui provoque une accumulation de sels en surface et peu être par des apports par les oueds de matériaux des formations miocènes signalées à l'amont.

La carbonatation est due à l'apport de calcaire qui provient de la roche-mère (calcaire dur, alluvions plus ou moins calcaires et parfois des matériaux marneux).

Dans cette zone, la présence d'une alcalinisation est due à l'apport par la nappe d'un excès d'ions alcalins. Le faciès géochimique de la nappe est chloruré-sodique.

Dans ces sols, de nombreux problèmes de mise en valeur ont été observés. Il y a d'abord les contraintes liées à la nature des sols (hydromorphie, salure, alcalinisation, nature des argiles, texture lourde etc.), ensuite les problèmes liés aux contraintes qui sont fonction des caractéristiques chimiques et minéralogiques des sols (déficit hydrique, mauvais drainage, problème de stockage de l'eau, mauvaise levée de semis, larges fentes de retrait gênant le développement des racines, dégradation de la structure due à des façons culturales trop répétées et à des périodes de travail du sol peu favorables (compte tenu de l'humidité du sol)).

Il existe de grandes difficultés pour le travail du sol, en fonction des aléas climatiques. Les agriculteurs (prisonniers des impératifs d'un calendrier cultural), labourent en période trop humide, ce qui entraîne la création de semelles de labours, devenant un obstacle infranchissable au développement des racines (en particulier celles de la betterave à sucre).

Dans la zone en amont, le principal problème posé aux agriculteurs est la grande pierrosité à faible profondeur. En aval, la perméabilité est très déficiente, ce qui entraîne des submersions des sols pendant une longue partie de l'année (3 à 4 mois), qui empêchent toute intervention des engins aratoires.

Tout cela conditionne le choix du calendrier cultural et en particulier les époques les plus favorables pour le labour. Ces choix sont fonctions également des types d'assolements retenus et des variétés cultivées. Cependant, dans la plupart des cas, l'assolement est de type biennal céréale-fourrage. Des essais de plantation de betterave à sucre ont été effectués dans quelques parcelles de la plaine en remplacement des céréales.

Le mauvais développement des semis est surtout dû au phénomène de battance ou encroustement superficiel. Les fentes de retrait gênent par la suite le développement du système racinaire, surtout en fin de cycle cultural.

Les recherches entreprises au laboratoire avaient donc pour objet, l'étude des possibilités d'amélioration des propriétés physiques des principales catégories de sols.

Nous avons donc retenu deux types de sol, les plus représentés dans la zone. Le premier est un sol d'apport alluvial à tendance verticale. Le deuxième est un sol salé carbonaté à hydromorphie de profondeur.

- Sol d'apport à tendance verticale :

Ce sol présente surtout le problème d'un très mauvais drainage, avec une mauvaise circulation interne de l'eau. Cela engendre des difficultés dans le travail du sol et surtout un mauvais développement des racines. Dans ce sol des possibilités d'intervention sont envisageables par des apports de résidus de culture (paille de blé), de façon à améliorer la structure, l'aération et une meilleure circulation de l'eau dans le sol.

- Sol salé carbonaté :

Ce sol est affecté non seulement par un mauvais drainage, mais en plus par une importante salinisation à faible profondeur. A signaler aussi l'installation en profondeur d'un début d'alcalinisation liée à la proximité de la nappe. Dans ce sol, des interventions par des apports de résidus de culture (paille de blé), avec des apports de gypse ont été testés pour améliorer son potentiel agricole et limiter, à défaut d'éliminer, l'effet des sels sur la dégradation de la structure.

L'étude préliminaire qui a été réalisée sur modèle de laboratoire en conditions homogènes et bien contrôlées, est donc destinée à étudier le comportement de ces sols et l'influence d'apports organiques et minéraux sur les propriétés physiques et chimiques de ces sols. Cette étude ne peut prétendre remplacer les expérimentations de terrain, mais permet d'optimiser les protocoles expérimentaux qu'ils seraient souhaitable de réaliser sur le terrain.

CHAPITRE 1
MILIEU NATUREL

1.1 : GEOLOGIE ET GEOMORPHOLOGIE :

La plaine de Mateur est une vaste dépression, qui s'étend sur une superficie de 25.000 hectares. Elle est située à une altitude entre zéro et cent mètres. Au centre de la dépression, se trouve le massif du djebel Ichkel.

Du point de vue lithologique, on note la présence de plis de direction Nord-Est/Sud-Ouest qui affectent toute la Tunisie septentrionale. Des observations faites en amont (à la carrière des mines de plomb), révèlent une succession rapide de divers matériaux géologiques, calcaires dolomitiques et argiles gypseuses. Cette partie de la plaine de Mateur est bordée par des affleurements des formations triasiques, où les argiles gypseuses et les calcaires dolomitiques apparaissent sans ordre stratigraphique (MORI A. 1962). Concernant la stratification, les différents faciès que l'on rencontre sont du calcaire dur en bancs bien lités alternant avec des marnes.

Au Sud-Ouest du périmètre, on retrouve des pointements des formations triasiques. Les marnes observées, contenant souvent des sels solubles, sont d'une grande influence sur l'évolution pédogénétique des sols voisins.

La majeure partie de la plaine de Mateur, est formée de matériaux alluvionnaire du quaternaire récent, constitué essentiellement de limon et d'argile. Cet alluvionnement intense est principalement dû au nombre élevé d'oueds qui convergent et se déversent tous dans la plaine de Mateur.

1.2 : LOCALISATION GEOGRAPHIQUE :

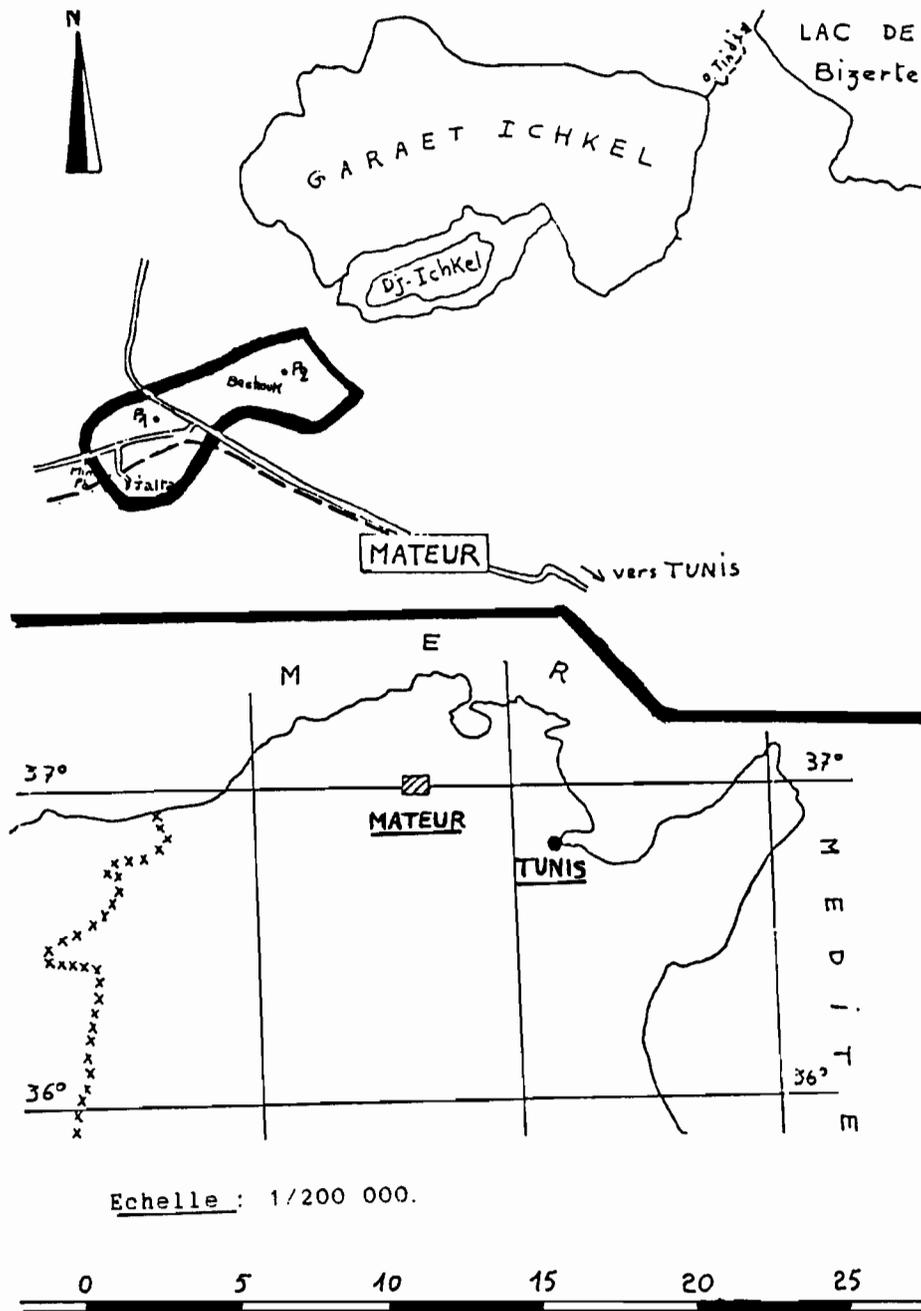
1.2.1 : Historique :

Depuis toujours, toute la région de Mateur était cultivée, et d'importantes superficies ont été consacrées à la céréaliculture (MIZOURI 1982).

1.2.2 : Le paysage et la topographie :

Le paysage est très peu éscarapé, avec de petites collines vers l'amont, situées au Sud-Ouest de la zone. Au Nord-Est, il y a le lac Ichkel avec le djebel, au Sud-Ouest il y a la carrière des mines de plomb en exploitation. C'est une plaine dominée par une zone montagneuse dans la partie la plus septentrionale de Tunisie. Le niveau du lac Ichkel est fonction du flux de l'oued Tindja, reliant le lac Ichkel à celui de Bizerte qui lui même est en relation avec la mer (figure n°1 ci-contre).

Figure n°1
 Situation géographique
 de la plaine de Mateur.
 (Périmètre étudié)



P1 = Profil du sol peu évolué d'apport à tendance verticale.
 P2 = Profil du sol salé carbonaté à hydromorphie de profondeur.

La zone d'étude se trouve pratiquement dans la plaine, avec une partie sur des versants à pentes très douces du côté du Sud-Ouest.

En ce qui concerne la topographie, les principales formes sont les glacis et la plaine proprement dite. Dans cette plaine le microrelief est important. Le lac Ichkel constitue le niveau de base à la plaine de Mateur. La pente assez faible des glacis (inférieure à 5 %) et la texture fine du sol, constituent un frein pour l'évacuation des eaux vers le lac Ichkel. Cela limite fortement leur infiltration en profondeur vers la nappe phréatique. D'où la présence de zones plus ou moins hydromorphes dans le secteur étudié. Les alluvions proviennent de l'érosion des formations marneuses qui sont très étendues en amont.

1.3 : HYDROGRAPHIE :

Deux oueds bordent le périmètre. Au Nord-Ouest il y a l'oued Guézini et au Sud-Est l'oued Rhézala. De nombreuses inondations ont lieu pendant l'hiver, dûe à la présence des deux oueds, mais aussi à la remontée de la nappe phréatique à faible profondeur. La remontée de cette nappe submerge une bonne partie de la plaine pendant trois à quatre mois dans l'année.

1.3.1 : Nappe aquifère :

La plaine de Mateur est alimentée par un important réseau d'oueds qui se déversent tous à proximité du lac Ichkel. Ils alimentent principalement la nappe qui est l'une des principales origines de la salure et de l'alcalinisation des sols de la plaine. Ce réseau d'oueds alimente aussi un certain nombre de nappes de bordure, lesquelles sont en relation étroite avec la nappe aquifère de la dépression (ENNABLI 1967).

Des observations faites sur le terrain à la sonde, montrent que la profondeur du plan d'eau de la nappe, décroît du Sud-Ouest vers le Nord-Est. Ces quelques mesures du niveau de la nappe, nous ont montré un maximum d'amplitude de 80 centimètres entre le mois de janvier et celui de février.

Cela est loin de refléter la réalité exacte du processus, car il aurait fallu étaler les mesures sur plusieurs mois. Toutefois, des mesures effectuées par ENNABLI en 1967 donnent une moyenne arithmétique du battement de la nappe qui est de l'ordre de 2,64 mètres. L'analyse des eaux de cette nappe, a montré qu'il y a des variations très importantes de leur composition chimique, qui est souvent chloruro-sulfatée et quelquefois sulfato-chlorurée (voir tableau n°1 en annexe T.1).

La salinité est de plus en plus accentuée quand on descend vers les parties basses du paysage (Garaet Ichkel). Dans cette zone, la conductivité électrique atteint quelquefois plus de 60 millimhos/centimètre. Quant au S.A.R. (Sodium Adsorption Ratio), on remarquera une tendance à la sodicité plus élevée vers le bas du secteur, à proximité du lac Ichkel.

1.3.2 Les oueds :

Les deux oueds encadrant la zone, joueraient un rôle d'exutoire des eaux excédentaires de pluies qui s'y déverseraient, par ruissellement sur les pentes des glacis. Ces eaux se deversant dans la plaine, créent parfois de vastes zones marécageuses sur les flancs des oueds. Sur l'oued Rhezala, un barrage a été construit en 1983, pour permettre une meilleure répartition des eaux, durant la campagne agricole.

L'analyse des eaux d'écoulement des oueds, montre qu'elles ne sont pas salées, contrairement aux eaux de la nappe. Les conductivités électriques exprimées en millimhos/centimètre à 25° C donnent les valeurs de 2,76 pour l'oued Guezini et 1,38 pour l'oued Rhezala.

Ces analyses d'eau pour les deux oueds sont groupées dans le tableau n°2 ci-dessous.

| OUEDS | CE mmhos/ cm | pH eau | Cations méq./l | | | | Anions méq./l | | | | | Cl/SO4 | SAR |
|---------|--------------------|-----------|----------------|------|------|------|---------------|------|------|-----|-----|--------|------|
| | | | Ca | Mg | Na | K | SO4 | Cl | CO3H | CO3 | NO3 | | |
| GUEZINI | 2,76 | 7,1 | 10,80 | 6,40 | 13,4 | 0,13 | 15,05 | 11,0 | 4,0 | 0 | 0 | 0,73 | 4,59 |
| RHEZALA | 1,38 | 7,9 | 6,25 | 3,75 | 4,3 | 0,04 | 5,90 | 3,85 | 4,0 | 0 | 0 | 0,65 | 1,92 |

Tableau n°2 : Tableau des résultats analytiques des eaux d'écoulement des oueds Guezini et Rhezala.

En se basant sur le rapport Cl/SO₄, on peut dire que les eaux des oueds sont sulfato-chlorurés. Les valeurs du S.A.R. (Sodium Adsorption Ratio) pour les deux oueds sont assez faibles, de 4,59 pour l'oued Guezini et de 1,92 pour l'oued Rhezala. La conductivité est insignifiante. Ces eaux d'oued recueillies par d'éventuels barrages, pourront être d'un grand apport pour l'irrigation de la plaine sans aucun préjudice pour les cultures.

1.3.3 Lac Ichkel :

Il communique avec le lac de Bizerte par l'oued Tindja. Cet oued, en saison pluvieuse alimente le lac de Bizerte par la vidange du lac Ichkel. En saison sèche, il recharge ce dernier par un courant inverse.

L'inondation pendant une partie de l'année de la plaine, s'effectue surtout par la remontée de la nappe qui est très salée, et cela contribue à l'aggravation de la salinisation des horizons superficiels, d'autant plus que le drainage est très déficient. Cette salinisation est aussi régulée par l'oued Tindja, comme l'avait observé ENNABLI en 1965-1966.

La vidange du lac Ichkel (du 9 décembre 1965 au 19 avril 1966) est liée au fait que l'alimentation en eau douce du lac est plus forte que l'évaporation. Par contre en période sèche, l'alimentation de ce lac par les oueds est stoppée, et la forte évaporation entraîne un abaissement du niveau du lac au dessous du niveau de la mer. Cela provoque l'inversion du courant de l'oued Tindja, et c'est le lac de Bizerte qui alimente cette fois celui d'Ichkel en eau salée.

Cet oued Tindja s'avère donc, d'une grande influence sur le régime hydrique et les ressources en eau de la plaine de Mateur et conditionne en grande partie sa salinité.

1.4 LE CLIMAT :

1.4.1 Caractéristiques :

La région de Mateur a un climat méditerranéen, avec un hiver doux et pluvieux et un été chaud et sec. Elle est située dans le sous-étage bioclimatique sub-humide inférieur à hiver doux (GOUNOT, LE HOVEROU 1955).

1.4.2 Précipitations :

Il tombe en moyenne chaque année 560 millimètres de pluie dans cette région. Les plus fortes pluies enregistrées se situent vers les mois de novembre et décembre.

Dans le tableau n°3, nous avons rassemblé les moyennes des précipitations sur 68 ans, ne donnant qu'une appréciation générale. C'est surtout la répartition des pluies pendant la campagne agricole qui doit attirer notre attention.

| Mois | S | O | N | D | J | F | M | A | M | J | Jt | A | Total |
|-------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Pluvio. mensuelle | 21,6 | 63 | 65,8 | 85,1 | 87,3 | 68,8 | 53,5 | 37,4 | 28,7 | 13,9 | 3,3 | 4,8 | 533,2 |
| Pluvio. cumulée | 21,6 | 84,6 | 150,4 | 235,5 | 322,2 | 391,6 | 455,5 | 482,5 | 511,2 | 525,1 | 528,4 | 533,2 | 533,2 |

Tableau n°3 : Moyennes des pluviosités sur 68 ans. Région de Mateur.

Le déficit hydrique est très important durant la période Juin-Juillet-Août, et cela soulève le problème de l'irrigation dans cette région. L'irrigation d'appoint se fait essentiellement par gravité. La construction d'un barrage sur l'oued Rhezala en 1983, permet de combler ce déficit.

1.4.3 La température :

La température atmosphérique moyenne annuelle est de l'ordre de 17,7° C. Elle est caractéristique du climat méditerranéen. Dans le tableau ci-dessous, nous avons les moyennes des températures enregistrées sur 68 ans. Nous remarquerons dans ce tableau, la température du mois de janvier (10,3) et celle du mois d'août (27,2), comme étant respectivement celle du mois le plus froid et du mois le plus chaud.

| Mois | S | O | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A |
|-------|------|------|-------|------|------|------|------|----|------|------|------|------|
| Q max | 30,4 | 25,2 | 20,5 | 16 | 14,9 | 16,5 | 17 | 21 | 24,9 | 29,6 | 34,4 | 34,9 |
| Q min | 17,6 | 13 | 9,8 | 7 | 5,8 | 5,5 | 6,4 | 9 | 12,1 | 15,9 | 18,5 | 19,6 |
| Q moy | 24 | 19,1 | 15,15 | 11,5 | 10,3 | 11 | 11,7 | 15 | 18,5 | 22,7 | 26,4 | 27,2 |

Tableau n°4 : Régime thermique sur 68 ans.

Le quotient d'EMBERGER donne la valeur suivante :

$$Q = 2000 \cdot P / M^2 - m^2 = 107,04$$

P = pluviosité moyenne annuelle (533,2 millimètres)

M = température moyenne du mois le plus chaud (372°K)

m = température moyenne du mois le plus froid (286,3°K)

D'après le diagramme ombrothermique de la région de Mateur (figure n°2), il y a une période de déficit hydrique assez importante. Cette période se situe entre mi-avril et début septembre.

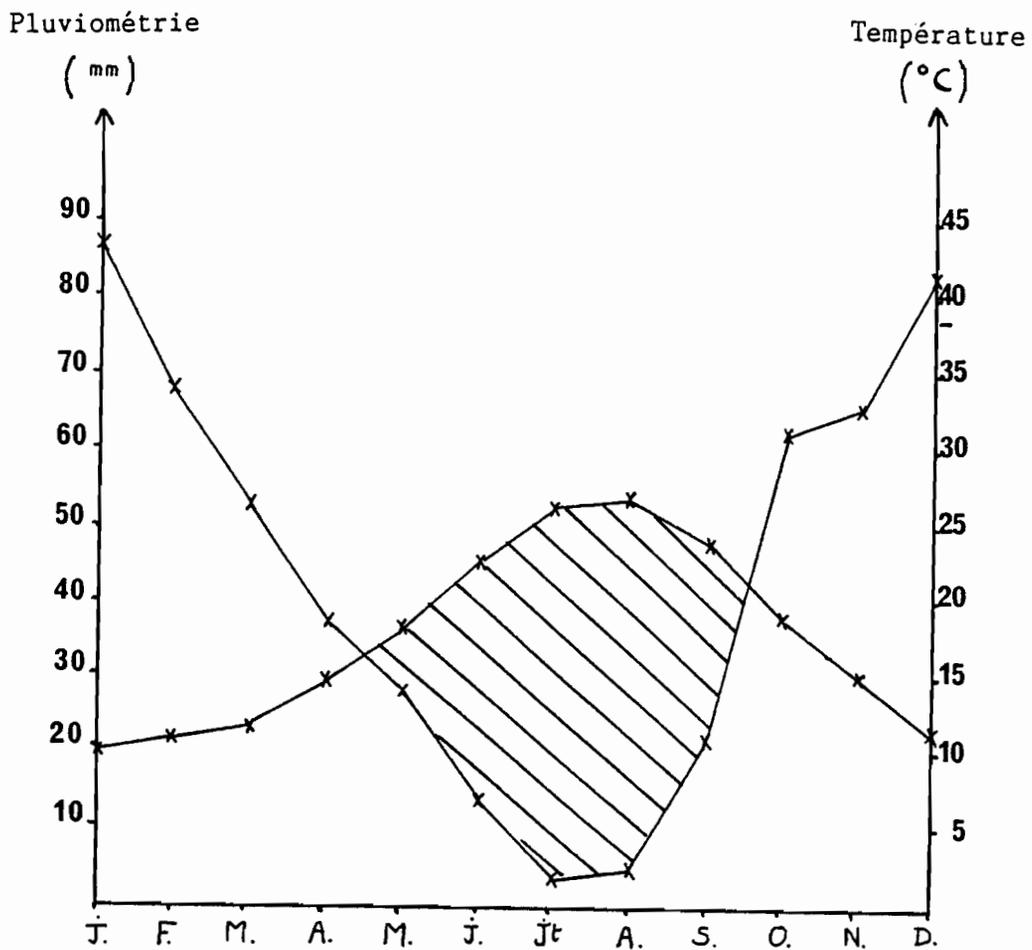


Figure n°2 : Diagramme ombrothermique de la région de Mateur.

1.4.4 Evapotranspiration potentielle :

Elle est très importante durant la période du mois de juin au mois d'août (MAALEJ 1983). Les réserves hydriques dans le sol s'épuisent très rapidement. Il est essentiel de connaître les besoins en eau des cultures pour calculer la dose et la fréquence des irrigations de complément qui sont nécessaires, vu le manque d'eau durant cette période sèche.

1.5 VEGETATION ET PAYSAGE AGRICOLE :

Dans toute la région de Mateur, presque toutes les terres sont utilisées intensivement par le secteur agricole. Le plus souvent c'est des rotations de cultures biennales, type céréale-fourrage qui sont pratiquées.

La betterave à sucre a pris une grande extension chez les agriculteurs à Mateur. Un projet d'exploitation de la betterave à sucre à grande échelle dans la région est en étude par les autorités Tunisiennes pour alimenter une sucrerie devant s'implanter entre Mateur et Bizerte.

En raison de la présence d'une nappe salée à faible profondeur, des techniques culturales de type ados et fossés sont souvent pratiquées. Dans la partie proche du lac Ichkel, il y a une bonne partie des terres non cultivées, à cause de la grande salinité et de nombreuses fentes de retrait en surface.

Le développement de la culture de la betterave à sucre, pose donc différents problèmes d'utilisation de ces sols. Pour cela, il semble utile de se pencher sur les exigences et tolérances de cette culture vis à vis du sol.

1.6 DEVELOPPEMENT DE LA CULTURE DE LA BETTERAVE A SUCRE :

1.6.1 Présentation :

C'est une plante qui appartient à la famille des chénopodiacées, du nom scientifique " BETA VULGARIS ". C'est une espèce à longue période de végétation. Parmi les grandes causes les plus susceptibles de porter préjudice à la betterave à sucre, on peut citer celles qui sont d'ordre pédoclimatiques et surtout les maladies cryptogamiques et ennemis des jeunes plantules.

Parmi les accidents pédologiques et climatiques, les plus graves sont les phénomènes de croûtage de la surface du sol et le manque d'eau. Une petite enquête effectuée auprès des agriculteurs de la

région de Mateur, nous a révélé que les principaux facteurs limitant la production de la betterave à sucre sont la gelée en période de germination et surtout une mauvaise répartition des pluies durant la saison. Selon eux, le facteur sol ne constituerait pour le moment qu'un préjudice secondaire comparé à celui causé par les deux facteurs cités plus haut, à savoir la gelée et le manque d'eau.

1.6.2 Exigences climatiques :

La richesse en saccharose de la betterave à sucre est proportionnelle à la température, l'éclairement et l'humidité.

- La température :

La betterave à sucre, aurait besoin d'environ 2400 à 2600° C entre le semis et la maturité. Au premier stade de son développement, la plante commence à souffrir à moins de 4° C. La germination de la betterave à sucre ne démarre qu'à une température de 10° C.

La température de juin-juillet est d'une grande influence sur les rendements. Celle de septembre agit sur la richesse en saccharose. Un déficit de chaleur en juin est difficilement compensé ultérieurement. Il existe une corrélation étroite entre le ralentissement du développement racinaire et le refroidissement du sol (CHRISTMAN J. 1981).

- L'éclairement :

C'est l'un des facteurs les plus importants pour le développement de la betterave à sucre, car il est capital pour la production des glucides qui donnent naissance aux sucres dans les feuilles et les racines. L'indice de surface foliaire (surface foliaire/surface du sol alloué à la plante), voisinant 1 en juin, s'élève à 4 ou 5 à la fin juillet ou début août, ensuite il diminue progressivement jusqu'à 3 à la mi-septembre. Cet indice est sous la dépendance de nombreux facteurs, tel que la température de l'air, l'humidité du sol, la nutrition minérale et l'état sanitaire.

- L'eau :

Les besoins en eau de la betterave à sucre sont considérables, car la plante évapore environ 400 à 450 litres d'eau pour élaborer seulement 1 kilogramme de matière sèche. Au moment de la levée en avril, le lit de germination doit être suffisamment humide (humidité optimale de 20 à 22 %).

Il faut signaler qu'un excès de précipitation est nuisible, car il retarde le semis, provoque des phénomènes d'asphyxie et de battance du sol. La croûte superficielle gêne la levée des jeunes plantules. Par contre en juillet-août, l'irrigation doit être abondante et atteindre 80 à 90 millimètres par mois pour obtenir le maximum de rendement en poids. A cette époque de l'année, le déficit hydrique est

très important, du fait de l'insuffisance des précipitations (pour ne pas dire l'absence) et de la forte évapotranspiration. Une irrigation d'appoint pendant cette période serait donc indispensable.

Des irrigations de complément ne procurent des augmentations sensibles de rendement que les années où le déficit climatique cumulé (E. T. P. -P) dépasse une année sur deux 150 millimètres sur 5 mois (180 millimètres dans le cas des sols assez profonds et 120 millimètres dans le cas des sols peu profonds), CHRISTMAN, 1981.

1.6.3 Exigences pédologiques :

- Exigence du sol :

Il faut des sols suffisamment profonds et homogènes pour permettre un développement racinaire dans les meilleures conditions et éviter des racines fourchues ou difformes. A cet égard, les sols de texture limoneuse et humifères conviennent parfaitement bien.

De bons résultats peuvent être également obtenus sur des terres argilo-siliceuses et argilo-calcaires peu caillouteuses. Les meilleurs rendements seraient obtenus dans des limons ayant un taux d'argile de 16 à 18 % (CHRISTMAN J. 1981).

Cependant, grâce aux divers progrès techniques (travail du sol, fumure, semis etc...), il est aujourd'hui possible d'obtenir des résultats remarquables sur des terres légères, relativement peu profondes, sous réserve d'un approvisionnement normal en eau.

De la nature du sous-sol et de sa perméabilité dépendent en grande partie le comportement de la plante et son rendement. La profondeur de sol exigée par la betterave à sucre est d'au moins cinquante centimètres.

La plaine de Mateur est constituée généralement de sols très profonds de texture fine, mais souvent trop lourds. Le plus grand problème intervient à l'occasion du travail du sol, par la formation de semelles de labour qui créent à la suite de la dessiccation un véritable rempart au développement racinaire. Cela diminue la profondeur utile prospectée par les racines. Cette semelle de labour oblige le pivot de la racine à changer de direction latéralement pour fuir l'obstacle. Les ressources en eau sont ainsi limitées par l'empêchement de la remontée capillaire par la semelle de labour.

- Exigences chimiques :

La betterave à sucre préfère de loin les pH légèrement alcalins de 7 à 7,5 mais s'accommode également des pH de 6,5 à 7. Ce qui permet sa culture en terre siliceuse et humifère. Une alcalinité trop élevée de 7,5 à 8 freine la minéralisation de l'azote, et peut provoquer par la suite le blocage, ou une carence en oligo-éléments notamment pour le Mn et le bore.

La betterave à sucre est une plante très exigeante en oligo-éléments, principalement le bore, qui est un élément essentiel, car il stimule l'absorption de l'azote, du phosphore et du sodium (CONESA 1973 cité par MAALEJ 1983). D'après les quelques analyses effectuées, il faudrait apporter à ces sols surtout des engrais azotés et potassiques.

*** Fumure azotée :**

Des essais fait par l'Institut International de la Potasse ont montrés que la dose de 120 kg/ha, a produit le rendement économique le plus favorable. L'excès ou l'insuffisance d'azote, peuvent avoir des conséquences importantes dans la culture de la betterave à sucre. Une trop forte dose d'azote augmente le rendement en racines, mais est préjudiciable à la teneur en sucre.

*** Fumure phosphatée :**

Il résulte d'un millier d'essais, fait par l'Institut International de la potasse, que 1 kg de P2O5 permet d'obtenir en moyenne un supplément de récolte de 51 kg de racines. De toute les plantes cultivées, c'est la betterave sucrière qui présente le coefficient d'utilisation de l'acide phosphorique le plus élevé (environ 25 %).

*** Fumure potassique :**

La betterave à sucre est particulièrement exigeante en potassium, dont la majeure partie se concentre dans le bouquet foliaire. Un kilogramme de K2O permet d'obtenir en moyenne un supplément de récolte de 29 kg de betterave. L'action de K2O est efficace tant sur le rendement en racine qui s'élève de 142 à 290 q/ha, que sur la richesse en saccharose qui passe de 17,2 % sur la parcelle NP à 18,2 % sur la parcelle NPK2.

1.6.4 Tolérance de la betterave à sucre à la salure :

La betterave à sucre tolère assez bien la salure. La croissance végétative n'est pas gênée par les fortes concentrations en sels, sauf à l'état de jeune plantule, où les racines sont plus sensibles. Cette résistance de la betterave à la salure se traduit par des effets indésirables sur les rendements et la qualité des racines.

Des essais effectués par CRUESI en 1970, montrent que :

- C'est au stade de jeunes plantules que la betterave se révèle sensible à la salure du sol.
- Après la levée, la plantule pourrait connaître une période critique par la salinité du sol, ralentissant sa croissance ou même détruisant complètement la plante.

La solution serait donc, de faire pousser les jeunes plantules dans des pépinières ayant des sols sains, et de procéder ensuite au repiquage dans ces terres relativement salées.

1.6.5 Irrigation :

Les modes d'irrigation par ruissellement ou aspersion sont comparables quant aux rendements obtenus dans l'un comme dans l'autre (MAALEJ 1983). Dans un secteur comme la plaine de Mateur, où il y a un manque d'eau considérable en été, le meilleur moyen est l'aspersion qui assure une économie d'eau très importante.

CHAPITRE n°2 :

LES SOLS

2.1 EMLACEMENT DE CES SOLS DANS LE PAYSAGE :

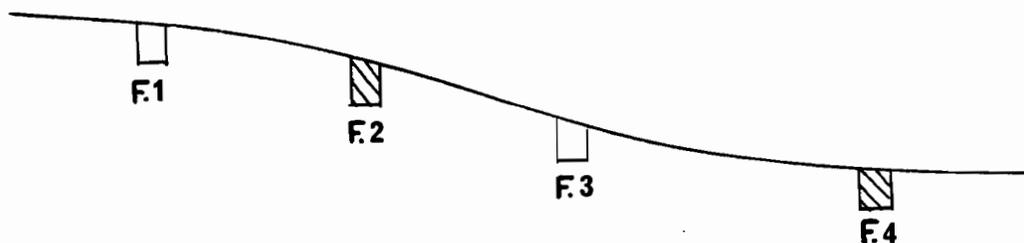


Figure n°3 : Situation des profils sur la toposéquence.

F.1- Sol calcimagnésique brun calcaire à nodules.

F.2- Sol peu évolué d'apport à tendance verticale.

F.3- Sol peu salé carbonaté à hydromorphie de profondeur.

F.4- Sol salé carbonaté à hydromorphie et parfois à alcali de profondeur.

Les descriptions morphologiques et les schémas des profils sont représentés en annexes n° F.1, F.2, F.3 et F.4.

Les deux types de sol qui intéressent notre étude, sont disposés sur une toposéquence de pente très faible entre 5 et 10 % environ. Ces sols reposent sur une roche mère dure carbonatée dans le cas des sols à l'amont, ou sur du calcaire marneux pour les sols de la plaine.

Le passage latéral entre les différents types de sol est assez complexe. Après le sol calcimagnésique, où l'on retrouve des horizons très carbonatés avec quelques horizons à 80 % de blocs de grés calcaires, on passe directement à des sols à tendance verticales, où l'on retrouve cette carbonatation uniquement en profondeur à partir de 100 centimètres. On peut penser que ces sols à tendance verticale ont été formés ultérieurement par des apports d'alluvions d'origines diverses à des époques différentes.

Pour les autres sols de la plaine, le passage entre les différents types de sol, est surtout fonction de la nature des différentes alluvions très fines et de la présence de la nappe salée à faible profondeur. C'est elle qui régule l'hydromorphie, la salinisation et dans certains cas l'alcalinisation de la plaine de Mateur. Plus on descend vers le lac Ichkel, plus ces processus s'aggravent et affectent les horizons de surface. Mais cette répartition de la salinisation de la plaine de Mateur est assez irrégulière à cause de la nature différente des matériaux alluvionnaires qui s'y sont déposés à des périodes différentes.

Du point de vue du drainage, ils ont tous une déficience plus ou moins prononcée, due en grande partie à leur texture très fine. Cette hydromorphie se présente sous forme de taches gris-verdatre en profondeur pour le sol salé carbonaté, et d'importantes concrétions ferro-manganiques dans le cas du sol à tendance verticale.

Pour le premier sol de la toposéquence (sol calcimagnésique), la roche mère est une roche dure carbonatée. Pour les trois autres sols, c'est du calcaire marneux. Les minéraux argileux présents dans les deux sols intéressants notre étude sont :

- Pour le sol peu évolué d'apport à tendance verticale, la fraction argileuse est à dominance de smectite et de chlorite, avec de l'illite dont une partie est plus ou moins interstratifiée avec les smectites. Présence d'un peu de kaolinite et de quartz.

- Pour le sol salé carbonaté à hydromorphie de profondeur, on observe une dominance de chlorite, de l'illite probablement interstratifiée avec un peu de smectite et un peu de kaolinite. On note la présence de calcite et de quartz.

En passant du sol à tendance verticale au sol peu salé carbonaté, la présence du caractère vertical (face de glissement) diminue progressivement, alors qu'apparaît la salinisation en profondeur à 150 centimètres. Cela est lié à la nappe qui inonde ces sols pendant une bonne partie de l'année. Le faciès géochimique de la nappe est chloruro-sulfaté.

2.2 LES SOLS ETUDIÉS :

Les deux types de sol recensés comme étant les plus représentatifs de la région présentent des problèmes assez sérieux pour leur mise en culture, (figure n°4).

2.2.1 Sol peu évolué d'apport à tendance verticale :

- * Localisation : Secteur nord de Jalta (figure n°1).
- * Situation géomorphologique : Plaine alluviale.
- * Culture en place : Orge.
- * Régime agricole : Assolement céréale-fourrage.
- * Régime hydrique : Type exoreïque avec drainage déficient.

(Voir description morphologique en annexe F.2).

- Caractéristiques :

C'est un sol profond mais peu différencié, présentant un horizon A1 assez épais (37 centimètres). Il est pauvre en matière organique. La couleur est brun foncée. La transition avec le deuxième horizon est assez progressive, avec l'apparition de plus en plus nette de faces de glissement dans le deuxième horizon. Dans le troisième horizon, on observe des traces d'hydromorphie (concrétions ferro-manganiques). A noter la présence de nodules calcaires. Le drainage est insuffisant, et on pratique dans ce secteur systématiquement la culture en ados.

Figure n°4
 Représentation des sols étudiés
 dans la plaine de Mateur (*).



LEGENDE : (**)

-  Sol hydromorphe à caractères de salinisation et d'alcalinisation.
-  Sol peu évolué non climatique d'apports alluviaux peu drainant.

(*) : Cette esquisse est inspirée de la synthèse des travaux de A. MORI 1963 et A. FOURNET 1963.

(**) : Les deux sols concernant notre étude s'intègrent dans les deux catégories de sols figurants dans cette esquisse.

- Propriétés physiques :

Le matériau est constitué d'alluvions argileuses apportées de l'amont, qui s'accumulent dans la dépression. Le drainage très modéré, atténue l'effet brutal des variations saisonnières d'humectation-déssiccation. Les mouvements vertiques contribuent à l'homogénéisation du profil sur les deux premiers horizons. Des observations faites sur quelques profils culturaux, ont mis en évidence certaines contraintes physiques, notamment d'ordre structural, travail du sol ou déficit hydrique qu'il convient d'examiner en détail.

a) Structure :

Observée en saison sèche, elle apparaît depuis la surface avec d'assez larges fentes de retrait de 1 à 3 centimètres. En profondeur, on peut délimiter de larges structures formées par les faces latérales provoquées par les mouvements vertiques. Suite au phénomène de dessiccation brutale, on se trouve devant une structure très grossière, avec de gros polyèdres très compacts devenant des obstacles au développement racinaire.

Les fentes de retrait causent de gros problèmes pour l'enracinement des plantes, car elles provoquent la rupture des radicelles absorbantes et dénudent quelquefois complètement les racines.

b) Travail du sol :

Ajouté à ces problèmes très défavorables de fissuration, il y a le choix de l'époque de travail du sol. C'est un problème délicat de choisir cette période, car il faut que l'humidité soit suffisante pour assurer un bon émiettement du sol (structure grumosolique), mais pas trop forte pour éviter les problèmes de lissage. IL faut de toute façon éviter les périodes trop humides ou trop sèches.

En période trop humides, le labour laisse de grosses mottes, lesquelles en se desséchant, deviennent des blocs de "pierres" infranchissables aux racines, ce qui gênent considérablement leur développement. A cela il faut ajouter les semelles de labours qui ne manquent pas de se créer et qui sont autant d'obstacles supplémentaires pour le développement des racines.

Il faut veiller aussi à travailler le sol avec un minimum d'humidité, car si on le fait dans des conditions trop sèche, les engins lourds pulvérisent les mottes trop sèches en poussière, et détruisent considérablement la structure du sol. On se retrouve avec énormément de terre fine, laquelle aux premières pluies, entraîne un phénomène de battance et de prise en masse, qui générerait fortement la levée de semis.

c) Régime hydrique :

Le déficit hydrique se manifeste généralement à partir du mois d'avril. Dans ce type de sol, le problème c'est qu'en hiver il y a trop d'eau (difficulté d'évacuation des eaux excédentaires à cause du mauvais drainage), en été il n'y en a pas assez (forte évapotranspiration). De plus le point de flétrissement est relativement élevé dans ce sol, ce qui donne d'assez faible réserve en eau utilisable par la plante.

Des prélèvements au cylindre d'échantillons non perturbés, à des profondeurs différentes nous ont permis de calculer la réserve utile du sol.

Ces prélèvements ont été effectués en trois profondeurs :

- À 10 centimètres de profondeur.
- À 40 centimètres de profondeur.
- À 80 centimètres de profondeur.

Les mesures de la densité apparente (d.a.), de l'humidité massique à pF:4,2 et pF:2,8 nous ont permis d'estimer la réserve utile (R.U.) en millimètre à ces différentes profondeurs.

| Profondeur | d. a. | pF: 2, 8 | pF: 4, 2 | R. U. (en mm) |
|------------|-------|----------|----------|----------------|
| 10 cm | 1,54 | 22,2 | 17,7 | 6,93 |
| 40 cm | 1,61 | 27,3 | 23,7 | 17,38 |
| 80 cm | 1,47 | 20,7 | 16,1 | 27,04 |

Cette réserve utile est exprimée en millimètre d'eau, selon la formule suivante :

$$H_{mm} = H \times d. a. \times Z_{mm}$$

H = Différence d'humidité massique entre pF:2,8 et pF:4,2.

d.a. = Densité apparente du sol (méthode du cylindre).

Z_{mm} = Epaisseur du sol en millimètre.

On remarquera que la réserve utile est très faible en surface, du fait que le point de flétrissement très élevé, n'est pas éloigné du point de l'humidité équivalente à la capacité de rétention au champs. Cela est lié à la nature des argiles. L'irrigation d'appoint doit se faire le plus souvent possible et par petites doses, afin d'éviter la saturation et de dépasser la limite de liquidité du sol.

D'après MAALEJ 1983, les modes d'irrigation par ruissellement ou par aspersion sont comparables. Mais dans le cas de la plaine de Mateur, il faut tenir compte de la durée d'utilisation de la réserve utile dans le sol en fonction de l'évapotranspiration et de la fréquence de l'irrigation. Comme le manque d'eau se fait sentir de plus en plus au cours de la culture, le moyen le plus approprié paraît être l'aspersion qui assure une importante économie d'eau, tout en augmentant la régularité et un séjour durable de l'eau dans le sol par des aspersions très fréquentes. Seulement le système d'irrigation nécessite d'importants frais d'installation et d'entretien.

Des essais de perméabilité (méthode Müntz), effectués par MIZOURI en 1982, montrent que pour les sols lourds de la dépression de la plaine de Mateur (60 % d'argile), la perméabilité (K) est de l'ordre de $4,7 \cdot 10^{-6}$ m/s, ce qui est très faible. Il est donc indispensable d'assurer des irrigations très fréquentes et rationnées pour éviter de trop forte perte par évaporation.

- Propriétés chimiques :

Les prélèvements sont faits dans le premier horizon du profil. Les résultats analytiques sont représentés dans le tableau n°6 en annexe T. 3.

Pour ce qui est de la matière organique, ce sol est moyennement pourvu, car on note un pourcentage de carbone de 1,3 % pour le premier horizon avec une teneur en azote de 0,1 % donc un rapport C/N de 13. La coloration foncée de ce sol est liée surtout au fait que la matière organique est très évoluée, car les acides humiques gris représentent plus de 60 % des acides humiques totaux. Pour le deuxième horizon, le carbone total descend à 0,7 % et l'azote à 0,08 % donc un rapport C/N de 8,75. On remarque donc la dominance des composés humiques fortement condensés et stabilisés.

D'après les extractions des matières humiques (méthode de Bondy, O. R. S. T. O. M.), dont le détail se trouve en annexe F. 5, les fractions des acides fulviques sont très faibles. Par contre une grande partie de la matière organique se retrouve dans la fraction de l'humine.

Pour le complexe absorbant (résultats analytiques en annexe T. 20), on note que ce sol est riche en calcium et magnésium, et que la capacité d'échange cationique est de 26 méq/100 grs. La somme des bases échangeables est de 21 méq/100 grs.

Les relations entre le pH et la valeur du rapport S/T (taux de saturation du complexe), sont dépendantes de l'origine des ions H⁺ et de l'intensité de leur liaison avec les colloïdes. Dans notre cas, le pH(eau) est de 7,0 pour le premier horizon, le pH(KCl) est peu inférieur et il n'y a pas d'aluminium échangeable. Les autres cations échangeables, calcium, magnésium, sodium et potassium sont liés aux charges du complexe absorbant.

-Contraintes physiques et chimiques :

Les contraintes physiques sont assez nombreuses dans ce sol, et sont essentiellement liées à la topographie (sols de dépression), la texture et la nature des argiles. La forme en cuvette limite fortement le drainage local, ce qui engendre à long terme l'installation d'une hydromorphie temporaire, s'aggravant de plus en plus. Ce colmatage limite l'infiltration et provoque l'évaporation des flaques d'eau libres qui séjournent sur le sol après les pluies.

Les contraintes chimiques ne sont pas aussi défavorables que les contraintes physiques, si ce n'est la moyenne teneur en matière organique (bien qu'elle soit très évoluée avec un fort pourcentage d'acides humiques gris et un bon rapport C/N de 11). Le complexe absorbant est presque saturé essentiellement par des cations bivalents.

Pour ce qui concerne le pH le flux de CO₂ d'origine biologique contribue à le modifier considérablement, surtout dans le sol salé carbonaté. Le CO₂ interfère avec les cations bivalents du sol pour modifier le pH. Le calcium et le magnésium freinent l'élévation du pH par élimination de HCO₃⁻. Les cations monovalents potassium et sodium élève le pH, car leur carbonates et bicarbonates restent en solution et donnent des Hydroxydes par hydrolyse (DUCHAUFOR Ph. 1977).

- Aptitude culturales :

Ce type de sol est peu différencié mais profond. Le problème est de savoir si l'on peut améliorer durablement par des amendements organiques, d'une part le niveau de richesse en humus de ce sol qui n'est pas très élevé (1,3 % de carbone organique), d'autre part la perméabilité et la stabilité des agrégats. D'après les résultats, que nous commenterons plus loin dans le chapitre n°5, le niveau du stock en matière organique stabilisée se trouve nettement amélioré. Car avec les échantillons enrichis à 3 % de paille, le stock reste stable entre le troisième et le neuvième mois, ceci à un niveau assez élevé (augmentation d'environ 35 % de matière organique stable par rapport au témoin).

Concernant la stabilité structurale, celle-ci est nettement améliorée temporairement au début de l'expérimentation, mais on note que selon la dose de paille apportée, le taux d'agrégats stables augmente sensiblement et durablement. Pour que l'amélioration soit encore plus grande, il faudrait entretenir une bonne activité microbienne par des apports de substances organiques facilement biodégradables pour éviter que les bactéries s'attaquent aux produits responsables de l'agrégation (mucus et filaments mycéliens). Quoi qu'il en soit, l'amélioration du drainage interne dans ce sol ne suffit pas, il faudrait installer un système de drainage efficace, pour évacuer les eaux excédentaires en hiver.

2.2.2 Sol salé carbonaté :

- * Localisation : Secteur est de la ferme de Bechouk (figure n°1).
- * Situation géomorphologique : Plaine alluviale.
- * Culture en place : Fourrage.
- * Régime agricole : Assolement céréale-fourrage.
- * Régime hydrique : Type endoreïque.

(Description morphologique et profil en annexe F.4).

- Caractéristiques :

C'est un sol difficile à travailler, du fait de sa texture fine avec une dominance d'argiles de type 2:1. C'est un sol très carbonaté (avec 28 % de CaCO₃ total). Son profil est marqué par la superposition des processus d'hydromorphie, de salinisation et même parfois d'alcalinisation en profondeur. Le passage latéral en aval montre une augmentation de la salinité. Le problème de l'hydromorphie se manifeste à cause d'un drainage externe et interne insuffisant, spécialement en profondeur.

- Propriétés physiques :

Ce sol étant constitué également d'un fort pourcentage d'argile, il se forme de larges fentes de retrait pendant la dessiccation. Il faut éviter le travail du sol lorsqu'il est trop humide ou trop sec. Des observations faites sur quelques profils culturaux, montrent certaines contraintes physiques, en particulier l'existence d'une structure massive, la fréquence des semelles de labours et de nombreuses fentes de retrait sur toute la surface du sol.

En hiver, il a été observé que la nappe remontait assez près de la surface à environ 40 ou 50 centimètres, et que ce niveau reste constant pendant presque 3 mois. Nous avons calculé la réserve utile nous permettant d'évaluer la capacité de stockage de l'eau utilisable par la plante dans le sol.

Pour cela nous avons fait des mesures de densité apparente et des mesures d'humidité massique aux pF:4,2 et pF:2,8 et cela nous a permis de constater que la réserve utile (R.U.) de ces sols n'est pas très importante car le point de flétrissement est élevé.

Ces mesures sont effectuées sur trois profondeurs :

- A 10 centimètres de profondeur.
- A 40 centimètres de profondeur.
- A 80 centimètres de profondeur.

| Profondeur | d. a. | pF: 2, 8 | pF: 4, 2 | R. U. (en mm) |
|------------|-------|----------|----------|----------------|
| 10 cm | 1, 42 | 25, 1 | 21, 7 | 4, 82 |
| 40 cm | 1, 50 | 28, 9 | 24, 5 | 19, 80 |
| 80 cm | 1, 38 | 29, 3 | 25, 9 | 18, 76 |

$$H \text{ mm} = H_x \text{ d. a. } \times Z \text{ mm}$$

H = Différence d'humidité massique entre pF: 2, 8 et pF: 4, 2.

d. a. = Densité apparente du sol (méthode du cylindre).

Z mm = Epaisseur du sol en millimètre.

Il ressort de ces résultats que la réserve utile est très faible en surface, ceci est causé par la texture moins lourde en surface. Il faut donc maintenir l'humidité du sol à un niveau assez élevé par des irrigations fréquentes mais en quantités limitées.

- Propriétés chimiques :

Ce sol est plus humifère que le sol à tendance vertique. Le taux de carbone est de 1,7 % et celui de l'azote de 0,2 %, d'où un rapport C/N de 8,5). La matière organique est également très évoluée, car l'électrophorèse sur papier donne une majorité d'acides humiques gris (plus de 60 %). Pour le deuxième horizon, le carbone diminue lentement avec la profondeur (de 1,7 % à 1,2 %). Les résultats analytiques sont dans le tableau n°8 en annexe T.5. Ce sol contient plus de 25 % de carbonate de calcium.

Dans le complexe absorbant, le calcium échangeable diminue fortement avec la profondeur, alors que le sodium augmente. On note aussi que le pH(H₂O) augmente avec la profondeur, pour atteindre 8,7 dans l'horizon inférieur.

La capacité d'échange de 34,6 méq/100 grs, est plus élevée que dans le sol précédent. Le complexe est saturé. D'après les caractéristiques de la saturation par Na du complexe absorbant et l'augmentation du pH avec la profondeur, on peut dire que nous avons à faire à un sol salé avec une alcalinisation progressive qui s'installe en profondeur.

$$\text{Na/T} > 15, \quad \text{C. E} > 4, \quad \text{pH} > 8,5$$

Na/T = Sodium échangeable/ capacité d'échange.

C. E. = Conductivité électrique (patte saturée).

- Contraintes physiques et chimiques :

Les problèmes physiques, en général, sont les mêmes que dans le sol précédent, à savoir un drainage insuffisant, une mauvaise aération et une installation d'une hydromorphie en profondeur. Le travail de ces sols doit se faire en période moyennement humide (Avril-Mai), sinon il y a risque de création de semelles de labour par tassement et lissage.

Par contre pour les contraintes chimiques, ce sol est beaucoup plus touché que le précédent, car bien qu'il soit plus riche en matière organique, il est affecté par la salinité et un début d'alcalinisation en profondeur. Le complexe absorbant est très riche en calcium un peu moins en magnésium. Pour les horizons de profondeur, la teneur en sodium est très importante.

Dans la solution du sol, on trouve beaucoup de calcium et de magnésium, mais surtout du sodium. Pour ce qui concerne les anions, c'est surtout les chlorures et un peu moins les sulfates qui prédominent (tableau en annexe T.6).

- Aptitudes culturales :

Ils sont difficiles à cultiver à cause de la salinité et de l'alcalinisation. Ces sols sont en plus submergés pendant une bonne partie de l'année. Le problème à résoudre en priorité est le mauvais drainage, ceci par l'amélioration de la structure et de l'aération du sol par des amendements organiques. Essayer ensuite d'évacuer les excès de sodium, par des irrigations avec des eaux douces ou légèrement saumâtres. Là aussi des apports de gypse seraient bénéfiques dans le sens où cela permettra d'éviter une alcalinisation plus poussée du profil.

2.3 CONCLUSION :

Pour notre étude, nous avons choisi deux types de sol très représentatifs de la région, dont la mise en culture se heurte à différentes contraintes physiques, chimiques et topographiques.

Pour le sol à tendance vertique, c'est surtout du côté physique qu'il est nécessaire de l'améliorer, notamment le drainage et l'aération. Des amendements organiques peuvent être utiles pour obtenir ces améliorations. Mais ils demandent aussi des irrigations d'appoints assez fréquentes pour limiter au maximum la dessiccation importante provoquant de larges fentes de retrait, et assurer l'alimentation hydrique de la betterave à sucre.

Le sol salé carbonaté présente les mêmes problèmes physiques de drainage et d'aération, mais en plus une salinisation et un début d'alcalinisation en profondeur. Celle-ci entraîne également des propriétés physiques moins favorables, non seulement en surface mais surtout en profondeur.

Les questions qui se posent sont : Est-il possible d'améliorer les propriétés physiques par des amendements organiques? Est-ce que l'apport de gypse peut limiter l'alcalinisation et également améliorer la structure et la perméabilité du sol salé carbonaté? C'est à ces questions que nous nous efforcerons de répondre, par la présentation des différents résultats expérimentaux qui vont suivre.

CHAPITRE n°3

**INFLUENCE DES CONSTITUANTS DU SOL
SUR LA STABILITE STRUCTURALE**

3.1 GENERALITES :

Il est établi depuis longtemps par de nombreux chercheurs, que la matière organique joue un rôle important dans l'amélioration de la stabilité structurale des sols. De même que l'action bénéfique du gypse sur les propriétés physiques des sols salés.

Le rôle de la matière organique dans l'amélioration de la structure est très varié selon la nature et le degré d'évolution de celle-ci. Chaque fraction de la matière organique agit différemment sur la structure dans le sens positif ou négatif.

Dans les sols à dominance d'argiles de type montmorillonite (ex. du vertisol), la stabilité des complexes argilo-humiques est établie surtout par le rôle du fer, cation de coordination, amplifiée par la maturation des composés humiques (acides humiques gris) fortement condensés (BONNEAU et SOUCHIER 1979).

Il semblerait que la majeure partie de la stabilité structurale est essentiellement due à la présence des polysaccharides (BACHELIER G. 1966). Le rôle favorable de la matière organique totale du sol sur la stabilité structurale est un fait bien établi, mais il est évident que ce n'est que certaines des formes plus ou moins décomposées de cette matière organique qui sont les principaux agents stabilisateurs.

Des observations de COMBEAU et QUANTIN en 1964, révèlent une corrélation très étroite entre l'indice d'instabilité structurale (Is) et la teneur en matière non humifiée du sol. Alors que la corrélation entre le carbone total et l'indice Is est beaucoup moins significative.

La formation des agrégats dans le sol dépend en premier lieu de la granulométrie, la nature des argiles et de la saturation du complexe colloïdal. Mais leur disposition structurale et leur stabilité dépendent surtout de la vie dans le sol et de la teneur en hydrate de carbone, en particulier les polysaccharides issus des germes et mucus microbiens et des exsudats racinaires.

D'après les travaux de COMBEAU et QUANTIN, il ressort que la fraction agrégée stable à l'eau, est elle-même étroitement liée au taux d'humification, et qu'elle diminue lorsque ce taux s'élève. Cela démontre donc le fait que la stabilité décroît lorsque le taux d'humification augmente.

Des études concernant la relation qui existe entre Is d'une part, et la fraction non humifiée d'autre part, montrent que Is diminue lorsque le taux de la fraction non humifiée augmente, mais également lorsque celui de la fraction humifiée diminue. Cela voudrait dire que les effets contraires des deux fractions de la matière organique s'annuleraient quand le sol aurait atteint un taux d'humification maximum.

3.2 INFLUENCE DES MATIERES ORGANIQUES :

Chaque fraction de la matière organique agit différemment sur les propriétés physiques du sol en général, et sur l'agrégation en particulier. Comme les acides humiques par exemple, qui agissent dans le sens de l'amélioration de l'agrégation, mais très lentement, car c'est une fraction très stable et assez évoluée. Ce sont surtout les acides humiques gris qui ont une influence la plus efficace.

L'évolution de la matière organique dépend surtout du pédoclimat. Les constituants minéraux du sol n'ont qu'un rôle secondaire. Les alternances d'humectation-dessiccation stimulent la biodégradation et la minéralisation (TURENNE 1975). Cet auteur a constaté que les périodes de dessiccation étaient polymérisantes et provoquent le passage des acides fulviques en acides humiques. Les périodes d'humectation seraient dépolymérisante, avec l'apparition de polymères plus ou moins solubles, de poids moléculaires de l'ordre de 3000.

Les acides fulviques et humiques des vertisols en climat contrasté, sont inertes et résistent aux variations du pédoclimat. Un pédoclimat contrasté favorise la conservation et la polymérisation des composés humiques (DUCHAUFOR Ph. 1977). Il y a donc deux catégories importantes de constituants agrégatifs organiques. Ce sont les substances humiques et les polysaccharides.

Des travaux de WALLACE et All. en 1986 ont montrés que les polymères anioniques (acides fulviques, acides uroniques ...), augmentent la floculation du sol dans les sols carbonatés. Dans le cas des sols acides, c'est plutôt l'inverse qui se produit, ce serait les polymères cationiques qui agiraient le plus. Cette action des polyanions, dans le cas des sols carbonatés serait plus forte avec la présence des polysaccharides.

3.2.1 Les substances humiques :

Dans les substances humiques, nous inclurons les complexes argilo-humiques et les substances humiques elles mêmes (acides fulviques, acides humiques et l'humine). Ces substances jouent un rôle actif dans le processus d'agrégation. L'efficacité de ces substances dans leur processus agrégatif dépend bien entendu de l'importance relative des fractions, mais aussi de la composition de chacune de ces fractions qui varie énormément d'un sol à l'autre.

Le complexe argilo-humique joue un rôle important dans la genèse de la structure du sol. La formation de ces complexes s'explique par la théorie de l'adsorption polaire. Les substances humiques sont polaires et ont une extrémité des molécules positive, par laquelle elles se fixent facilement sur les particules d'argiles qui sont électro-négatives. L'adsorption polaire se traduit par la constitution autour des colloïdes argileux d'une enveloppe de colloïdes humiques (DOMMERGUES Y. et MANGENOT F. 1970).

Le mécanisme de l'agrégation par ces substances humiques peut s'expliquer par deux phénomènes agissant en même temps. Le premier est l'accroissement de la cohésion et le deuxième est la réduction de la mouillabilité. L'accroissement de la cohésion est lié à la présence des polysaccharides dans les différentes fractions humiques. En réduisant la mouillabilité les substances humiques stabilisent la structure.

Certains auteurs estiment que ce sont plutôt les polysaccharides et substances pré-humiques qui cimentent les particules élémentaires entre elles, alors que l'humus lui même ne possède pas cette faculté (COMBEAU 1965). Mais ces substances humiques (polysaccharides, substances pré-humiques et substances humiques), varient énormément d'un sol à l'autre, et il est difficile de faire des comparaisons.

Ce qui est sûr, c'est que les substances humiques comparées aux polysaccharides microbiens, sont beaucoup moins efficaces, en raison de leur structure isométrique, mais ont un effet plus prolongé en raison de leur plus grande résistance à la biodégradation.

3.2.2. Les polysaccharides :

- Généralités :

Ils sont dans le sol sous forme de complexes de polymères hétérogène, provenant directement ou indirectement du métabolisme microbien (gommés microbiennes ou sous-produits).

Les récoltes en polysaccharides enregistrées par divers auteurs avec des méthodes d'extractions différentes, varient entre 3 et 12 % de la matière organique totale. Il est bien évident que selon la méthode d'extraction, la quantité varie, car on n'extrait pas tous les polysaccharides. Le maximum pouvant y être atteint par plusieurs extractions successives est de 85 % des polysaccharides contenus dans le sol. Par certaines méthodes on n'extrait que 60 à 70 % des polysaccharides. STEVENSON a pu enregistrer des récoltes de polysaccharides variant entre 3,5 et 11,5 % de la matière organique totale.

D'après DOMMERMES Y. et MANGENOT F. 1970, l'ensemble des sucres solubles dépasse rarement 2 % du carbone organique total du sol. Les podzols en sont les plus riches avec 250 ppm environ, contre 23 ou plus dans un sol à gley. La dessiccation modifie leur concentration, le gel l'accroît et l'incubation au laboratoire réduit la teneur en oligosides et fait apparaître de grande quantité de glucose.

Il y a aussi l'action des gommés microbiennes qui sont des substances extracellulaires produites par les microorganismes. Dans certains cas, ces substances forment une enveloppe autour de la cellule microbienne, on parle d'encapsulation. Ces gommés renferment

des quantités importantes de polysaccharides simples (dextranes, levanes), ou complexes (glucose, fructose, pentose...) et d'acides uroniques (produits d'oxydation des oses).

Dans le sol, la synthèse des polysaccharides a lieu à partir des substances simples ou complexes (résidus végétaux par exemple). Sous l'action de la dégradation microbienne, les polysaccharides des tissus végétaux sont libérés, ce sont des polysaccharides résiduels, sous - produits de l'activité microbienne.

- Mécanisme de l'agrégation par les polysaccharides :

Leur action se ferait essentiellement par l'augmentation de la cohésion des agrégats et par diminution sensible de la mouillabilité (MONNIER, 1965).

Certains estiment que cette faculté agrégative des polysaccharides est liée à la présence dans les molécules des polysaccharides de groupements carboxyles ($-COOH$). D'autre pensent que c'est essentiellement le rôle des liaisons hydrogènes entre groupements hydroxyles ($-OH$) et les ions oxygènes à la surface des silicates. D'autre parlent de la liaison calcium qui s'établirait entre certains polysaccharides et les micro-particules d'argiles.

La plupart des polysaccharides microbiens sont vite dégradés par certains microorganismes, de sorte que le taux d'agrégation élevé obtenu par incorporation des polysaccharides diminue très vite (MONNIER 1965).

Il semblerait que les polysaccharides, quelque soit l'origine, se trouvent fortement adsorbés par les argiles de type kaolinite et montmorillonite (PARFITT et GREENLAND 1970). Cette adsorption se fait sur deux sites, les surfaces et les espaces inter-lamellaires. Avec la kaolinite l'adsorption se fait seulement sur les surfaces, mais avec la montmorillonite, les polysaccharides sont aussi adsorbés dans les espaces inter-lamellaires. De plus en plus de polysaccharides peuvent être adsorbés par les argiles qui possèdent à l'intérieur des sites d'adsorption.

Les substances lipidiques synthétisées par les microorganismes accroîtraient la stabilité structurale. Le mécanisme se fait non pas par le renforcement de la cohésion des agrégats comme le font les polysaccharides, mais par la diminution de leur mouillabilité. Le rôle stabilisant des substances lipidiques, n'est pas aussi important que celui des polysaccharides et des substances humiques, mais il peut s'ajouter.

En dehors de ces actions des produits de métabolisme microbiens, il y a bien entendu celui de l'agrégation directe par les organismes microbiens. Ce sont surtout les champignons filamenteux qui régissent ce type d'agrégation. Ils interviennent par un enchevêtrement mécanique des particules élémentaires par des filaments mycéliens qui enrobent l'agrégat dans un réseau filamenteux lui permettant de

résister à la dégradation (MONNIER 1965). Ce mécanisme agit donc par une augmentation de la cohésion des agrégats. Les bactéries quant à elles, agissent par leur capsules ou par leur sécrétions gommeuses.

3.3 ACTION DES COLLOIDES MINÉRAUX :

La dispersion des colloïdes est liée à la fixation des ions alcalins, plus particulièrement du sodium. Par contre les colloïdes ne se dispersent pas s'ils fixent les alcalino-terreux. Les acides humiques ont les caractéristiques d'un colloïde à charge négative, qui peuvent s'adsorber fortement sur l'argile pour former un complexe argilo-humique stable.

Quand le milieu est floculé par les sels de certains cations (Ca, H), les colloïdes humiques s'opposent à la dispersion du complexe (HENIN et TURC 1957). Quand le complexe est desséché (feu de brousse, saison sèche), les colloïdes humiques communiquent au complexe leur caractère hydrophobe. La matière organique enduit la surface des mottes qu'elle protège et stabilise. C'est plus la répartition que la proportion de ces matières humiques fixées dans le sol qui conditionnera la stabilité structurale.

Il semblerait que l'eau est seulement retenue qu'en certains points privilégiés qui doivent correspondre à la position d'atomes ou de groupes d'atomes dans le réseau cristallin de l'argile. Lors de la dessiccation, ces points peuvent s'accrocher les uns aux autres et assembler les micelles.

3.4 INFLUENCE DES CATIONS :

Ils s'agit tout d'abord de distinguer les cations liés aux colloïdes et ceux de la solution du sol.

3.4.1 Les cations liés aux colloïdes :

En ce qui concerne les cations à valence élevée et peu hydratés comme le calcium, le magnésium, le fer et l'aluminium, ils favorisent la formation d'une structure stable, car ils sont fortement liés aux colloïdes et provoquent leur floculation en annulant leur charges négatives (DUCHAUFOUR 1979).

Ces cations assurent aussi la liaison entre les colloïdes humiques et l'argiles. La stabilisation des complexes argilo-humiques par les cations, notamment le calcium, lequel en abondance dans les sols carbonatés, assure une bonne structure. De plus d'après MONNIER (1965), la matière organique associée aux cations Fe^{3+} et Al^{3+} ,

diminue encore plus la mouillabilité des unités structurales, donc provoque une augmentation de leur stabilité.

Les cations n'agissent pas uniquement sur la mouillabilité, mais aussi sur la cohésion. Car la perte de cohésion due au gonflement par l'eau est de plus en plus importante pour les cations dans l'ordre croissant suivant : Calcium, Magnésium, Potassium, Sodium.

3.4.2 Cations de la solution du sol :

Les cations des sels dissous ainsi que H^+ , favorisent la floculation des colloïdes électronégatifs en repoussant les cations adsorbés, ce qui annule leur charges négatives.

L'augmentation de la concentration en sels de la solution diminue le gonflement des colloïdes, et évite une forte augmentation du pH de la solution du sol, donc améliore la stabilité structurale. Ainsi les sols salés ont-ils une structure moins défavorable que les sols à complexe absorbant dominé par l'ion sodium et à solution faiblement concentrée en sels (sols alcalins).

Les cations agissent dans le sens où ils augmentent l'affinité du sol pour l'eau. Cet effet est plus marqué que leur poids atomiques et leurs valences sont plus faibles (DUCHAUFOR, 1979). Une faible quantité de Na est suffisante pour produire une augmentation marquée de la dispersion en modifiant l'affinité pour l'eau et provoquant la destruction par éclatement. Par contre il est nécessaire d'apporter une forte quantité de calcium pour avoir l'effet inverse.

CHAPITRE n°4 :

**PROTOCOLE ET CHOIX DES
METHODES EXPERIMENTALES.**

4.1 LES SOLS ETUDIÉS :

Ces deux sols choisis représentent à eux seuls presque les deux tiers de la zone étudiée. D'après les travaux de cartographie dans la plaine de Mateur de FOURNET 1963 et MORI 1963, nous avons essayé de représenter la situation de ces deux types de sol dans toute la région (voir figure n°4 dans le chapitre n°2).

Il y a tout de même quelques divergences dans nos appellations respectives. En ce sens que le sol j'ai nommé sol peu évolué d'apport à tendance vertique correspond à leur sol peu évolué d'apport à hydromorphie de profondeur, et que pour le sol salé carbonaté à hydromorphie de profondeur, c'est plutôt le caractère d'hydromorphie qui prédomine dans leur classification.

Le sol peu évolué d'apport à tendance vertique a une teneur en carbone organique de 1,3 % et une teneur en azote total de 0,1 %, donc un rapport carbone/azote de 13.

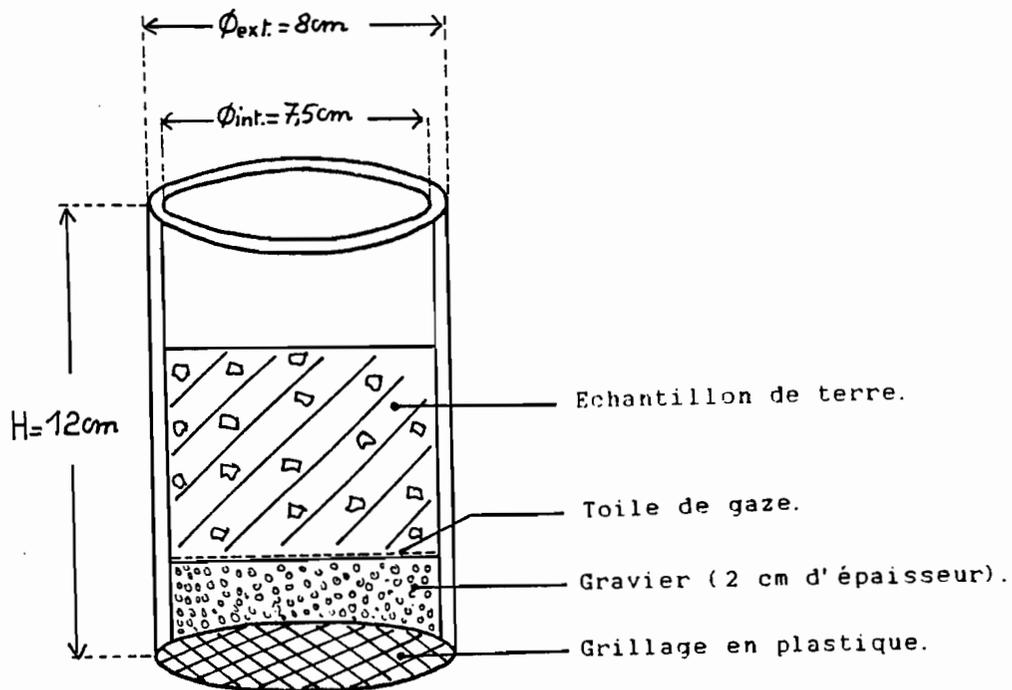
Le sol salé carbonaté présente une alcalinisation plus élevée à proximité du lac Ichkel. C'est un sol assez carbonaté. Il présente une teneur en carbone organique de 1,7 % et une teneur en azote total de 0,2 %, donc un rapport carbone/azote de 8,5. Le problème de l'hydromorphie est engendré par la submersion de la zone par la nappe pendant la saison des pluies.

Le but est d'améliorer la mauvaise structure de ces sols. Nous avons donc fait un enrichissement en matière organique (paille de blé) pour les horizons de surface de ces sols. Pour le sol salé carbonaté, un apport de gypse a été effectué en supplément pour faire baisser le rapport Na échangeable/capacité d'échange, et voir de quelle manière il agit sur l'amélioration de la structure.

4.2 PROTOCOLE EXPERIMENTAL :

4.2.1 Dispositif :

Le premier horizon de chaque sol, a été prélevé, séché, broyé et tamisé à 2 mm. Chaque échantillon pesant 250 grammes, est mis dans un tube en Chlorure de Poly-Vinyl (P. V. C). dont la partie inférieure est grillagée, pour permettre une meilleure aération de l'échantillon. Au dessus du grillage, on met deux centimètres de graviers fins sur lesquels on dépose la terre de l'échantillon séparée du gravier par une toile de gaze, (schéma ci-contre).



Surface = 44.15 Cm² Volume = 529.8 Cm³

$\phi_{ext.}$ = Diamètre extérieur.
 $\phi_{int.}$ = Diamètre intérieur.
 H. = Hauteur du tube.

Figure n°7 : Modèle de tube utilisé pour l'expérimentation.

C'est un dispositif de laboratoire, où les échantillons sont gardés à une température constante de 28°C et ramenés à une humidité de 80 % de l'humidité équivalente à la capacité de rétention au champ, contrôlée (par pesée) tous les trois jours. Ce sont les conditions supposées par la plupart des chercheurs biologistes comme optimum pour l'activité microbienne, et qui peuvent être celles d'un sol méditerranéen irrigué en été.

L'humectation se fait sur chaque échantillon avec une pipette, en se basant sur la masse d'eau évaporée par différence de la masse totale. À noter que le régime hydrique est caractérisé par des alternances d'humectation-dessiccation, avec l'apparition de fentes de retrait à la surface des échantillons après seulement trois jours d'évaporation. Les mesures pondérales montrent que l'humidité descend périodiquement en dessous du point de flétrissement (pF: 4,2).

4.2.2 L'apport de matière végétale :

Nous avons choisi de la paille de blé comme matière organique végétale. Cette paille a été découpée en petits morceaux, puis broyée et tamisée au travers d'un tamis de mailles de 2 mm. La fraction fine a été éliminée par un passage supplémentaire sur un tamis de mailles de 0,2 mm. Ainsi nous avons gardé la fraction calibrée entre 0,2 et 2 mm pour nos enrichissements.

Les ajouts de matière organique, ont été faits globalement sur toute la quantité de terre utilisée, de la même façon pour les deux types de sol.

Pour chaque sol, deux doses de paille ont été ajoutées :

- 1 % de paille (par rapport à la masse sèche de terre).
- 3 % de paille.
- Sans apport de paille (témoin).

Cette paille calibrée présente des taux de carbone et d'azote respectivement de 26,93 % et de 0,313 % donc un rapport C/N de 86.

Le rapport C/N étant trop élevé, nous l'avons fait baisser à 15 en ajoutant de l'azote. Cet ajout d'azote a été réalisé sous forme d'ammonium (NH₃) en solution, à la faveur du premier apport d'eau d'humectation, (voir détail en annexe F.6).

4.2.3 L'apport de gypse :

Le sulfate de calcium a été ajouté pour compenser le rapport Na/T trop élevé. Nous y avons apporté l'équivalent de Na⁺ en méq/100 grs contenu dans le complexe absorbant, en calcium, (détail en annexe F.6). Tout calcul fait, nous avons trouvé qu'il fallait une dose de 1% environ en sulfate de calcium en poudre hydraté (2 H₂O) par rapport à la masse de terre sèche. Cet apport a été fait de la même façon que

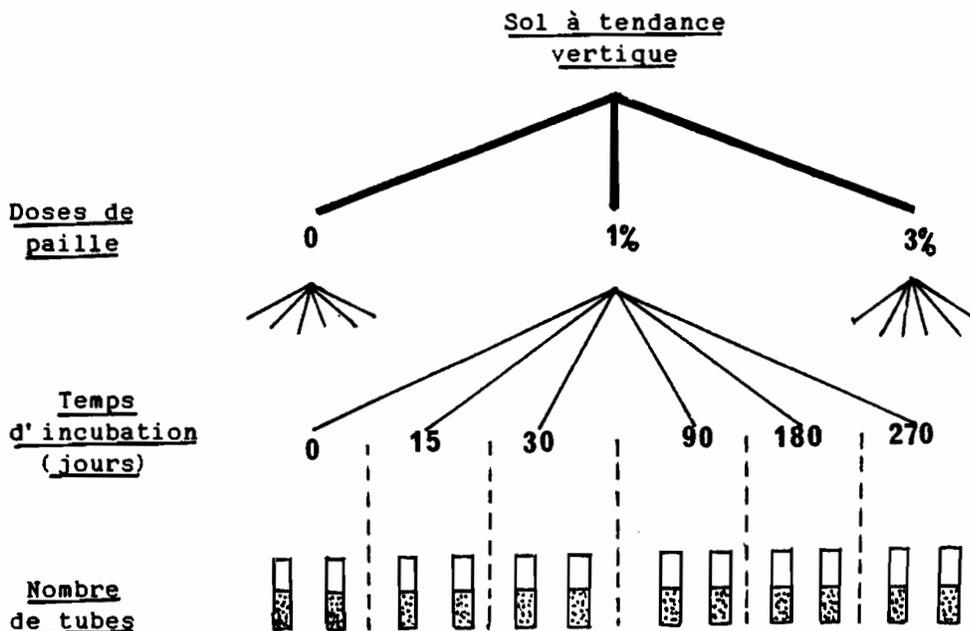
la paille de blé, c'est à dire globalement sur toute la terre avant l'échantillonnage.

4.2.4 Processus de l'expérimentation :

Celle-ci est étalée sur 9 mois, avec des prélèvements espacés selon le calendrier ci-dessous. C'est-à-dire que chaque fois un échantillon est sacrifié pour faire toutes les analyses nécessaires.

- Temps zéro (sans incubation).
- 15 jours d'incubation.
- 30 jours d'incubation.
- 90 jours d'incubation.
- 180 jours d'incubation.
- 270 jours d'incubation.

Pour chaque traitement, deux répétitions ont été effectuées. Après chaque prélèvement les deux échantillons représentant le même traitement ont été regroupés ensemble, (voir schéma ci-dessous).



Soit 36 tubes.

- Sol salé carbonaté (sans apport de gypse).....36 tubes.
- Sol salé carbonaté (avec apport de gypse).....36 tubes.

108 tubes.

* Les 2 tubes de chaque traitement ont été regroupés après chaque prélèvement, pour faire dessus toutes les analyses nécessaires.

4.3 METHODES D'ANALYSE UTILISEES :

4.3.1 Le carbone :

Le carbone total et le carbone de l'humine ont été mesurés par combustion au four à 1250° C, suivi du dosage du gaz carbonique dégagé au coulomètre.

- Le carbone organique a été mesuré par la méthode Walkley et Black et dosage du sulfochromique non consommé par titration en retour.

-Le carbone des extraits humiques et fulviques est mesuré après séchage par attaque sulfochromique (à ébullition pendant 5 minutes, sur une plaque chauffante réglée à 215-220°C), en présence de 10 millilitres d'une solution de bichromate de potassium à 2 % en milieu sulfurique.

- L'extraction des matières humiques a été faite selon la méthode DABIN et Coll. Bondy-O. R. S. T. O. M. (détails en annexe F.5).

+ Les acides fulviques libres (A.F.L.), sont extraits par l'acide phosphorique 2M à pH proche de 0, et séparés du sol par centrifugation. Les matières organiques légères qui flottent sont séparées par densimétrie (d=1,7), et lavée sur filtre jusqu'à épuisement.

+ Les matières humiques totales, sont extraites :

- D'une part par le pyrophosphate de sodium 0,1M à pH = 9,8, suivi par une séparation par l'acide sulfurique à pH = 2,0 en acides fulviques (A.F.P.) qui restent solubles, et en acides humiques (A.H.P.) qui flocculent.

- Puis d'autre part, par la soude 0.1N suivi d'une séparation par l'acide sulfurique à pH = 2,0 en acides fulviques (A.F.S.) soluble et en acides humiques (A.H.S.) qui précipitent.

+ L'humine est le résidu insoluble après deux séries d'extractions successives par le pyrophosphate de Na et par la soude

- La granulométrie a été effectuée par la méthode internationale (pipette Robinson).

- La conductivité électrique a été mesurée sur la pâte saturée.

- Les bases échangeables ont été effectuées par percolation avec l'acétate d'ammonium à pH = 7. Les dosages des cations ont été effectués par absorption atomique pour le calcium et le magnésium, et par émission de flamme pour le sodium et le potassium.

- La capacité d'échange cationique a été mesurée par percolation en trois temps. Une première percolation avec le chlorure de calcium 1N (tamponné à pH = 7 par le Triéthanolamine), suivie d'une deuxième percolation avec le chlorure de calcium N/10 pour finir par une troisième percolation avec le nitrate de Potassium 1N.

-Les polysaccharides extraits et hydrolysés par H₂SO₄ 3N, ont été dosés par la méthode colorimétrique à l'antrone (détail en annexe F.7).

4.3.2 Etude des agrégats :

- Essais sur le fractionnement granulométrique :

Au départ il était prévu de faire un fractionnement granulométrique des échantillons par agitation dans l'eau avec des billes de verre et tamisage sous eau. Ceci pour établir l'action de la matière organique sur certaines fractions granulométriques et sur les éléments stables de la structure de ces sols.

Ainsi pour établir un protocole d'expérimentation propre à nos échantillons, nous nous sommes inspiré des travaux de BRUCKERT 1979, de FELLER 1979 et de FELLER et All. 1983, qui ont utilisés des méthodes analogues.

Ces auteurs ont fait une séparation granulométrique de la matières organique selon une méthode standardisée, mais les différents tests d'agitation ne sont pas les mêmes ou ne sont pas utilisés de la même façon suivant les types de sols étudiés (par exemple pour l'emploi des billes de verre , certains utilisent 3 billes, d'autres 5 billes etc..., ce qui modifie sensiblement les résultats).

Nous avons essayé d'optimiser les conditions d'expérience pour les sol étudiés en faisant varier les conditions d'agitation utilisée par la méthode FELLER, (choix des billes, temps et fréquence d'agitation, durée de passage aux ultrasons).

Pour ce faire nous avons fait varier les paramètres cités plus haut de la façon suivante :

- Utilisation ou non des billes (nombre fixe de 3 billes).
- Intensité de l'agitation va et vient (1/2, 1, 1+1/2 et 2 aller et retour par seconde).
- Durée d'agitation (5, 10, 15, 30, 60, 90 et 120 minutes).
- Traitement aux ultrasons, durée de passage (2, 5, 10 et 15 minutes), avec une intensité fixe de 80W - 80KHZ (méthode BRUCKERT M. et GAIFFE 1983).

les conclusions de ces expériences préliminaires sont les suivantes :

a) L'action des billes :

Elles provoquent une action beaucoup trop brutale sur les agrégats et la destruction est trop importante pour les sols étudiés, quelque soit le temps ou l'intensité d'agitation.

b) L'agitation :

Il y a d'abord l'influence de la durée d'agitation sur la dégradation des agrégats, l'influence de l'intensité d'agitation et des ultrasons.

* Durée d'agitation :

Les essais sont effectués avec un rapport masse de terre/volume d'eau égal à 15 grammes/100 millilitres. L'intensité d'agitation est fixée à 1 tour/seconde.

D'après la figure n°11 ci-contre, nous remarquons qu'après une heure d'agitation (sans bille) il y a des taux d'agrégats stables relativement constants. Il existe un palier à partir de 1 heure d'agitation, et les taux d'agrégats compris entre 0,2 et 2 mm et d'autre part de 0,05 et 0,2 mm semblent ensuite peu affectés par le temps d'agitation.

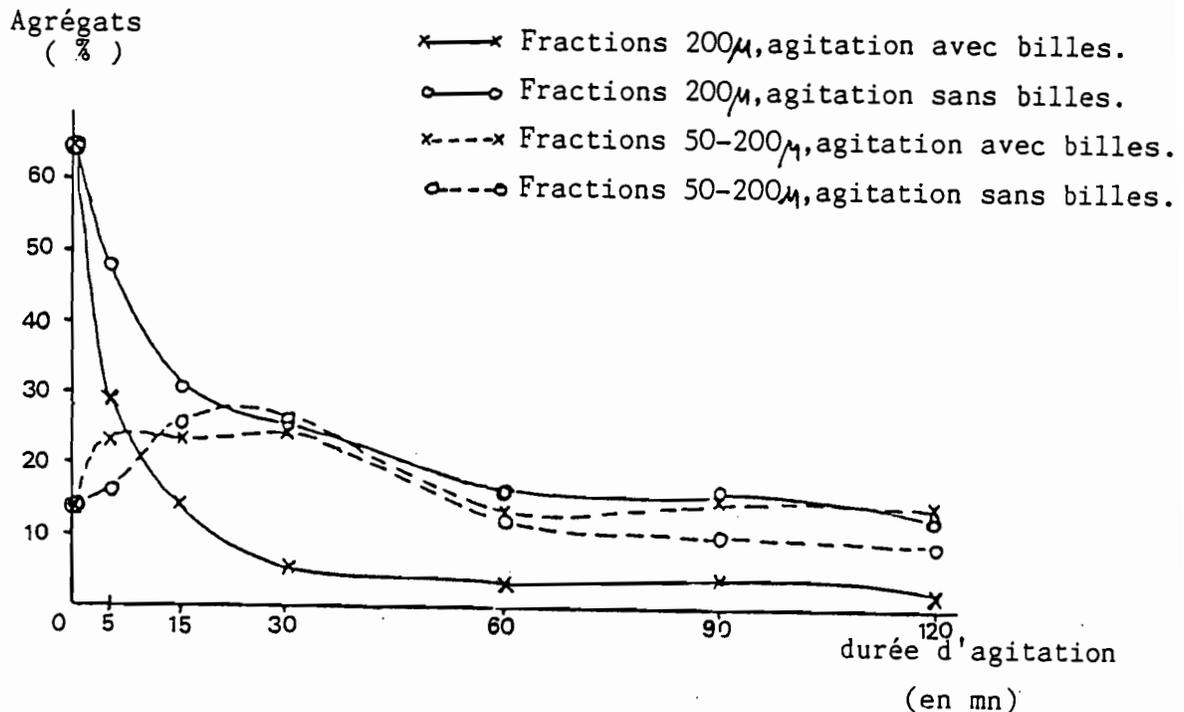


figure n°11 : Influence de la durée d'agitation sur la dispersion des agrégats.

Les résultats analytiques sont représentés dans le tableau ci-dessous.

| Taux d'agrégats (en %) Temps d'agitation | fraction 50-200 μ | | fraction 200-2000 μ | |
|---|-----------------------|-------------|-------------------------|-------------|
| | avec billes | sans billes | Avec billes | sans billes |
| 0 | 14,00 | 14,00 | 65,00 | 65,00 |
| 5 minutes | 23,50 | 16,36 | 29,40 | 48,00 |
| 15 minutes | 23,44 | 26,07 | 14,70 | 31,00 |
| 30 minutes | 24,12 | 26,60 | 5,50 | 26,30 |
| 60 minutes | 13,37 | 12,65 | 3,15 | 16,28 |
| 90 minutes | 15,00 | 10,00 | 4,10 | 16,50 |
| 120 minutes | 14,20 | 8,90 | 1,92 | 13,70 |

Tableau n°10 : Influence de la durée d'agitation sur la dispersion des agrégats.

* Intensité d'agitation :

Nous nous proposons de fixer la durée d'agitation à 1 heure et de faire varier l'intensité d'agitation et voir l'importance de ce paramètre sur la dispersion des agrégats stables.

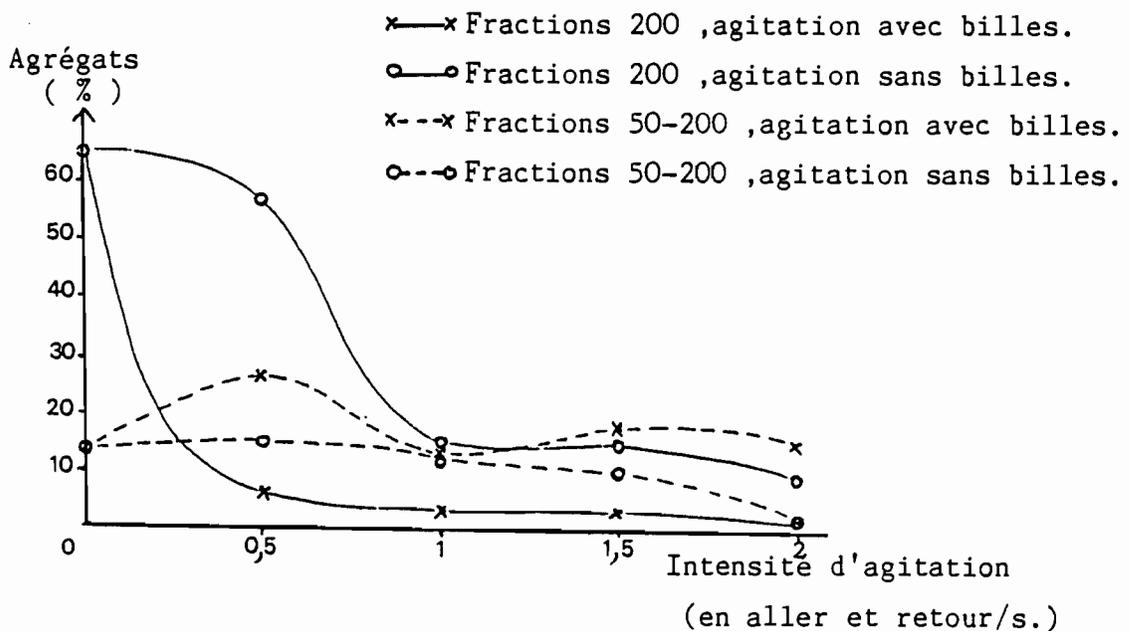


figure n°12 : Influence de l'intensité d'agitation sur la dispersion des agrégats stables.

La variation de l'intensité d'agitation va et vient s'est faite sur 4 intensités qui sont : 1/2 ; 1 ; 1,5 et 2 aller et retour/seconde.

D'après la figure n°12, on remarque que les vitesses d'agitation élevées ont une action très violente, surtout pour les agrégats compris entre 0,2 et 2 mm. Pour les faibles intensités, il y a des variations considérables des taux d'agrégats. On peut déterminer un palier de dispersion maximum à partir de 1 aller et retour/seconde. A partir de cette intensité, les variations des taux d'agrégats ne sont pas très importantes.

Nous rappelons par ailleurs que ces tests se sont faits dans certaines conditions particulières, à savoir un rapport masse de terre/volume d'eau égal à 15 grammes/100 millilitres, pendant 1 heure d'agitation et sans ultrasonication.

Le tableau ci-dessous représente les résultats analytiques de l'influence de l'intensité d'agitation sur la dispersion des agrégats.

| Taux d'agrégats (en %) intensité d'agitation | fraction 50-200 μ | | fraction 200-2000 μ | |
|---|-----------------------|-------------|-------------------------|-------------|
| | avec billes | sans billes | avec billes | sans billes |
| 0 | 14,00 | 14,00 | 65,00 | 65,00 |
| 1/2 aller et retour/s. | 27,00 | 15,38 | 6,10 | 57,07 |
| 1 aller et retour/s. | 13,63 | 12,18 | 3,09 | 15,84 |
| 1,5 aller et retour/s. | 17,32 | 10,38 | 3,15 | 15,23 |
| 2 aller et retour/s. | 15,12 | 2,07 | 2,05 | 9,57 |

Tableau n°11 ; Influence de l'intensité d'agitation sur la dispersion des agrégats.

* Les ultrasons :

Ils sont trop destructeurs, surtout à des durées d'agitations élevés qui dépassent 5 minutes. Cela pourrait être utile dans le cas ou l'on voudrait récupérer la totalité des matières légères, mais si l'on veut conserver un maximum d'agrégats stables, il faut supprimer l'utilisation des ultrasons.

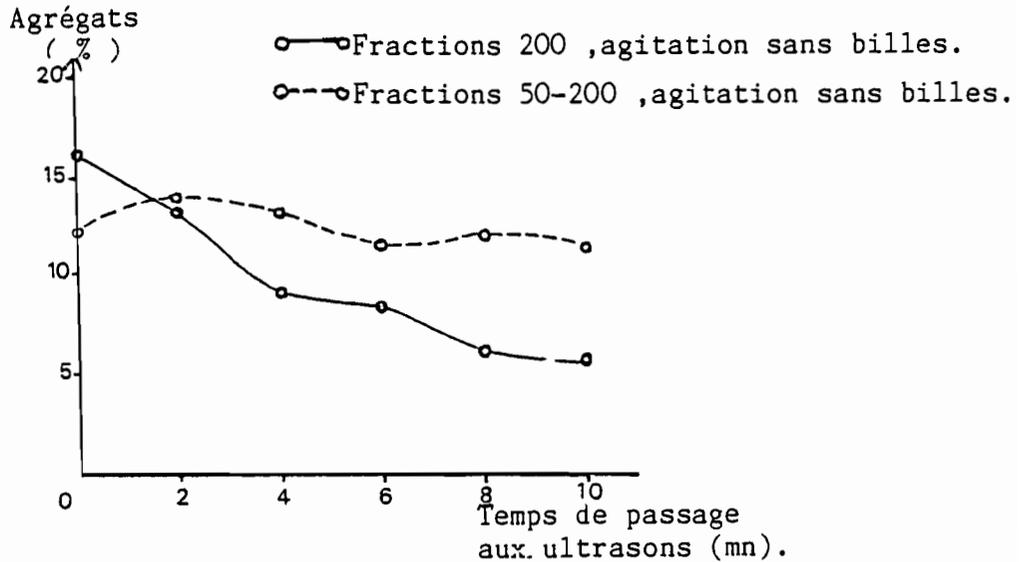


figure n°13 : Influence de la durée de passage aux ultrasons sur la dispersion des agrégats. 80W-80KHZ.

La figure n°13, montre l'action des ultrasons sur échantillons dont l'agitation préalable s'est faite dans les conditions suivantes : Un rapport masse de terre/volume d'eau de 15 grammes/100 millilitres, sans utilisation de billes, pendant 1 heure d'agitation à une intensité de 1 aller et retour/seconde.

Les résultats analytiques sont donnés sur le tableau ci-dessous.

| Taux d'agrégats (en %) | 50-200 μ | 200-2000 μ |
|------------------------|--------------|----------------|
| Temps d'agitation | | |
| 0 | 12,11 | 16,21 |
| 2 minutes | 14,05 | 13,18 |
| 4 minutes | 13,20 | 9,06 |
| 6 minutes | 11,55 | 8,42 |
| 8 minutes | 12,00 | 6,17 |
| 10 minutes | 11,38 | 5,84 |

Tableau n°12 : Influence des ultrasons sur la dispersion des agrégats.

- Comparaison avec le test de HENIN-MONNIER :

Dans le cas de notre sol, nous avons un optimum au commencement des paliers des courbes en fonction du temps et des intensités d'agitation. Cet optimum nous donne des résultats comparables à ceux obtenus par le test de HENIN, avec l'agitation manuelle par retournement sans prétraitement (Age).

Nous avons donc choisi la méthode de HENIN-MONNIER, qui permet aussi de faire des comparaisons de l'action des différents prétraitements. Cela nous a incité à utiliser systématiquement la méthode de HENIN pour la mesure de la stabilité des agrégats.

La technique de HENIN-MONNIER nous apporte aussi des informations supplémentaires sur la dispersion des éléments fins, sur l'action des substances qui cimentent les agrégats et les effets de surface qui conditionnent l'humectation et la stabilité des agrégats lorsqu'ils sont plongés dans l'eau (rôle de la matière organique).

a) Influence des prétraitements avant l'agitation et le tamisage sous l'eau :

Rappelons que dans cette méthode classique, le tamisage sous l'eau se fait après des imbibitions ménagées des échantillons par l'alcool éthylique ou le benzène.

L'agitation et le tamisage dans l'eau s'effectuent dans des conditions "standard", permettant de comparer 3 taux d'agrégats stables (sans prétraitement, après prétraitement au benzène et après prétraitement à l'alcool). On mesure également la quantité d'éléments fins (argile plus limons fins) qui se dispersent durant le tamisage.

Il a été démontré par de nombreux auteurs dont HENIN, les faits suivants :

- Après un prétraitement avec un liquide miscible à l'eau et polaire, la résistance des particules à l'action de l'eau s'accroît (sauf pour les terres sodiques).

- Après un prétraitement avec un liquide non miscible à l'eau et non polaire, la résistance des particules à l'action de l'eau diminue fortement, sauf si la terre contient suffisamment de matière organique.

Cela s'explique par le fait que l'humectation par un liquide organique miscible à l'eau, déplace l'atmosphère gazeuse dans les pores des agrégats.

Par contre dans le cas du benzène, sur une terre peu organique, la mouillabilité de la terre pour l'eau est peu modifiée, donc la tension interfaciale est importante, d'où la rupture. La présence de la matière organique permet de fixer ce liquide organique non polaire et cela constitue une sorte de film hydrophobe qui empêche l'humectation de la terre, alors que $\cos \alpha$ devient négatif .

Le prétraitement à l'alcool démontre l'effet de la compression de l'air dans les pores des agrégats. L'alcool en limitant ou en supprimant les effets liés à la compression de l'atmosphère renforce la résistance des agrégats. La plupart des expériences démontrent que l'essentiel du délitement des agrégats est dû au phénomène de l'éclatement et non au mécanisme de gonflement comme le laissait supposer certaines anciennes études. Toutefois cet effet de gonflement existe, mais pour une faible part.

L'argument essentiel avancé par les auteurs partisans de cette théorie de gonflement, est lié au fait que pour une même terre, le remplacement par échange des ions calcium par des ions sodium augmente le gonflement. Cependant on doit prendre en compte les cations échangeables (par exemple les argiles sodiques sont peu résistantes car très gonflées), HENIN 1976.

En résumé, les facteurs de stabilité de la terre vis à vis de l'eau sont, la cohésion à l'état humide d'une part et la faible mouillabilité d'autre part. La cohésion est liée à la teneur en argile, (à prendre en compte les cations échangeables, car l'argile sodique est peu résistante). La mouillabilité dépend de la matière organique et des cations fixés par celle-ci, dans l'ordre décroissant Na-Ca-Al et Fe. Les matières organiques interviennent aussi pour assurer la cohésion du système.

Le calcul de l'indice d'instabilité I_s , s'effectue en tenant compte des taux d'agrégats stables après les différents prétraitements, du taux de dispersion maximum et du taux de sable grossier.

$$I_s = \frac{(A+L)_{max.}}{\frac{A_{ga} + A_{gb} + A_{ge}}{3} - 995.G.}$$

$A+L_{max}$ = Dispersion maximum (celui du prétraitement au benzène en général).

A_{ga} = Agrégats stables après prétraitement à l'alcool.

A_{gb} = Agrégats stables après prétraitement au benzène.

A_{ge} = Agrégats stables à l'eau sans prétraitement.

S. G. = Sables Grossiers.

4.3.3 Conclusion :

De ces résultats, il ressort que les billes sont beaucoup trop brutales ainsi que les ultrasons, donc leurs utilisations est à proscrire. on remarque également que les agrégats de diamètre entre 0,05 et 0,2 mm augmentent au début de l'agitation en fonction de l'intensité et de la durée, probablement du à la destruction des gros agrégats. Puis ils rediminuent pour se stabiliser au niveau initial.

CHAPITRE N°5 :

**INFLUENCE DES TRAITEMENTS SUR LE
COMPORTEMENT DES DEUX TYPES DE SOLS**

5.1 EVOLUTION DES MATIERES ORGANIQUES :

Nous avons procédé à une extraction des différentes fractions des matières organiques de façon à évaluer l'évolution de chacune d'elle en fonction du temps, et de voir leur relation avec l'évolution correspondante de la stabilité de la structure mesurée par les taux d'agrégats stables en particulier après prétraitement au benzène.

5.1.1 Carbone organique (C. O.) :

D'après les graphiques représentés par la figure n°14, dont les résultats analytiques sont en annexe T.7, nous remarquons que sur les trois cas de figures (a, b et c), la perte de carbone par minéralisation est très rapide au début de l'incubation durant les 30 premiers jours. Par la suite la diminution des teneurs en carbone organique devient beaucoup plus lente.

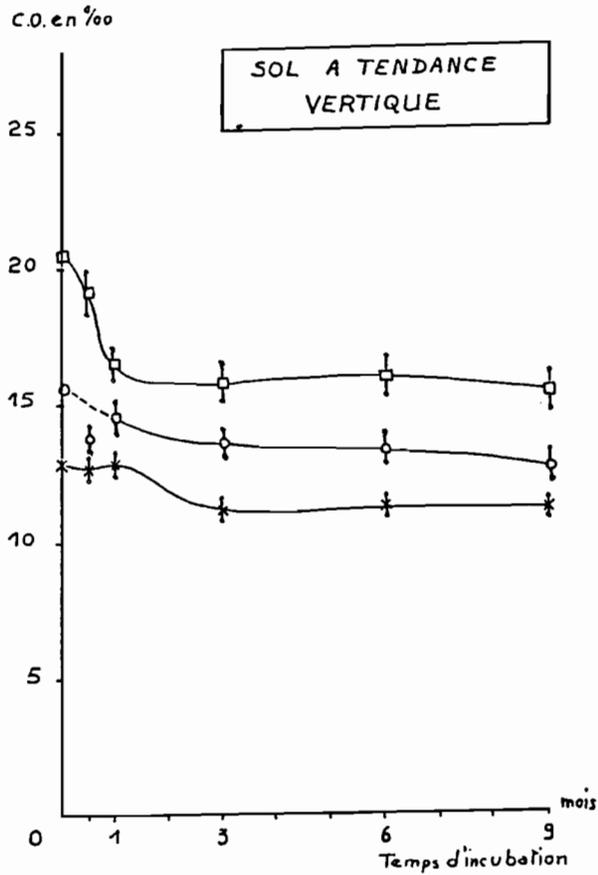
On remarque également pour le sol salé carbonaté avec ou sans gypse (figure b et c), une minéralisation initiale nettement plus rapide que dans le sol peu évolué d'apport à tendance verticale (figure a). Dans les trois cas il y a un accroissement final du stock de la matière organique stabilisée, par les apports de 1 % et 3 % de paille.

Par ailleurs, on remarque une interaction liée à l'enrichissement en sulfate de calcium, avec une augmentation du stock de matière organique dans le sol enrichi à la fois en paille (3 %) et en gypse. Par contre il n'y a pas d'action du gypse sur le stock de matière organique stabilisée pour les apports à 0 % et 1 % de paille.

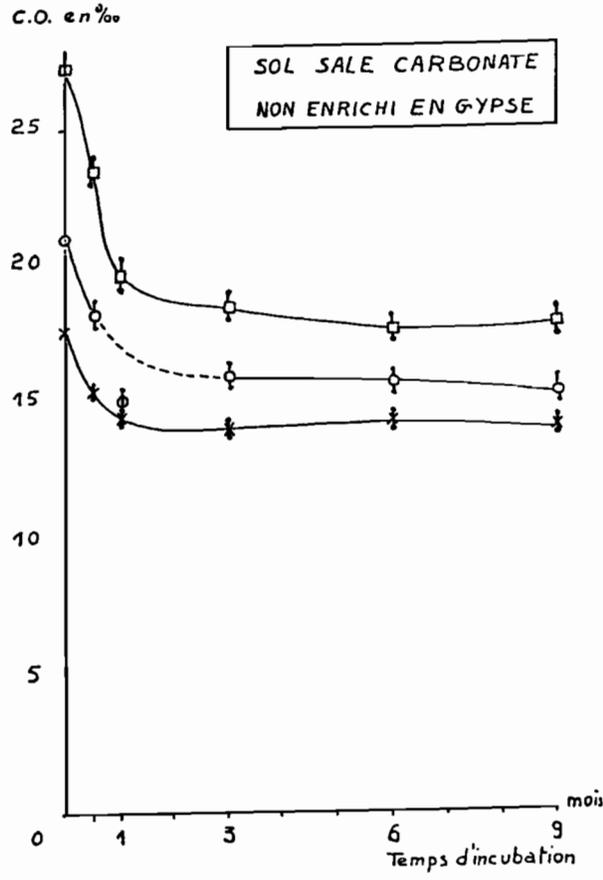
Nous verrons que cette interaction paraît liée au rôle joué par le calcium dans la formation des complexes argilo-humiques plus stables. Cela rend la matière organique plus résistante à la biodégradation en milieu riche en calcium (humates calciques).

Deux anomalies restent inexplicables au niveau des échantillons ayant reçus 1 % de paille (graphiques a et b) et retirés au bout de 15 jours d'incubation. Elles sont peut être inhérentes à un accident lors du dosage par la méthode Walkley et Black sur des matières organiques peu humifiées.

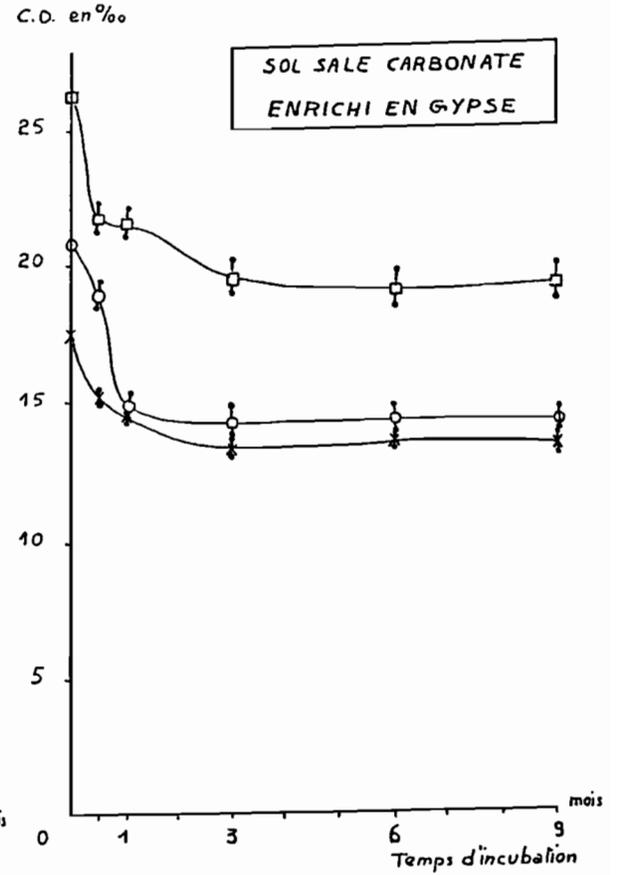
Pour le sol salé carbonaté enrichi en gypse (graphique c), la minéralisation importante au cours du premier mois d'incubation correspond peut être à une minéralisation de produits organiques libérés par la dissolution du calcaire par le gaz carbonique. Après le premier mois d'incubation, la minéralisation devient très lente, car l'activité biologique se ralentit parcequ'il ne reste plus que des produits organiques difficilement biodégradables.



Graphique: a)



b)



c)

Figure n°14:

Evolution du carbone organique en fonction du temps (c.o.).

Légende: x-x Echantillon Témoin non enrichi en paille

o-o Echantillon enrichi à 1% de paille

□-□ Echantillon enrichi à 3% de paille

5.1.2 Carbone minéral (C.M.) :

Pour le sol salé carbonaté, le dosage du carbone total par coulométrie nous a permis d'évaluer l'évolution du carbone minéral par différence (carbone total mesuré au coulomètre moins le carbone organique dosé par la méthode Walkley et Black).

L'évolution du carbone minéral a été représenté sur les graphiques de la figure n°15, dont les résultats analytiques sont en annexe T.8 . On remarque une augmentation rapide du carbone minéral sans doute due au dégagement de gaz carbonique par la micro-flore et la formation de carbonates. Pour le sol salé carbonaté enrichi en gypse et à 3 % de paille, l'augmentation des teneurs en carbonates est plus lente. Cette augmentation dès le début de l'incubation peut s'expliquer par le piègeage du CO₂ dégagé par le calcium pour former du carbonate.

Pour les échantillons à 0 % et 1 % de paille, les teneurs en carbone minéral du sol enrichi en gypse se stabilisent sensiblement au dessus des teneurs initiales, mais avec 3 % de paille on retrouve les teneurs initiales en carbonates. Cette diminution des carbonates s'expliquerait par les acides organiques formés (acides fulviques en particulier), qui causent la décomposition des carbonates et le dégagement du gaz carbonique.

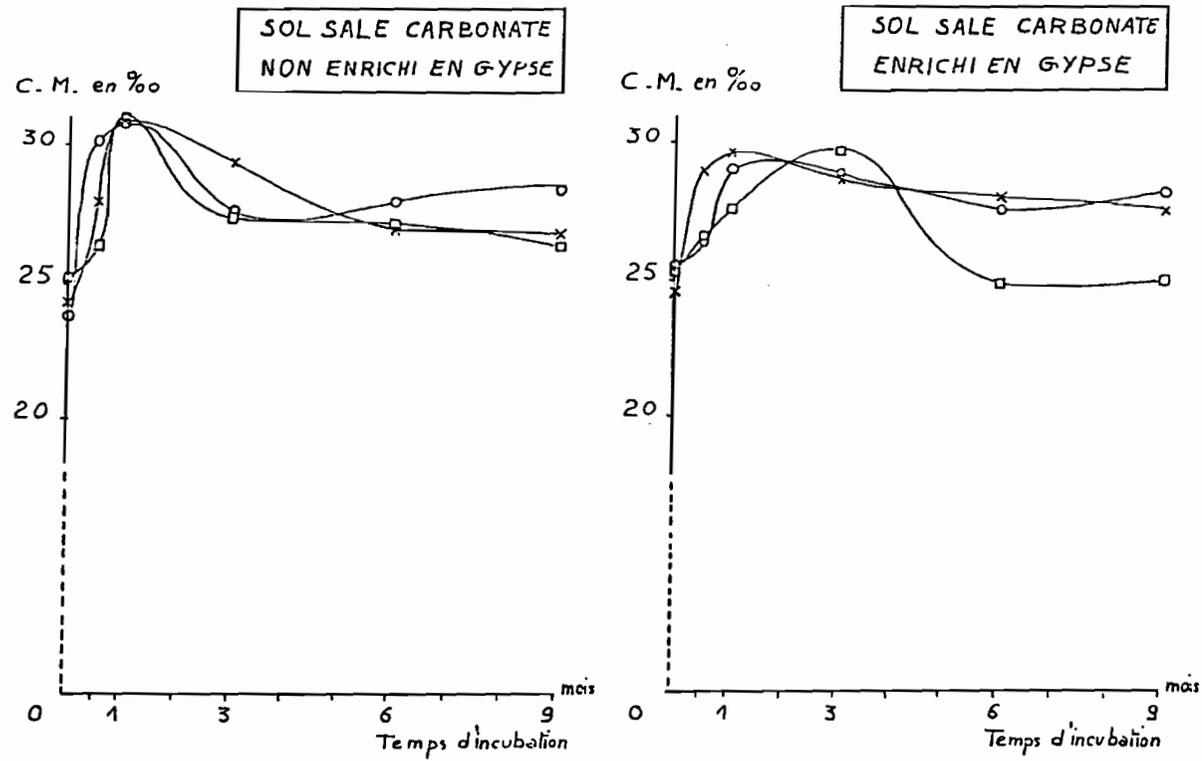
Pour le sol salé carbonaté enrichi à 3 % de paille et en gypse, cette diminution est encore plus importante. D'ailleurs on note davantage de formation d'acides organiques (acides fulviques libres et acides fulviques extractibles au pyrophosphate de sodium), donc formation de plus de fulvates calciques. Cela explique les pertes plus fortes en carbonates de calcium en fin d'expérience.

5.1.3 Matière organique légère (M.O.L.) :

Elles ont été extraites par la méthode densimétrique, par agitation avec de l'acide phosphorique 2M et centrifugation. Les teneurs en carbone de ces M.O.L. ont été dosées au coulomètre par combustion au four à 1240° C, et dosage du gaz carbonique dégagé.

Les graphiques de la figure n°16 dont les résultats analytiques sont en annexe T.9, montrent une minéralisation très rapide des résidus végétaux, spécialement au début de l'incubation. Les teneurs en M.O.L. ont tendance à se stabiliser par la suite à partir du sixième mois d'incubation. On notera tout de même qu'au terme du neuvième mois, toute la matière végétale apportée n'a pas été dégradée.

Dans le sol salé carbonaté, on observe une minéralisation plus rapide avec apport de gypse (graphique c) que sans apport de gypse (graphique b). L'apport de gypse favorise une meilleure activité de la micro-flore hétérotrophe au début de l'incubation.



Graphique: a)

b)

Figure n°15: Evolution du Carbone minéral en fonction du temps (C-M)

Légende:



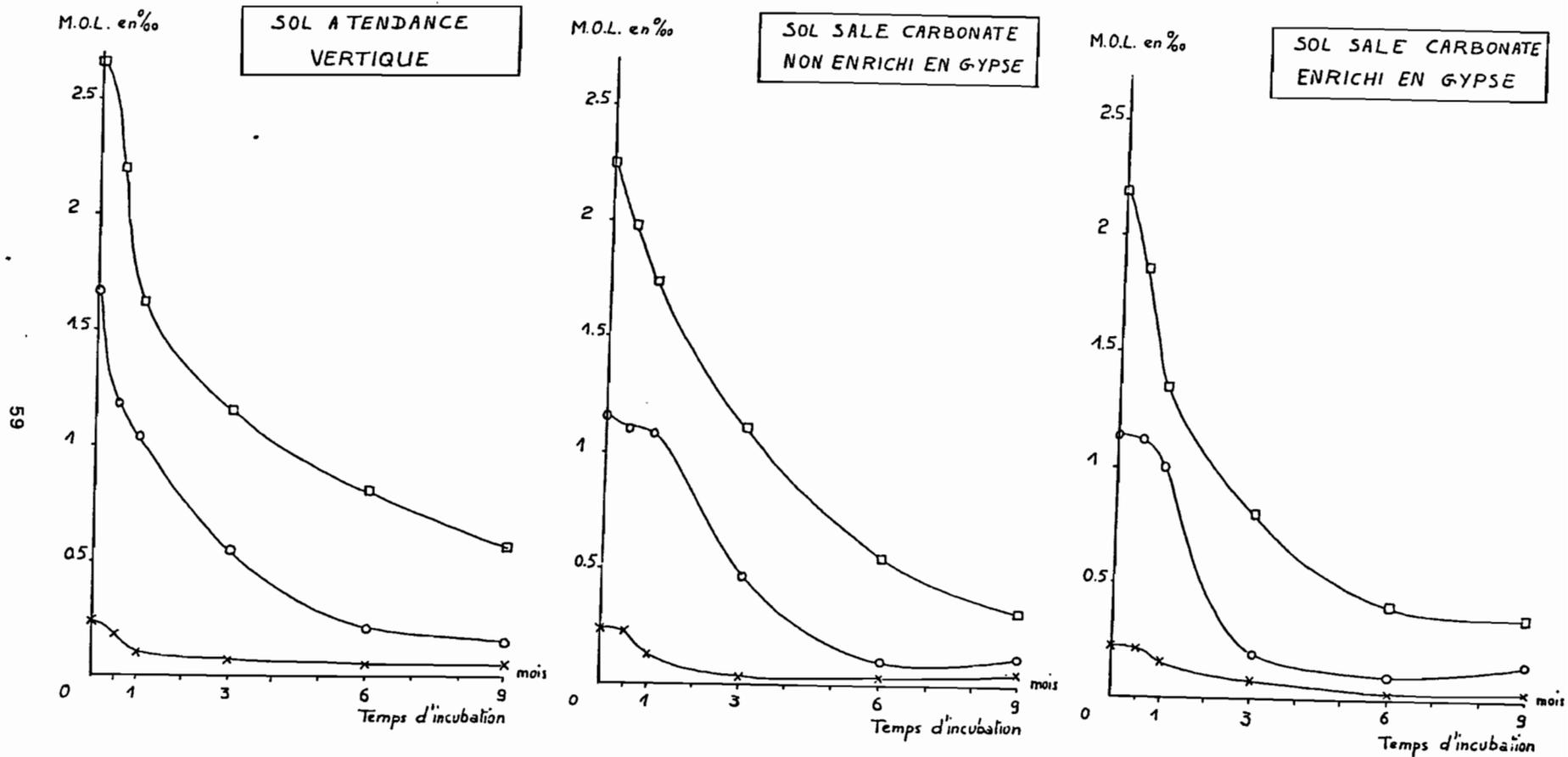
Echantillon Témoin non enrichi en paille



Echantillon enrichi à 1% de paille



Echantillon enrichi à 3% de paille



Graphique: a)

b)

c)

Figure n°16: Evolution de la matière organique légère en fonction du temps (M.O.L.)

Légende:



Echantillon Témoin non enrichi en paille



Echantillon enrichi à 1% de paille



Echantillon enrichi à 3% de paille

Dans le cas du sol peu évolué d'apport à tendance verticale (graphique a), cette minéralisation est plus rapide durant le premier mois d'incubation, mais elle ralentit beaucoup plus vite que dans les autres cas. Il reste davantage de matière légère à la fin de l'incubation, tout au moins pour les échantillons ayant reçu un apport de 3 % de paille. Dans ce cas, l'évolution est continue et progressive.

5.1.4 Acides fulviques libres (A.F.L.) :

Les acides fulviques libres sont extraits par dissolution par l'acide phosphorique 2M, après une agitation pendant 1 heure, centrifugation et filtration. Les résultats sont représentés par les graphiques de la figure n°17 dont les résultats analytiques sont en annexe T.10. Il existe une nette différence d'évolution entre le sol à tendance verticale (graphique a) et le sol salé carbonaté sans apport de gypse (graphique b) et avec apport de gypse (graphique c).

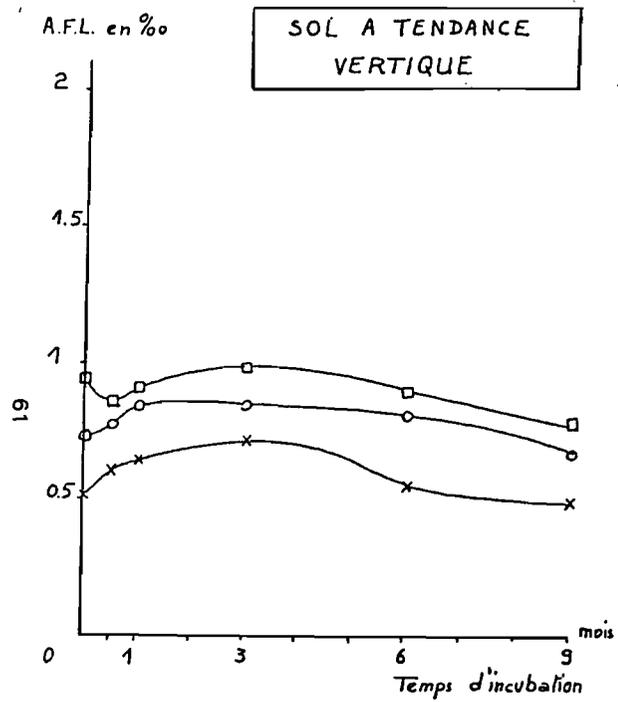
La première constatation que l'on peut faire est que les teneurs initiales en A.F.L. sont beaucoup plus importantes dans le sol salé carbonaté que dans le sol à tendance verticale, quelles que soient les quantités de résidus végétaux apportés, alors que les teneurs en A.F.L. varient peu avec le temps dans le sol à tendance verticale, elles décroissent brutalement puis plus lentement dans le sol salé carbonaté. Autrement dit, les A.F.L. fixés par les carbonates disparaissent rapidement en début d'incubation.

La légère augmentation des A.F.L. observée dans le sol à tendance verticale entre le premier mois et le troisième mois d'incubation; correspond sans doute à une transformation des résidus végétaux (hydrolyse des polysaccharides), préexistants dans le sol ou apportés dans la paille, et fixation probablement sur les argiles d'une partie des acides fulviques libres formés.

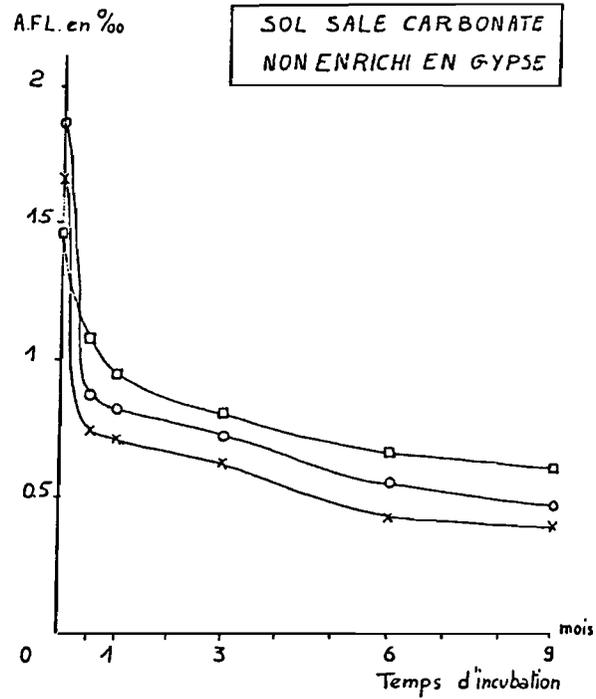
Dans le sol salé carbonaté au contraire (avec ou sans gypse), il y a à partir du premier mois d'incubation une décroissance lente des A.F.L., ce qui montre que leur minéralisation ou leur polymérisation l'emportent sur la formation de ces produits en général transitoires et biodégradables, et qui tirent leur origine de réactions qui conduisent à la formation ou à la minéralisation des acides humiques (CHASSIN 1979).

La nette diminution des A.F.L. dans le sol salé carbonaté durant le premier mois d'incubation est liée à la production du gaz carbonique par l'activité microbienne qui favorise la dissolution des A.F.L. liés au calcaire, et leur biodégradation.

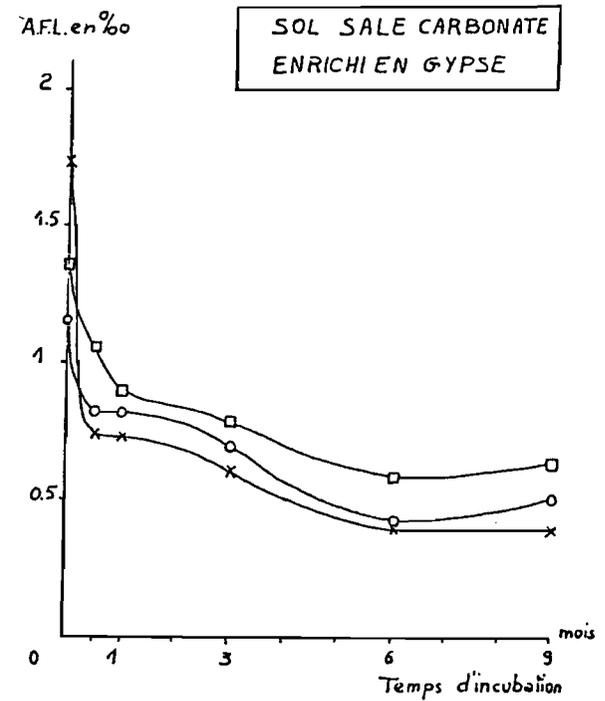
Pour le sol salé carbonaté avec apport de gypse (graphique c), à partir du sixième mois d'incubation, il y a un léger accroissement des A.F.L. pour les échantillons enrichis en matière organique. Cette augmentation serait causée par l'excès des carbonates de calcium entraînant une nouvelle insolubilisation des acides fulviques libres.



Graphique: a)



b)



c)

Figure n° 17: Evolution des Acides Fulviques libres en fonction du temps (A.F.L.)

Légende:

⊠-⊠ Echantillon Témoin non enrichi en paille

○-○ Echantillon enrichi à 1% de paille

□-□ Echantillon enrichi à 3% de paille

5.1.5 Acides fulviques extractibles par le pyrophosphate de sodium (A. F. P.) :

Ces acides fulviques sont extraits par le pyrophosphate de sodium 0.1M, et séparés des acides humiques par précipitation acide (ce sont les acides fulviques liés aux acides humiques). Les teneurs en A. F. P. sont reportées sur les graphiques de la figure n°18 dont les résultats analytiques sont en annexe T.11 . On observe une évolution très différente entre le sol à tendance vertique (graphique a), et le sol salé carbonaté sans apport de gypse (graphique b) et avec apport de gypse (graphique c).

Dans le cas du sol à tendance vertique, on note une augmentation très importante des A. F. P. durant les 15 premiers jours d'incubation, provenant sans doute des matières organiques légères qui se décomposent (minéralisation) et se transforment pour partie en A. F. P., pour partie en acides humiques extractibles au pyrophosphate de sodium (polymérisation). Ces acides fulviques sont rapidement adsorbés par les argiles 2:1 de ces sols. Ils peuvent également dériver des acides humiques et de ce fait auront des propriétés différentes par suit d'un plus grand nombre de chaînes aliphatiques (CHASSIN et All. 1977).

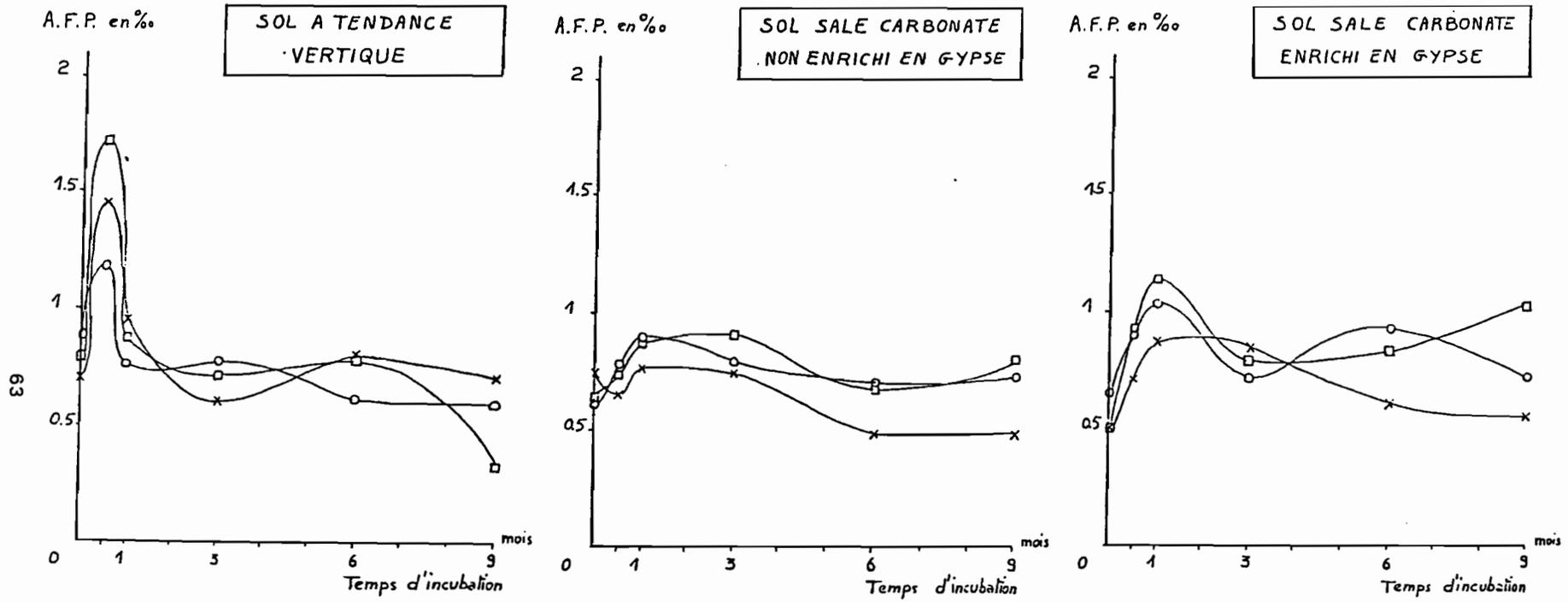
Dans le sol salé carbonaté sans apport de gypse (graphique b), les teneurs en A. F. P. augmentent plus faiblement et plus lentement. C'est à dire que la minéralisation des matières organiques légères est plus directe, et la transformation en A. F. P. plus transitoire ou même peu importante.

Pour le sol salé carbonaté avec apport de gypse (graphique c), la disparition des matières organiques légères s'accompagne d'une augmentation des A. F. P. pendant les premiers mois d'incubation. Nous verrons qu'ensuite, il y a surtout une augmentation des acides humiques extractibles au pyrophosphate de sodium. Au bout de 9 mois d'incubation, on observe une légère augmentation des A. F. P. surtout pour les échantillons enrichis à 3 % de paille. Il pourrait s'agir d'une insolubilisation des A. F. P. par l'excès de carbonate de calcium.

5.1.6 Acides fulviques extractibles à la soude (A. F. S.) :

Après extraction des A. F. L. par l'acide phosphorique et des A. F. P. et A. H. P. par le pyrophosphate de sodium, nous avons réalisé également l'extraction des A. F. S. et A. H. S. par la soude 0.1N jusqu'à épuisement. Les acides fulviques sont séparés des acides humiques (A. H. S.) par acidification.

Les évolutions des A. F. S. sont représentées par les graphiques de la figure n°18 dont les résultats analytiques sont en annexe T.12. Ces composés organiques ont une évolution beaucoup moins régulière que celle des acides fulviques extractibles au pyrophosphate de sodium. Pour le sol à tendance vertique (graphique a), il y a au début une légère augmentation des A. F. S., mais moins marquée que pour les A. F. P.



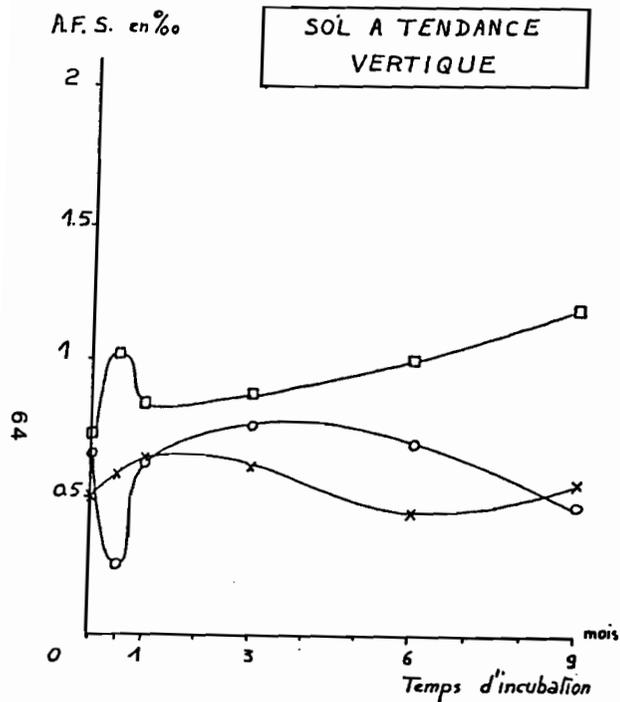
Graphique: a)

b)

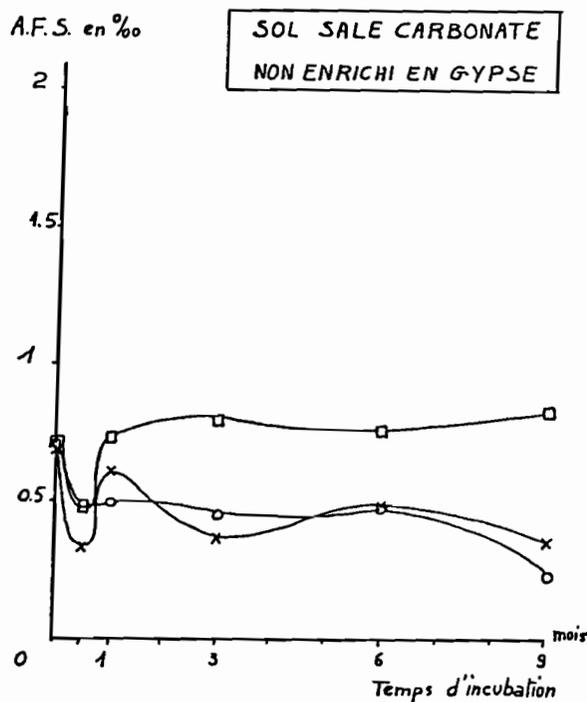
c)

Figure n°18: Evolution des Acides fulviques de l'extrait pyrophosphate de Na en fonction du temps (A.F.P.)

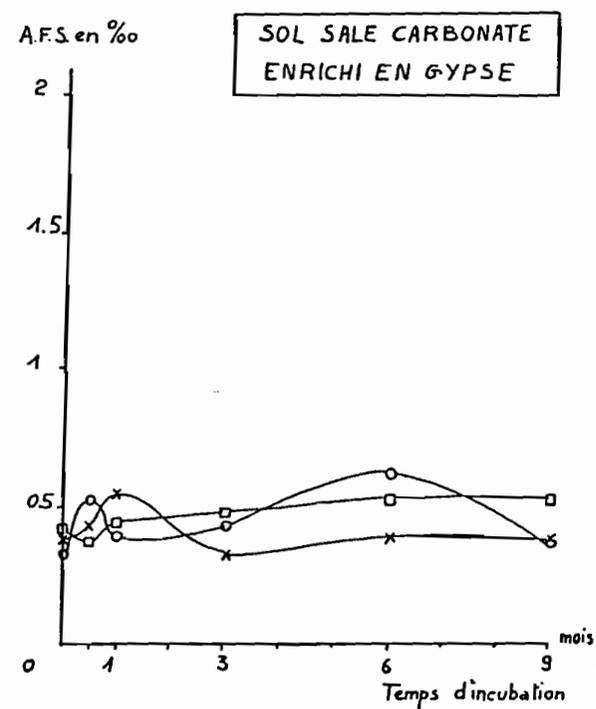
Légende: x—x Echantillon Témoin non enrichi en paille o—o Echantillon enrichi à 1% de paille □—□ Echantillon enrichi à 3% de paille



Graphique: a)



b)



c)

Figure n° 19: Evolution des Acides Fulviques de l'extrait NaOH en fonction du temps (A.F.S.)

Légende:



Echantillon Témoin non enrichi en paille



Echantillon enrichi à 1% de paille



Echantillon enrichi à 3% de paille.

Cette augmentation probablement due à la décomposition des matières organiques légères, devient plus lente et régulière à partir du premier mois d'incubation pour le sol à tendance verticale enrichi à 3 % de paille. Cela peut également être lié à la diminution des A. F. P. observé en même temps dans ce sol entre 15 jours et 1 mois d'incubation.

Pour le sol salé carbonaté sans apport de gypse (graphique b), nous avons une légère diminution des A. F. S. au début par biodégradation, ensuite une remontée assez rapide suivi d'une stabilisation. Dans le sol avec un apport de gypse (graphique c), on n'observe pas la diminution au début de l'incubation, mais une petite augmentation qui pourrait être due à une insolubilisation par un excès de calcium.

Les différences d'évolution dans le temps, des A. F. L., des A. F. P. et des A. F. S. selon les deux types de sol, peuvent se résumer ainsi :

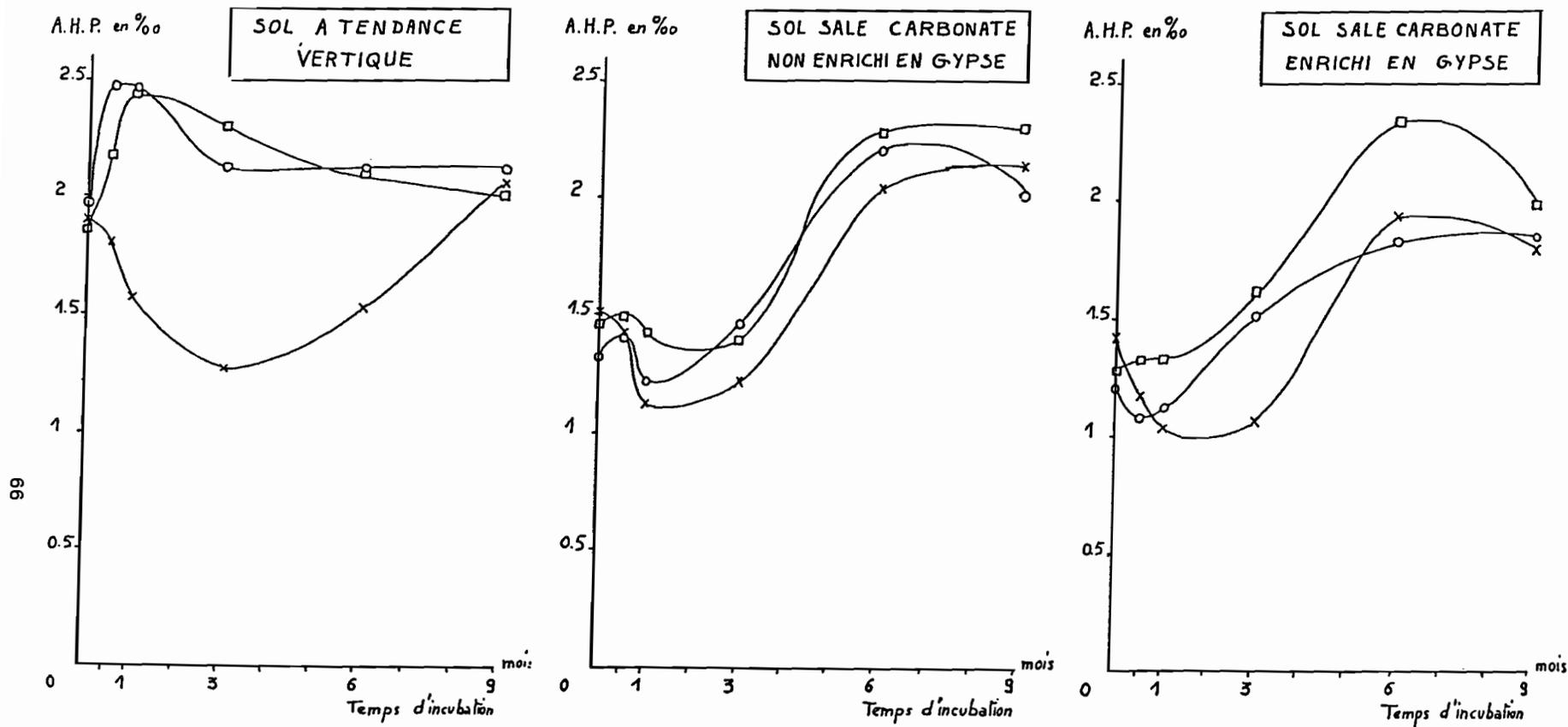
- Les teneurs des A. F. L. sont abondant au départ dans le sol salé carbonaté (probablement par la fixation des acides fulviques et polysaccharides d'origines végétales par les carbonates). Dans ce même sol, ces A. F. L. diminuent rapidement au cours du premier mois puis décroissent plus lentement. Au contraire dans le sol à tendance verticale, les teneurs des A. F. L. sont plus faibles et décroissent lentement.

- Les teneurs des A. F. P., dans le sol à tendance verticale, se forment rapidement dans la première quinzaine, mais ils disparaissent en grande partie au cours de la deuxième quinzaine. Pour le sol salé carbonaté, les teneurs en A. F. P. augmentent légèrement durant le premier mois, puis diminuent et se stabilisent.

- Les teneurs des A. F. S., dans le sol à tendance verticale, ont des évolutions très variables selon les apports de matière organique. Mais à partir de un mois d'incubation, on remarque une tendance à la stabilisation, observée également dans le sol salé carbonaté enrichi ou non en gypse.

5.1.7 Acides humiques extractibles au pyrophosphate de sodium (A. H. P.):

Les graphiques de la figure n°20 dont les résultats analytiques sont en annexe T.13, montrent deux évolutions très différentes entre le sol à tendance verticale (graphique a) et le sol salé carbonaté sans gypse (graphique b) ou avec apport de gypse (graphique c). Pour les trois cas des échantillons non enrichis en paille, une diminution des A. H. P. a été observée vers le troisième mois. Puis on observe une remontée entre trois et six mois d'incubation. La polymérisation et stabilisation des composés humiques sous forme d'A. H. P. est probablement due au régime alterné d'humectation-dessiccation.



Graphique: a)

b)

c)

Figure n° 20: Evolution des Acides humiques de l'extrait pyrophosphate de Na en fonction du temps (A.H.P.)

Légende:



Echantillon Témoin non enrichi en paille



Echantillon enrichi à 1% de paille



Echantillon enrichi à 3% de paille

Pour le sol salé carbonaté enrichi en paille avec ou sans gypse, l'évolution des A. H. P. est sensiblement parallèle dans les deux cas. C'est à dire que la synthèse des A. H. P. ne l'emporte nettement sur leur minéralisation, qu'au bout de quelques mois. Mais entre 3 et 6 mois l'augmentation est très nette.

Par contre pour le sol peu évolué d'apport à tendance vertique enrichi en paille, les teneurs en A. H. P. augmentent très rapidement au départ puis décroissent entre le premier mois et le troisième mois d'incubation. Les A. H. P. se forment donc plus rapidement mais sont moins stables que ceux formés plus lentement dans le sol salé carbonaté.

A noter aussi que dans le cas du sol salé carbonaté enrichi en gypse (graphique c), avec 3 % de paille, la polymérisation est nettement plus précoce que dans le sol salé carbonaté non enrichi en gypse. On peut donc dire que l'humification est globalement meilleure dans le cas du sol avec apport de gypse, durant les trois premiers mois d'incubation.

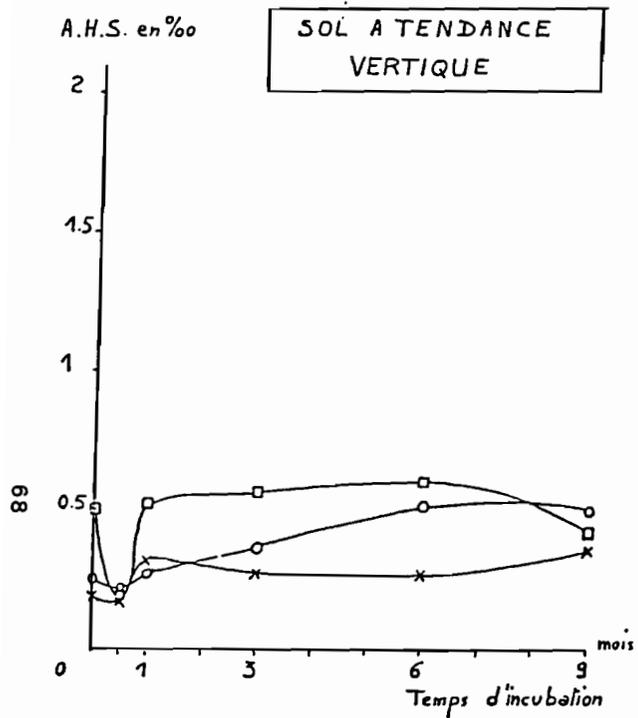
En fin d'incubation, pour le sol salé carbonaté, enrichi ou non en gypse, il y a une légère diminution des A. H. P. qui est peut être due à un blocage d'acides fulviques ou d'acides humiques extractibles à la soude, par insolubilisation par un excès de calcium, et que de ce fait ne se polymérisent plus.

5.1.8 Acides humiques extractibles à la soude (A. H. S.) :

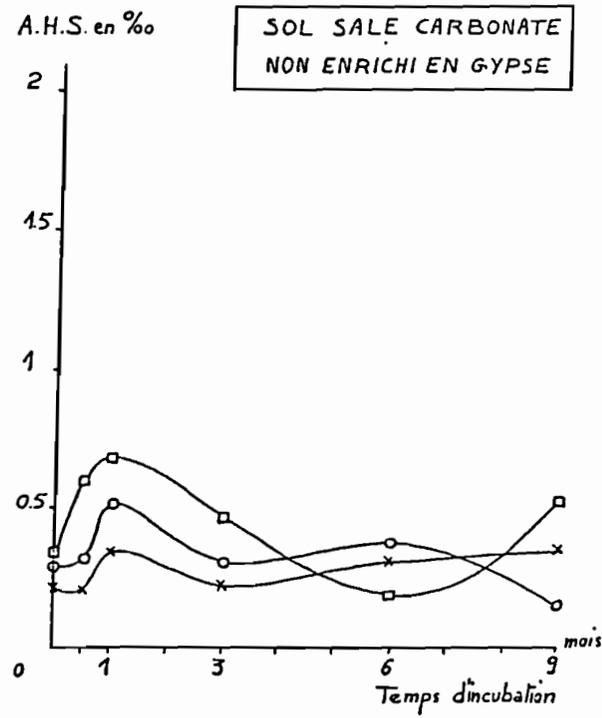
Les courbes de la figure n°21 dont les résultats analytiques sont en annexe T.14, montrent une petite différence d'évolution entre le sol à tendance vertique (graphique a) et le sol salé carbonaté sans apport de gypse (graphique b) ou avec apport de gypse (graphique c).

Pour le sol à tendance vertique, on note une diminution rapide des A. H. S. apportés dans la paille, au quinzième jour d'incubation. Cette diminution est liée à la transformation en acides humiques extractibles au pyrophosphate de sodium. Par contre pour le sol salé carbonaté sans apport de gypse, il y a une nette augmentation des A. H. S. avec un maximum au bout de un mois d'incubation. On peut expliquer cela par le fait que la polymérisation en A. H. S. des composés organiques provenant de la décomposition de la paille est plus forte que la transformation en A. H. P.

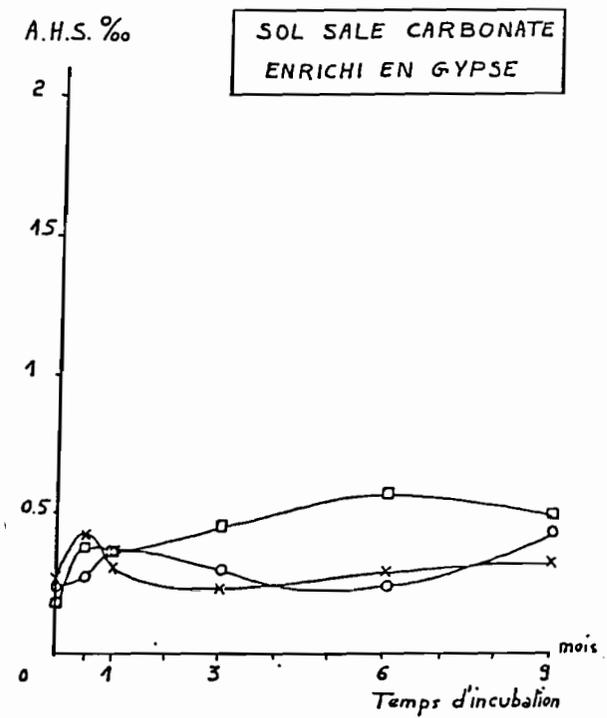
Ensuite les teneurs en A. H. S. se stabilisent dans le sol à tendance vertique, et décroissent en général dans le sol salé carbonaté sans apport de gypse. On peut supposer qu'il y a une transformation importante en A. H. P., entre le premier mois et le sixième mois d'incubation, puis c'est l'insolubilisation par l'excès de calcium. La transformation des A. H. S. en A. H. P. se voit par la symétrie de certaines courbes d'évolution, en particulier pour le sol salé carbonaté non enrichi en gypse avec 3 % de matière organique.



Graphique: a)



b)



c)

Figure n°21: Evolution des Acides humiques de l'extrait NaOH en fonction du temps (A.H.S.).

Légende:



Echantillon Témoin non enrichi en paille.



Echantillon enrichi à 1% de paille.



Echantillon enrichi à 3% de paille.

Mais cela dépend de la vitesse de formation des A. H. S.

5.1.9 Acides humiques gris, bruns et intermédiaires (AHG, AHB, AHI) :

La séparation a été faite par électrophorèse sur papier, uniquement sur les acides humiques extractibles au pyrophosphate de sodium (A. H. P.). Les teneurs sont estimées en multipliant les teneurs en A. H. P. par le pourcentage d' A. H. G. , d' A. H. B. et d' A. H. I. On remarque tout d'abord que les variations des pourcentages en A. H. G. sont importantes et parallèles aux A. H. P. , alors que les estimations des teneurs en A. H. B. et A. H. I. sont faibles voire négligeables (tableaux en annexes T. 15, T. 16 et T. 17).

-Acides humiques gris (A. H. G.) :

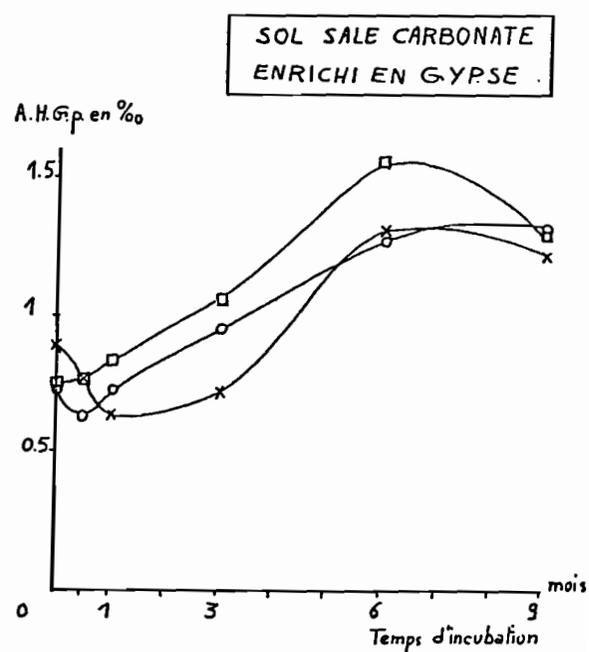
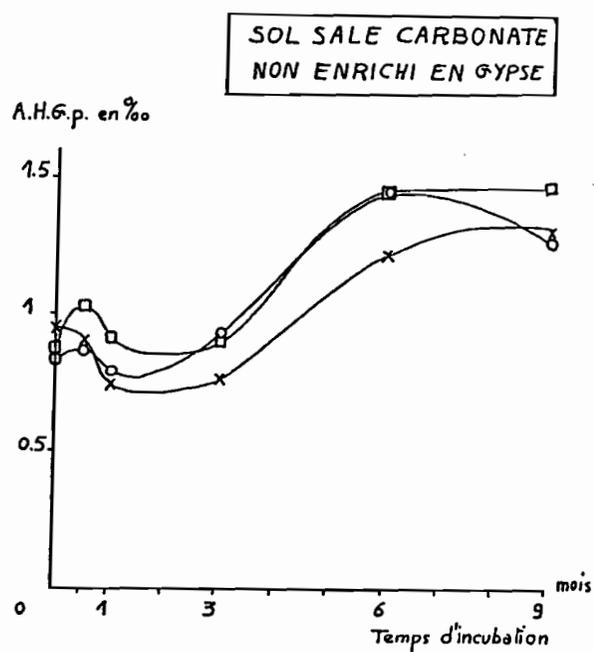
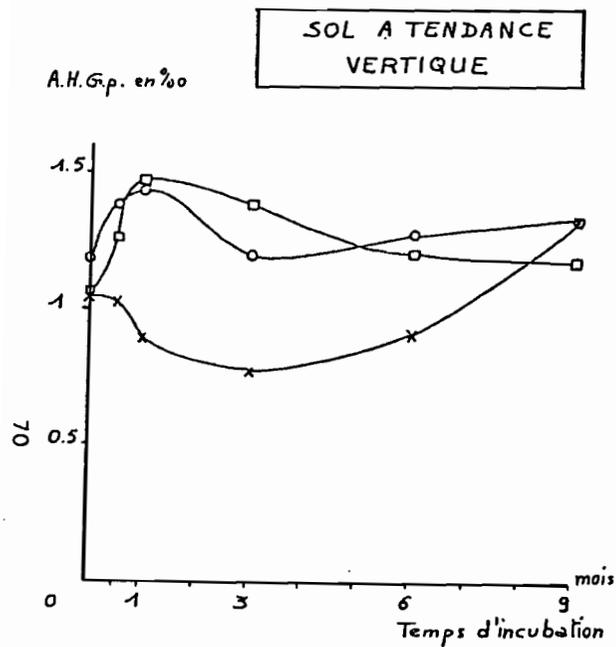
Les résultats de la figure n°22 dont les résultats analytiques sont en annexe T. 15, nous montrent une évolution qui ressemble à celle des A. H. P. Il faut rappeler aussi que les A. H. G. représentent presque les 70 % des A. H. P. dans les trois cas envisagés. Pour le sol à tendance verticale enrichi en paille (graphique a), on observe une augmentation des A. H. G. en début d'incubation, puis une tendance à la diminution et à une stabilisation à partir de un mois d'incubation.

Pour le témoin sans apport de paille, les teneurs en A. H. G. diminuent entre le premier mois et le troisième mois , puis augmentent avec le temps d'incubation. C'est à dire qu'il y a une lente stabilisation des composés humiques sous forme d'acides humiques polymérisés. Pour les échantillons enrichis en paille, on observe une brusque augmentation autour du premier mois puis une décroissance et une stabilisation.

Pour le sol salé carbonaté non enrichi en gypse (graphique b), il y a une augmentation sensible des A. H. G. à partir du premier mois d'incubation, alors que sur le sol enrichi en gypse, cette augmentation ne commence qu'à partir du troisième mois d'incubation.

Nous verrons qu'en même temps les taux d'agrégats stables après prétraitement au benzène augmentent légèrement surtout après le sixième mois d'incubation. Ces A. H. G. auraient donc à long terme, une incidence bénéfique sur la stabilisation des agrégats.

Cette augmentation des A. H. G. pourrait provenir pour partie des acides fulviques libres (A. F. L.) qui diminuent rapidement dès le début de l'incubation, pour partie des acides fulviques extractibles au pyrophosphate de sodium (A. F. P.) dans le cas du sol salé carbonaté. Il y a donc synthèse rapide d' A. H. G. , ensuite à partir du sixième mois il y a blocage des acides fulviques par un excès de calcium, d'où cette diminution des A. H. G. en fin d'expérience.



Graphique : a)

b)

c)

Figure n°22: Evolution des acides humiques gris de l'extrait pyrophosphate de Na en fonction du temps (A.H.G.p.).

Légende:



Echantillon Témoin non enrichi en paille



Echantillon enrichi à 1% de paille



échantillon enrichi à 3% de paille.

-Acides humiques intermédiaires (A. H. I.) :

Les courbes de lecture des densités optiques des électrophorégrammes ne montrent pas de pic bien individualisés pour les A. H. I. D'après la figure n°23 (résultats analytiques en annexe T.16), on n'observe pas d'évolution particulière du fait que les A. H. I. représentent une très faible quantité dans les A. H. P. On peut dire que leur évolution reste pratiquement stable, sauf quelques petits changements pour le sol à tendance verticale (graphique a). On note une légère augmentation au début, puis une diminution plus grande pour finir par une stabilisation.

Pour le sol salé carbonaté avec ou sans gypse, les teneurs en A. H. I. et A. H. B. des échantillons enrichis en paille sont peu différents de celles des échantillons non enrichis. C'est à dire que dans les conditions hydriques et d'aération, les produits de décomposition de la paille semblent se transformer directement ou rapidement en A. H. G., et nous n'avons pas de preuve, qu'il y ait passage par un stade d'acides humiques moins polymérisés (bruns ou intermédiaires).

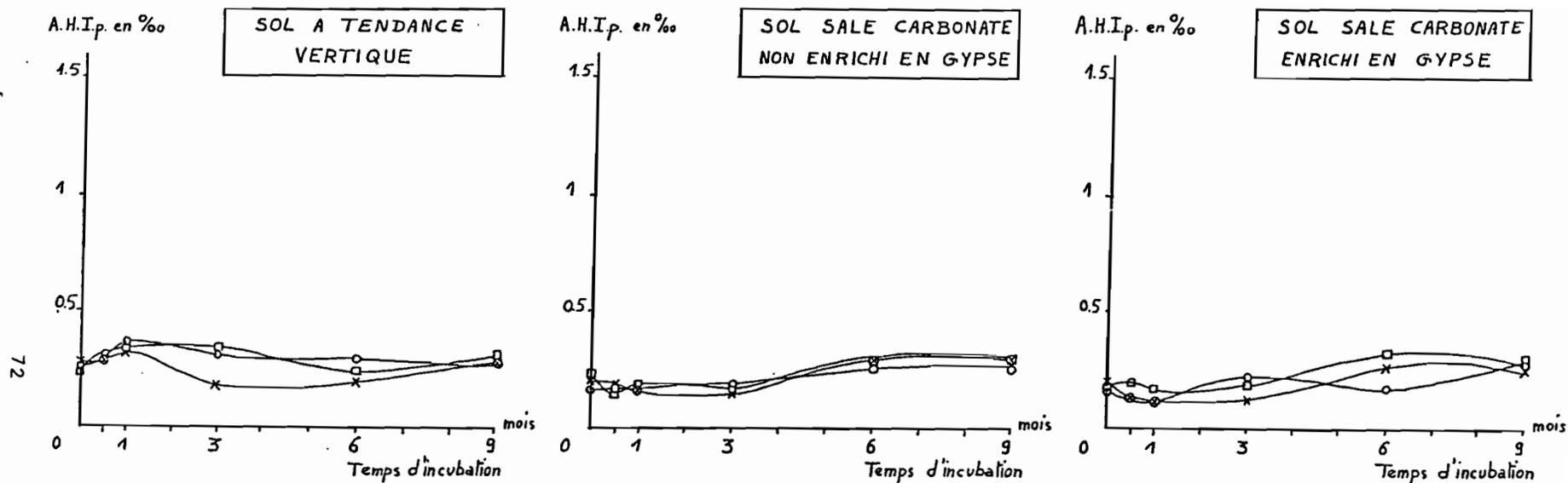
Pour le sol salé carbonaté non enrichi en gypse (graphique b), ou enrichi en gypse (graphique c), il y a donc une stabilisation des A. H. I. jusqu'à trois mois d'incubation, ensuite une tendance à une augmentation légère mais bien visible.

-Acides humiques bruns (A. H. B.) :

Les graphiques de la figure n°24 (résultats analytiques en annexe T.17), montrent des évolutions assez différentes selon les cas. Pour le sol à tendance verticale (graphique a), on a une augmentation au début par polymérisation, puis une diminution entre le quinzième jour et le troisième mois d'incubation suivi d'une stabilisation.

Pour le sol salé carbonaté non enrichi en gypse (graphique b), il y a une diminution jusqu'à un mois d'incubation, ensuite une nette remontée jusqu'à la fin de l'incubation par polymérisation. On retrouve la même évolution avec le sol salé carbonaté enrichi en gypse (graphique c), mais à partir du sixième mois, il y a une diminution des A. H. B. qui doivent passer dans les intermédiaires qui augmentent à cette période là.

L'apport de paille n'accroît pas nettement la formation d'A. H. B. comme cela s'observe dans d'autres sols. L'humification dans le cas étudié évolue directement vers les A. H. G., peut être en raison de la nature du substratum minéral.



Graphique: a)

b)

c)

Figure n°23 : Evolution des acides humiques intermédiaire de l'extrait pyrophosphate de Na en fonction du temps (A.H.I.p).

Légende:

 Echantillon Témoin non enrichi en paille

 Echantillon enrichi à 1% de paille

 Echantillon enrichi à 3% de paille.

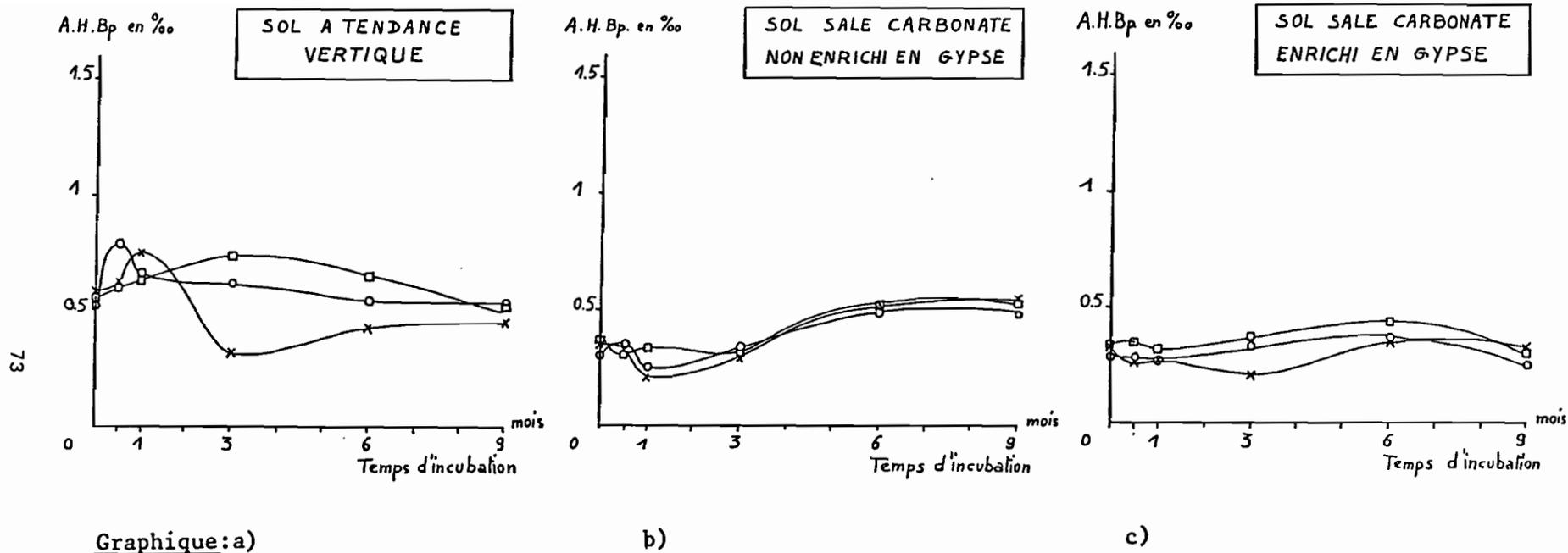


Figure n° 24 : Evolution des Acides Humiques Bruns de l'extrait pyrophosphate de Na en fonction du temps (A.H.Bp.)

Légende:

⊠-x Echantillon Témoin non enrichi en paille

⊠-o Echantillon enrichi à 1% de paille

⊠-□ Echantillon enrichi à 3% de paille

5.1.10 L'humine :

La figure n°25 dont les résultats analytiques sont en annexe T.18, illustre l'évolution de l'humine. On remarque qu'une partie importante de la paille ajoutée est insolubilisée ou séquestrée sous forme d'humine dès le départ de l'expérience, mais que la diminution des teneurs en humine est importante durant le premier mois d'incubation. C'est à dire qu'une partie de ces débris végétaux séquestrés restent biodégradables.

Les teneurs en humine restent constantes par la suite. Toutefois les stocks de matière organique ainsi stabilisée, différent suivant les doses de paille ajoutées, et pour le sol salé carbonaté enrichi en gypse et avec 3 % de paille. Dans le cas des enrichissements à 3 % de paille, on a plus d'humine pour le sol salé carbonaté enrichi en gypse (graphique c) que pour le sol salé carbonaté non enrichi en gypse (graphique b). Cela montre qu'il y a un stade de stabilisation de l'humine par le calcium.

Si l'on compare entre les trois cas, la quantité d'humine stabilisée après 9 mois d'incubation, de l'échantillon enrichi à 3 % de paille par rapport à l'échantillon témoin (sans paille), nous avons l'évolution suivante :

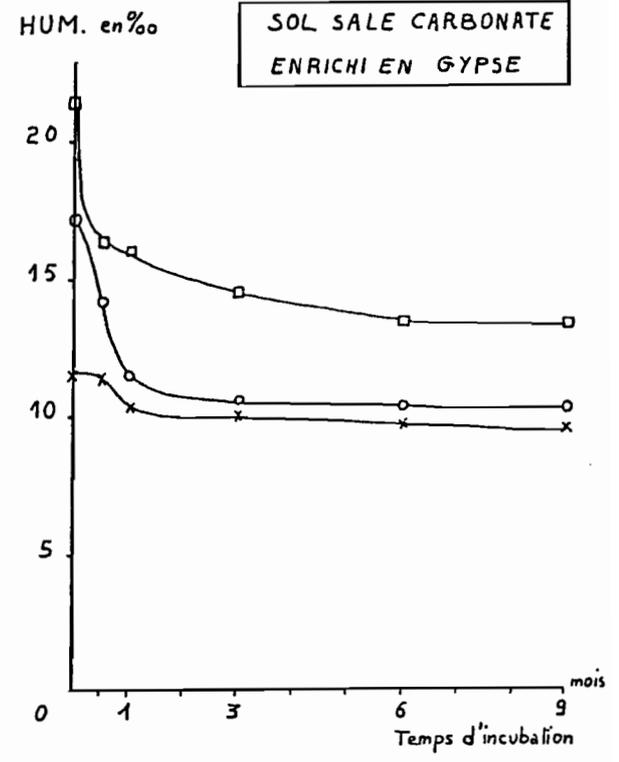
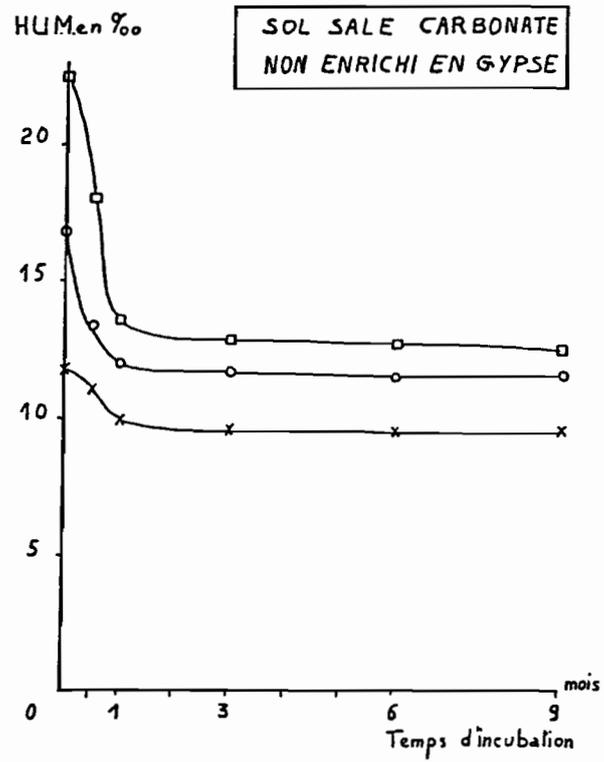
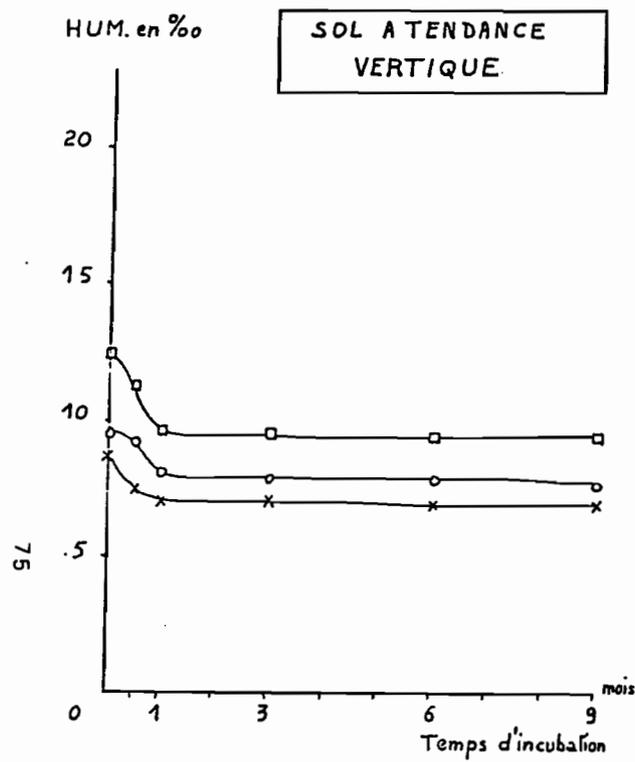
sol salé carbonaté + gypse > sol salé carbonaté > sol à tendance verticale.

La différence relative entre le premier et le dernier terme est de 3 % environ.

5.1.11 Les polysaccharides (POLYS) :

Les résultats sont illustrés par la figure n°26 avec les résultats analytiques en annexe T.19. On remarque deux types d'évolutions. Une diminution rapide et importante durant le premier mois d'incubation liée à l'intense activité microbienne qui agit à cette période de l'incubation. Après on a une évolution où l'on observe une sorte de stabilisation des POLYS. Passé le premier mois, les teneurs en POLYS restent constantes et différent peu en fonction des doses de paille apportées.

Toutefois le stock de POLYS qui reste présent est deux fois plus important pour le sol à tendance verticale que pour le sol salé carbonaté. Le gypse ne paraît pas avoir d'influence positive sur ce stock de POLYS stable. Contrairement à ce qui se passe pour l'humine stabilisée chimiquement par le gypse, il apparaît que ces POLYS sont plutôt stabilisés physiquement (modèle de JENKINSON et RAYNER 1977). Ce serait une caractéristique de ces sols indépendante des traitements qui ont été expérimentés.



Graphique : a)

b)

c)

Figure n°25 : Evolution de l'HUMINE en fonction du temps (HUM.).

Légende:  Echantillon Témoin non enrichi en paille

 Echantillon enrichi à 1% de paille

 Echantillon enrichi à 3% de paille

Il est intéressant de noter que durant le premier mois d'incubation, dans le sol salé carbonaté, il y a une dégradation plus rapide des polysaccharides et plus importante dans le cas du traitement avec gypse (graphique c), pour les échantillons enrichis en paille. Ceci ne s'observe pas sur les échantillons témoins. Cela inciterait à dire que l'apport de sulfate de calcium a un effet stimulant sur l'activité bactérienne, probablement par un ajout de bases échangeables, ce qui accentuerait davantage la biodégradation des polysaccharides.

5.1.12 Conclusion :

On remarque une nette diminution des matières organiques légères, due à une minéralisation intense et également à une séquestration d'une grande partie des résidus végétaux dans l'humine dès le début de l'expérience. Une partie importante des M.O.L. et de l'humine se minéralise au cours du premier mois d'incubation. Cette séquestration se fait par les argiles. C'est ce qui explique la nette différence entre l'humine du témoin et celle de l'échantillon à 3 % de paille (surtout sur le sol salé carbonaté non enrichi ou enrichi en gypse, figures n° 15 et 16).

On note également que pour chaque traitement, les acides fulviques globaux, diminuent progressivement dans tous les cas, alors que les teneurs en acides humiques globaux augmentent, notamment celles des acides humiques gris.

Ces observations nous incitent à penser que les acides fulviques se transforment en acides humiques qui deviennent de plus en plus stables avec le temps. Rappelons en particulier que les A.H.G. augmentent nettement à partir de un mois d'incubation dans les sols enrichis en paille.

La minéralisation du carbone organique est rapide au début, jusqu'à un mois d'incubation, puis se stabilise pour tous les échantillons. Mais pour le sol salé carbonaté avec ou sans gypse, la minéralisation est nettement plus rapide que dans le sol à tendance vertique. De toute façon, il y a une augmentation du taux de matière organique stabilisée (humine et A.H.G.) avec les apports de paille (1 % et 3 %).

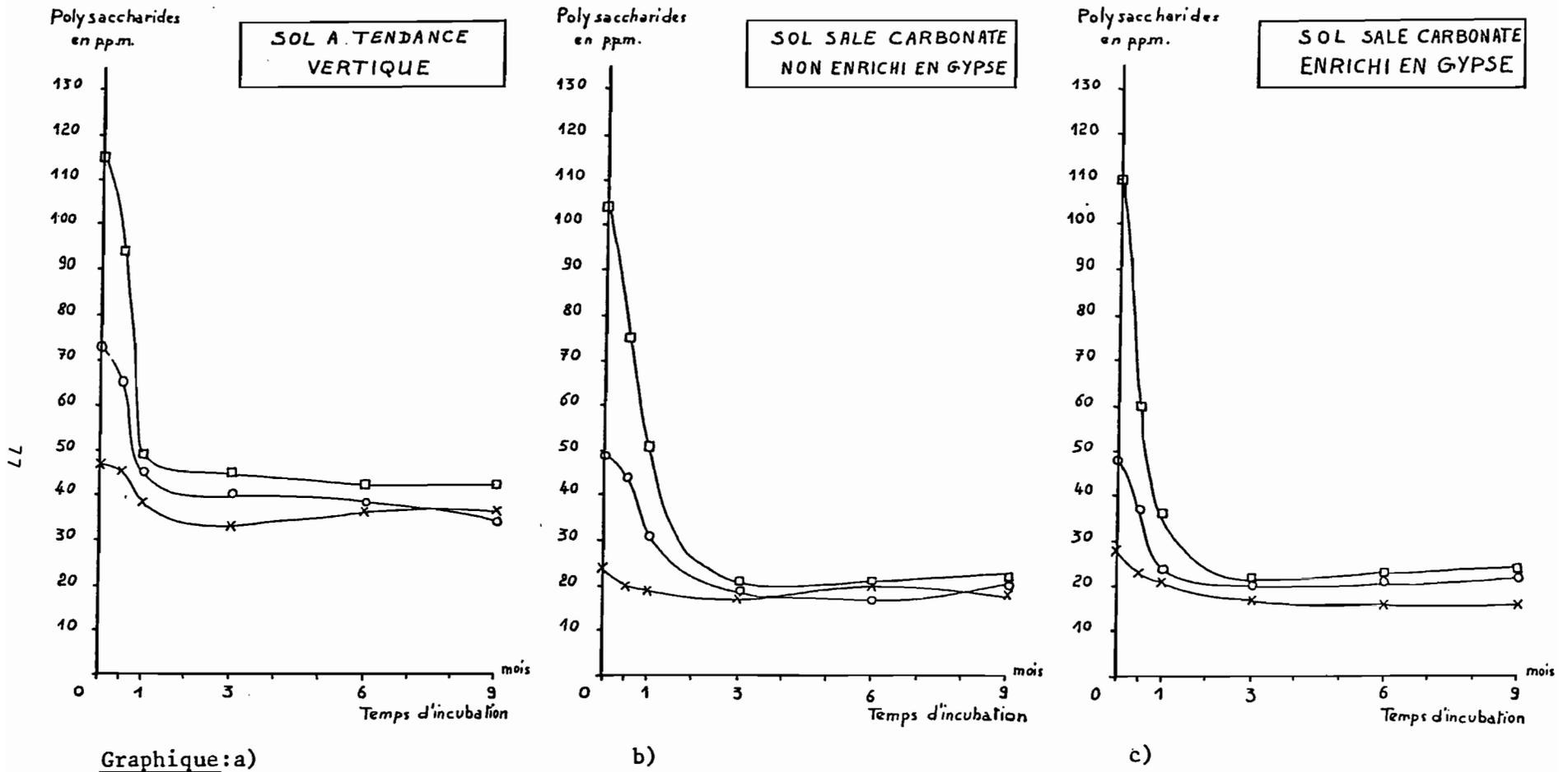


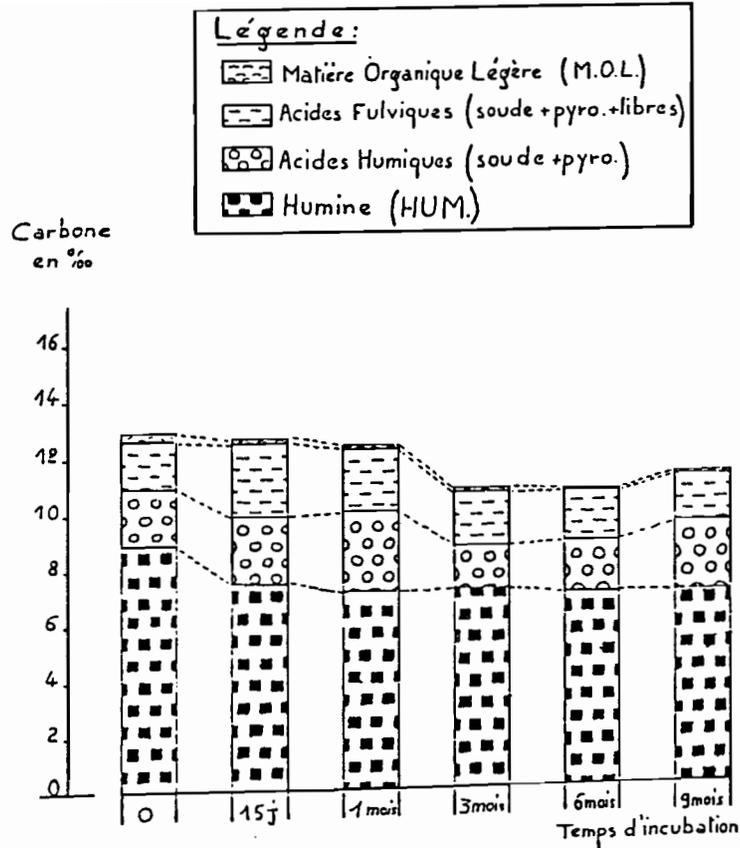
Figure n° 26 : Evolution des polysaccharides en fonction du temps.

Légende:

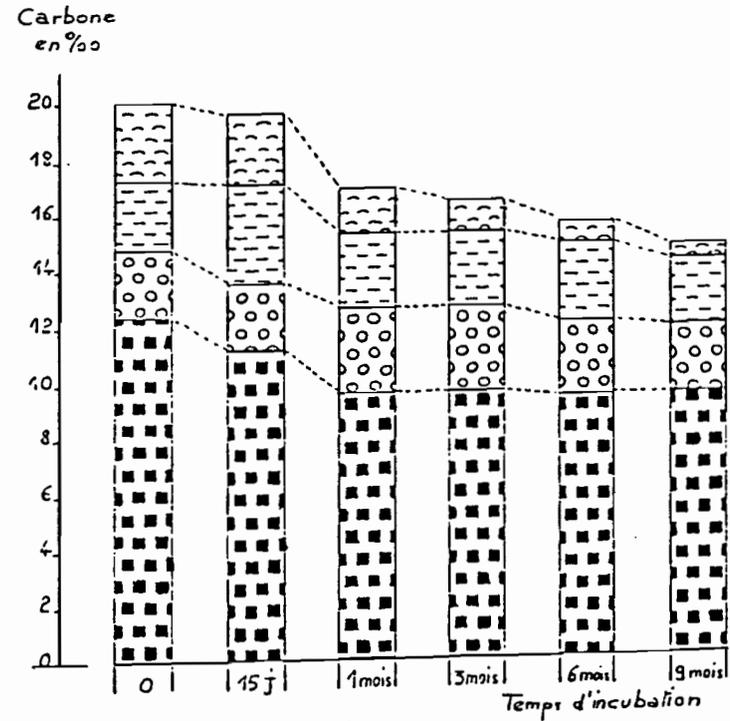
⊠—⊠ Echantillon Témoin non enrichi en paille

○—○ Echantillon enrichi à 1% de paille

□—□ Echantillon enrichi à 3% de paille.



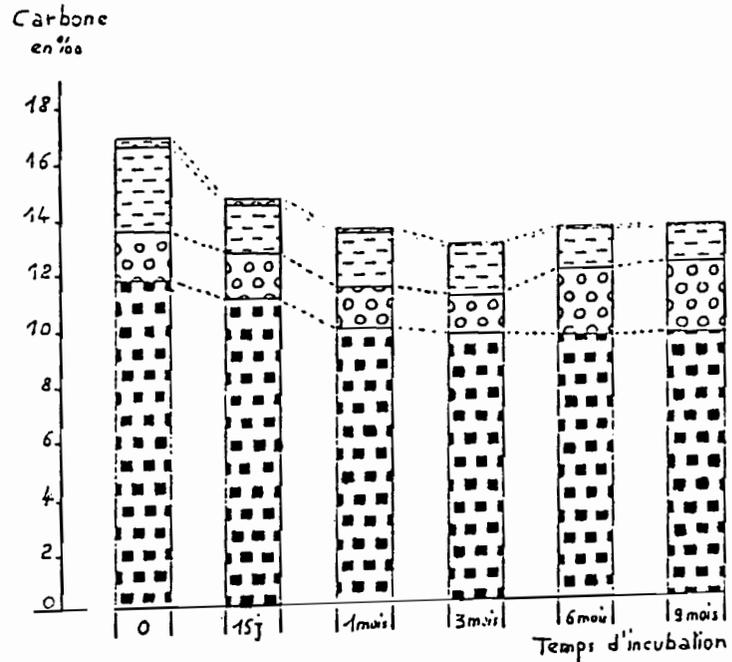
Graphique: a) non enrichi en paille.



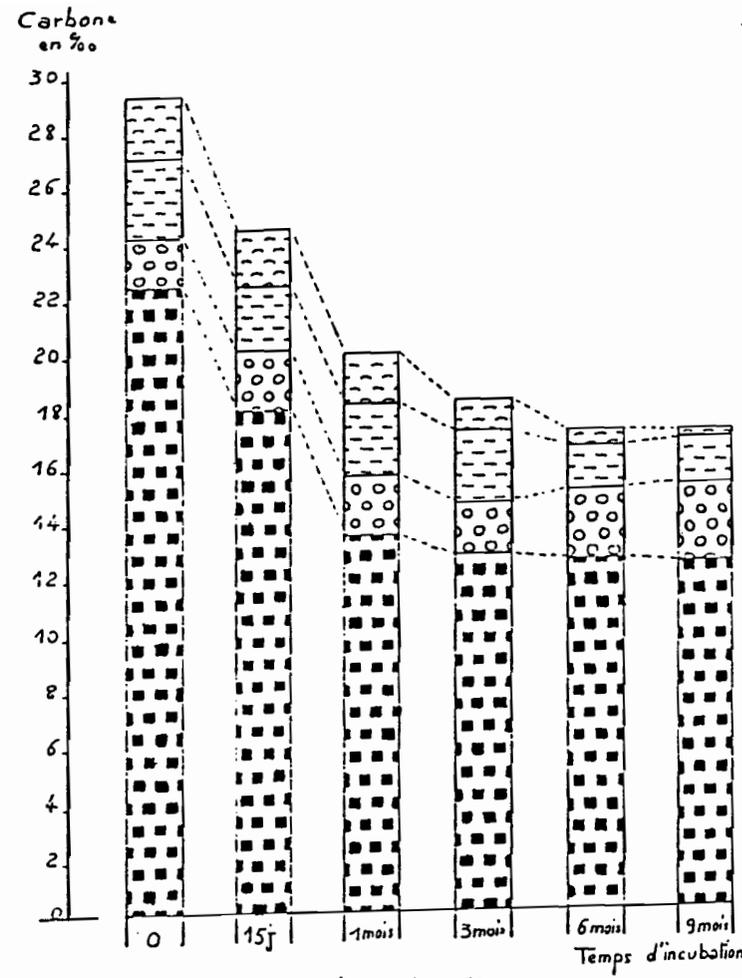
Graphique: b) enrichi à 3% de paille.

Figure n°27 : Sol à tendance vertique.
 Différence d'évolution des matières humiques.
 Echantillons enrichis à 3 % de paille - Echantillon témoin.

Légende:
 [diagonal lines] Matière Organique Légère (M.O.L.)
 [horizontal lines] Acides Fulviques (soude + pyro. + fibres)
 [circles] Acides Humiques (soude + pyro.)
 [checkered] Humine (HUM.)

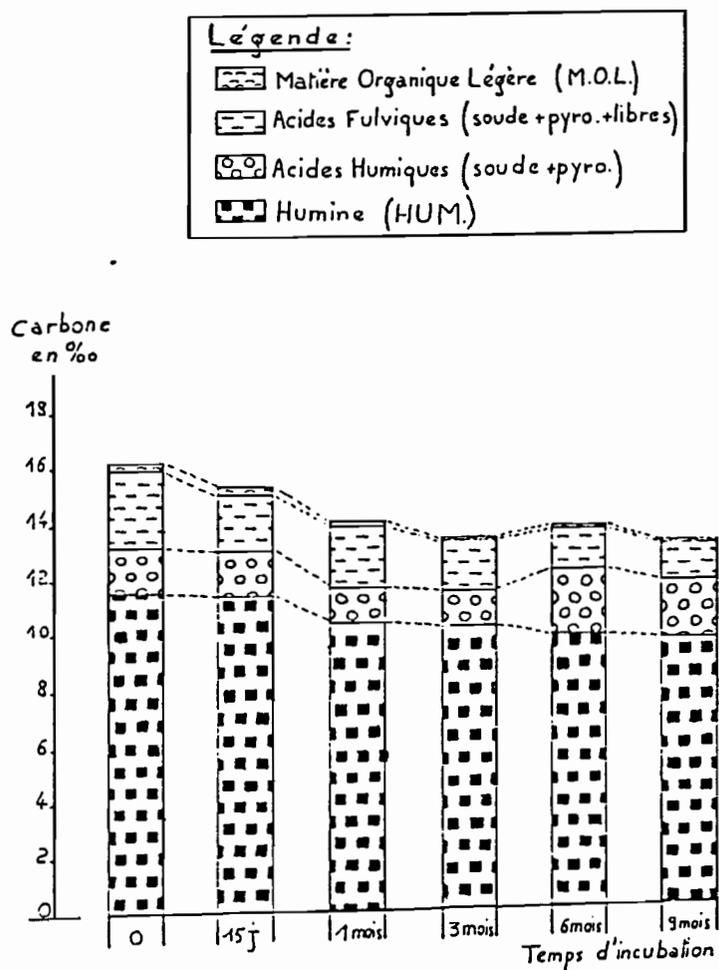


Graphique: a) non enrichi en paille.

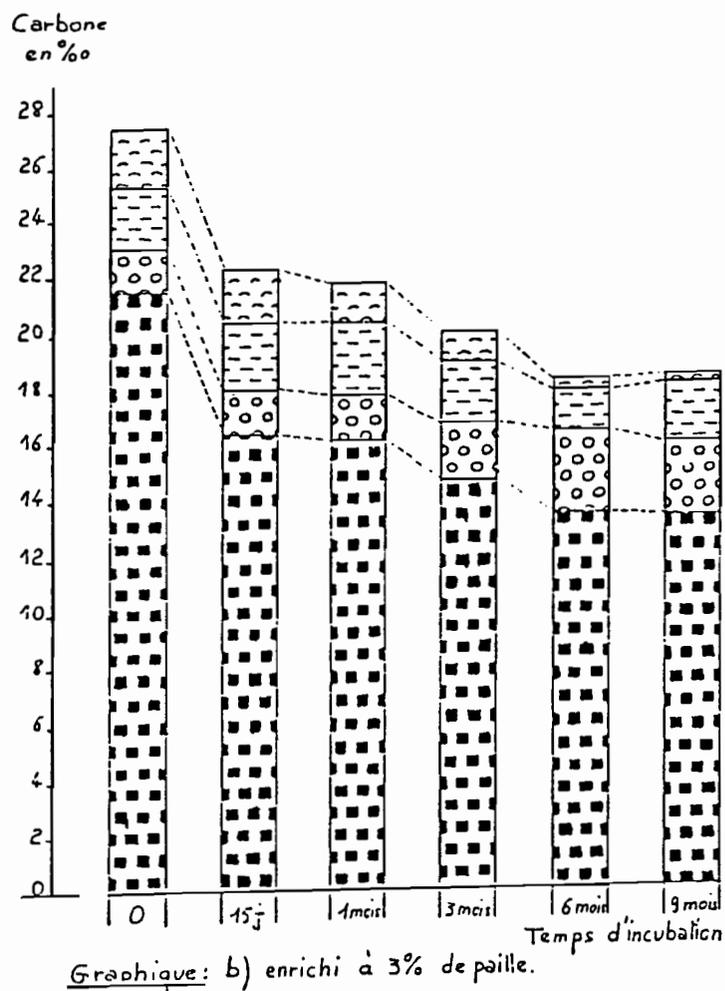


Graphique: b) enrichi à 3% de paille

Figure n° 28 : Sol salé carbonaté non enrichi en gypse.
 Différence d'évolution des matières humiques.
 Echantillons enrichis à 3 % de paille - Echantillon témoin.



Graphique: a) non enrichi en paille.



Graphique: b) enrichi à 3% de paille.

Figure n° 29 : Sol salé carbonaté enrichi en gypse.
 Différence d'évolution des matières humiques.
 Echantillons enrichis à 3 % de paille - Echantillon témoin.

5. 2 EVOLUTION DE L' AGREGATION :

Les différents tests de mesure du taux d'agrégats stables à l'eau après prétraitement au benzène et à l'alcool nous donnent des résultats très variables. Par exemple si l'on imbibe la terre avec de l'alcool, la stabilité des agrégats est augmentée quand on y ajoute de l'eau, car cette eau chasse l'alcool se trouvant dans la porosité sans brutalité, ce qui n'est pas le cas s'il n'y avait pas d'alcool (MONNIER 1965).

Si on imbibe par contre avec du benzène qui est un liquide non polaire et non miscible à l'eau, on obtient deux catégories de résultats selon que la terre est riche ou non en matière organique. Sur des terres pauvres en matière organique, le benzène diminue la stabilité des agrégats, car il se trouve compressé dans les pores des agrégats, et la force de pénétration de l'eau en augmentant la pression fait éclater les agrégats.

En présence de matière organique, la stabilité est moins modifiée, parfois même elle augmente. Cela peut s'expliquer par le fait que la matière organique fixe le liquide organique non polaire, et forme une couche autour de l'agrégat le rendant moins mouillable. Cette couche hydrophobe empêche l'humectation et donc la tension interfaciale devient faible, \cos devient négatif. D'après HENIN 1976, cet effet de protection est si net que même des terres sodiques, riches en matière organique, sont protégées par une préhumectation avec un liquide organique non polaire.

D'autre part pour une même terre, la comparaison du pourcentage d'agrégats obtenus après prétraitement à l'alcool et après prétraitement au benzène, permet de mettre en évidence le rôle joué par les matières organiques.

De notre expérimentation il ressort donc quatre types d'évolution que l'on retrouve presque sur tout les prétraitements (benzène, alcool et sans prétraitement). Cependant, on note quelques variations selon le type de sol, mais globalement on peut déceler 4 phases durant les 9 mois d'incubation qui sont :

- Phase n°1 : de zéro à 15 jours d'incubation, où l'on note une amélioration rapide mais éphémère de l'agrégation.
- Phase N°2 : de 15 jours à 1 mois d'incubation, où il y a une dégradation rapide et intense de l'agrégation.
- Phase n°3 : de 1 mois à 6 mois d'incubation, où l'agrégation a tendance à se stabiliser.
- Phase n°4 : de 6 mois à 9 mois d'incubation, où l'on observe une amélioration progressive et assez forte de l'agrégation.

5.2.1 Sol à tendance verticale :

L'évolution dans le temps de l'agrégation du sol à tendance verticale est représentée par la figure n°30 dont les résultats analytiques sont en annexe T.23.

-Phase n°1 : Amélioration rapide et éphémère de l'agrégation :

Elle se déroule du début à environ 15 jours d'incubation. On remarque que selon le prétraitement, l'évolution est différente en intensité, mais va dans le même sens d'amélioration pour les trois prétraitements. Pour le prétraitement avec le benzène (graphique a), l'augmentation est plus forte avec le prétraitement à l'alcool ou sans prétraitement, pour les échantillons enrichis à 3 % de paille. Pour le témoin, l'augmentation est nulle après le prétraitement au benzène.

A ce niveau, on voit l'importance de l'apport de la matière organique sur la stabilité des agrégats à travers ce prétraitement au benzène. Les variations de stabilité sont d'autant plus intenses que le prétraitement est plus violent. C'est le cas du prétraitement au benzène (seulement 10 % d'agrégats stables pour le témoin). Le prétraitement à l'alcool provoque une protection contre l'action de l'eau (45 % d'agrégats dans le témoin), d'où de faibles variations.

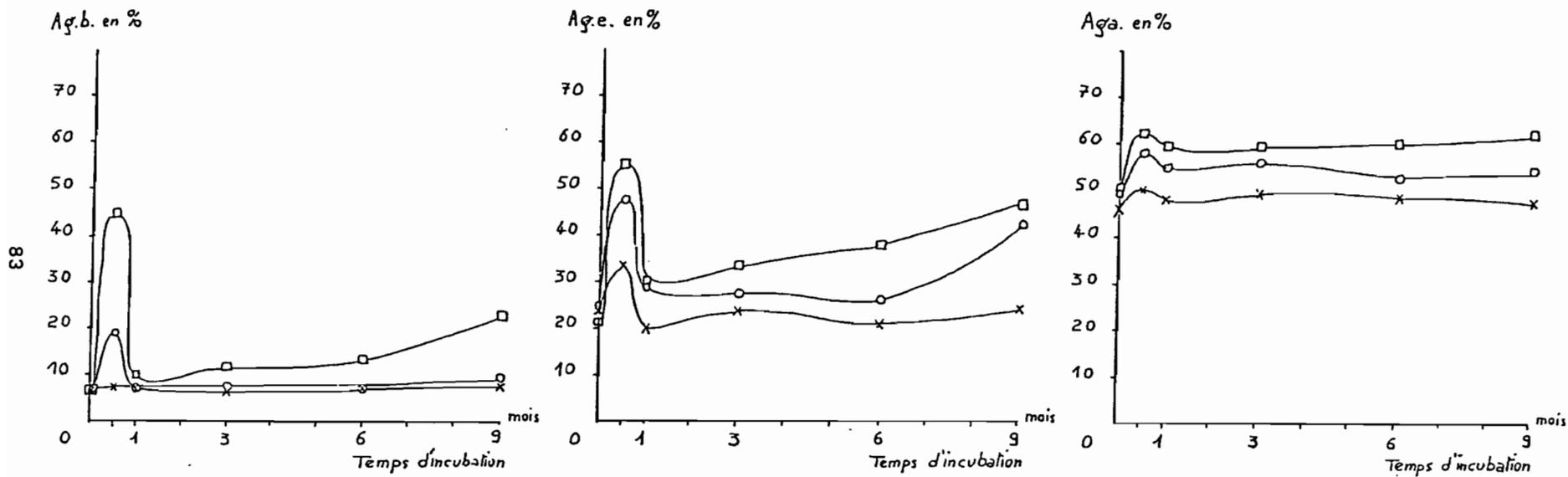
-Phase n°2 : Dégradation rapide et intense :

Elle se développe approximativement entre le quinzième jour d'incubation et 1 mois d'incubation. Si l'on regarde les graphiques a, b et c, en particulier le a correspondant au prétraitement au benzène, on remarque une sorte de symétrie presque parfaite entre la première phase d'amélioration et cette phase de dégradation. De telle sorte qu'à un mois d'incubation, l'on revient presque au même niveau qu'au début de l'incubation. Cette symétrie ne se reflète que sur les agrégats stables après prétraitement au benzène.

Il y a un parallélisme entre la biodégradation des matières organiques légères, de l'humine et des polysaccharides avec la dégradation des agrégats durant cette phase. Dans la première phase, ils évoluent dans des sens inverses (augmentation des taux d'agrégats stables et diminution brutale des taux de carbone total, de M.O.L., des polysaccharides et de l'humine. Cela veut dire que la relation entre la biodégradation des résidus végétaux et le rôle des matières organiques dans l'agrégation est assez complexe à ce niveau, et le bilan des réactions n'est pas le même dans les deux phases.

En fait dans une première phase, la disparition des produits fermentescibles provoque l'apparition d'autres matières comme les A.F.P. ou des gels microbiens. Puis dans une deuxième phase l'ensemble des constituants biodégradables disparaît.

SOL A TENDANCE
VERTIQUE



Graphique a) Pré-traitement au benzène (Ag.b) b) sans pré-traitement (Ag.e.) c) pré-traitement à l'alcool (Ag.a.)

Figure n°30 : Evolution des Agrégats stables
à l'eau en fonction du temps.

Légende:



Echantillon Témoin
non enrichi en paille



Echantillon enrichi
à 1% de paille



Echantillon enrichi
à 3% de paille

-Phase n°3 : Stabilisation de l'agrégation :

Elle se déroule entre le premier mois et le sixième mois d'incubation. On remarque que dans la plupart des cas, les taux d'agrégats stables restent constants. Cependant pour les échantillons enrichis à 3 % de paille, on observe une augmentation progressive et lente pour les prétraitements au benzène et surtout sans prétraitement.

-Phase n°4 : Amélioration secondaire de l'agrégation :

Elle se développe à partir du sixième mois d'incubation. Elle est peu visible dans ce sol à tendance verticale, mais dans certains cas, comme les échantillons enrichis à 3 % de paille pour les prétraitements au benzène et sans prétraitement, on observe une augmentation assez nette. Ce processus est sans doute lié au durcissement des petits agrégats au cours du temps par la dessiccation. Cette augmentation est inexistante dans le cas du prétraitement à l'alcool, car le test de destruction est insuffisant.

Dans cette phase et la phase n°3, le niveau de stabilisation (agrégats stables sans prétraitement) ou d'augmentation (agrégats stables après prétraitement à l'alcool et au benzène) des taux d'agrégats diffère suivant la dose de paille apportée. Il est meilleur avec les doses de paille élevées.

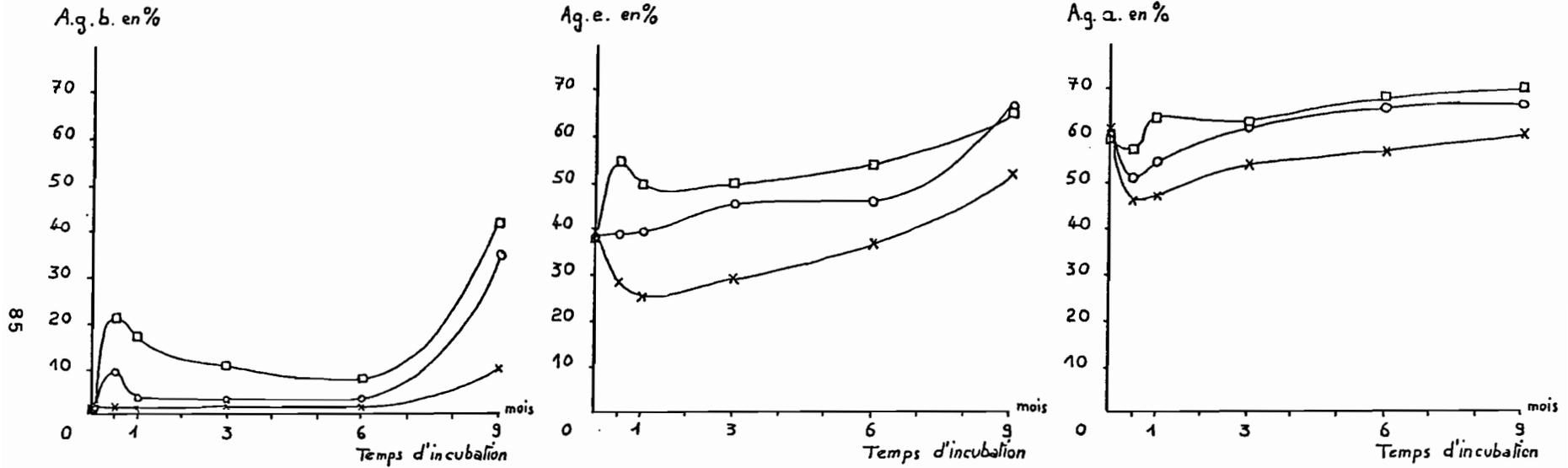
5.2.2 Sol salé carbonaté (non enrichi en gypse) :

L'évolution de l'agrégation représentée par la figure n°31 dont les résultats analytiques sont en annexe T.24, nous révèle un comportement assez différent du sol précédent. En ce sens que les quatre phases reconnues précédemment pour le sol à tendance verticale, ne s'observe pas dans ce cas, notamment pour le prétraitement au benzène (graphique a). On note une légère augmentation durant les quinze premiers jours (première phase) mais entre le quinzième jour et le premier mois, la dégradation n'est pas aussi intense et brève, mais plutôt lente et progressive.

Les agrégats formés durant la première phase, semblent résister plus longtemps à la dégradation, ceci sans doute grâce à la présence d'ions calcium en quantité élevée. La dégradation à cette époque, est probablement liée à la diminution de l'activité bactérienne due à l'épuisement des composés énergétiques consommés par la micro-flore hétérotrophe.

Entre 1 mois et 6 mois d'incubation, on observe toujours cette stabilisation des taux d'agrégats stables. A partir du sixième mois d'incubation, l'amélioration des agrégats devient nettement plus forte et rapide, à tel point que l'on dépasse largement le taux d'agrégats stables formés au cours de la première phase.

SOL SALE CARBONATE
NON ENRICHI EN GYPSE



Graphique: a) pré-traitement au benzène (Ag.b) b) sans pré-traitement (Ag.e) c) pré-traitement à l'alcool (Ag.a)

Figure n°31 : Evolution des Agrégats stables à l'eau en fonction du temps.

Légende:



Echantillon Témoin
non enrichi en paille



Echantillon enrichi
à 1% de paille



Echantillon enrichi
à 3% de paille

5.2.3 Sol salé carbonaté enrichi en gypse :

La figure n°32 dont les résultats analytiques sont en annexe T.25, montre que les quatre phases sont assez nettes, surtout pour les échantillons sans prétraitement et après prétraitement au benzène. Il ressort des différences assez conséquentes entre le sol salé carbonaté témoin (sans apport de gypse) et le sol salé carbonaté enrichi en gypse.

-Phase n°1 : Amélioration rapide et éphémère de l'agrégation :

La comparaison des graphiques a, représentant les agrégats stables après prétraitement au benzène, avec apport de gypse (figure n°32) ou sans apport de gypse (figure n°31), montre que l'apport de gypse améliore d'une manière très nette l'agrégation durant les premiers quinze jours de l'incubation. Celle-ci atteint presque 60 % d'agrégats stables pour les échantillons enrichis à 3 % de paille, alors que pour le témoin (sans paille), elle n'atteint que 20 % d'agrégats stables.

Par contre l'influence du gypse est beaucoup plus limitée pour les agrégats stables sans prétraitement et après prétraitement à l'alcool. Ceci indique que la matière organique et le calcium jouent un rôle important dans cette phase d'amélioration de l'agrégation.

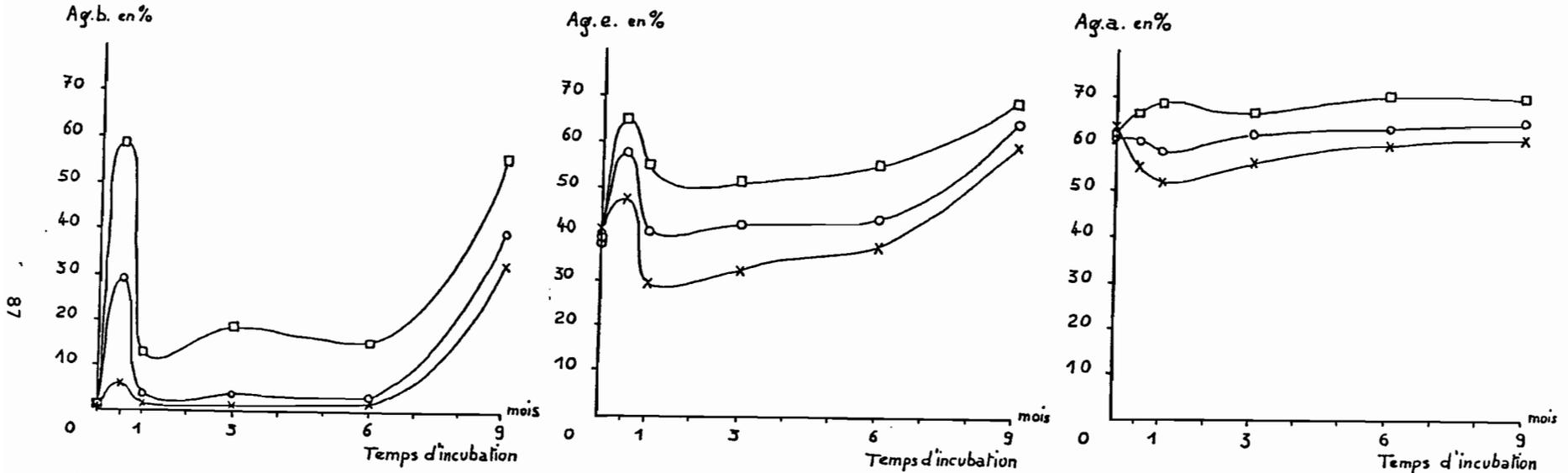
La présence du gypse interfère et amplifie l'action de la matière organique provoquant une intense activité microbienne qui agit à son tour sur la stabilité des agrégats. Cette interaction entre le calcium et la matière organique pourrait être liée au rôle du calcium dans la stabilisation des complexes argilo-humiques. A ce niveau d'incubation, on note que l'évolution du carbone organique, des matières organiques légères et des acides fulviques libres évoluent de la même manière, que ce soit pour le sol sans apport de gypse ou avec apport de gypse.

Il y a tout de même pour le sol salé avec apport de gypse une nette augmentation des acides fulviques extractibles au pyrophosphate de sodium (A.F.P.), ce qui n'est pas observé dans le cas du sol sans apport de gypse. Ces polysaccharides contenus dans ces A.F.P. auraient peut être une action bénéfique sur la stabilité des agrégats.

-Phase n°2 : Dégradation de la stabilité des agrégats :

Au cours de cette phase, on observe une dégradation très importante des agrégats formés au cours de la phase précédente. La diminution des agrégats stables après prétraitement au benzène (Agb.) et sans prétraitement (Age.), dans le sol salé carbonaté, est plus marquée avec gypse que sans gypse. Si l'on n'atteint pas le niveau de départ pour les Agb, on descend nettement plus bas pour les Age. dans le cas du témoin (sans paille). Il y a donc un léger reliquat de ces deux premières phases, en particulier pour la dose à 3 % de matière organique.

SOL SALE CARBONATE
ENRICHIS EN GYPSE



Graphique: a) Pré-traitement au benzène (Ag.b) b) sans pré-traitement (Ag.e.) c) pré-traitement à l'alcool (Ag.a.)

Figure n°32 : Evolution des agrégats stables à l'eau en fonction du temps.

Légende:



Echantillon Témoin non enrichi en paille



Echantillon enrichi à 1% de paille



Echantillon enrichi à 3% de paille

Pour le prétraitement à l'alcool, l'évolution ne donne pas d'indications précises particulières, si ce n'est qu'il y a une dégradation pour le témoin (sans apport de paille) au cours du premier mois d'incubation. Il y a une stabilisation pour l'échantillon à 1 % de paille et une légère amélioration pour l'échantillon à 3 % de paille. Nous constatons que le prétraitement à l'alcool protège les agrégats qui se maintiennent à un taux élevé (50 à 70 % d'agrégats stables).

-Phase n°3 : Stabilisation de l'agrégation :

Elle évolue de 1 mois à 6 mois d'incubation. La stabilisation est assez nette, surtout pour le prétraitement au benzène (graphique a). Pour l'échantillon sans prétraitement (graphique b), on observe une légère amélioration progressive. On a vu précédemment que les acides humiques gris augmentent considérablement durant cette période. Leur rôle serait bénéfique à long terme, mais leur action sur cette stabilisation peut intervenir également.

-Phase n°4 : Amélioration secondaire de l'agrégation :

A partir du sixième mois, on observe de très forte amélioration de la stabilité des agrégats sans prétraitement (graphique b) et surtout après prétraitement au benzène (graphique a).

Avec ou sans gypse, et quel que soit le taux de matière organique, cette amélioration s'observe aussi pour l'échantillon sans prétraitement, mais nettement moins importante. Pour l'échantillon avec prétraitement à l'alcool, l'évolution a suivi la troisième phase, avec une amélioration progressive et lente depuis un mois d'incubation.

5.2.4 Comparaison des taux d'agrégats stables après prétraitement au benzène (Agb) :

Nous allons traiter cette évolution à part, car c'est le prétraitement qui illustre le mieux le comportement et l'action de la matière organique sur la stabilité des agrégats. Le test de destruction des agrégats, par l'action du benzène est maximum et met en évidence les forces de stabilisation les plus importantes (matière organique et argiles).

Cela est représenté par les graphiques de la figure n°33. Pour ce prétraitement, on voit bien les quatre phases d'évolution décrites précédemment. Très brièvement, nous allons donc mettre en évidence les principales différences d'évolution entre les trois cas, au cours de chaque phase.

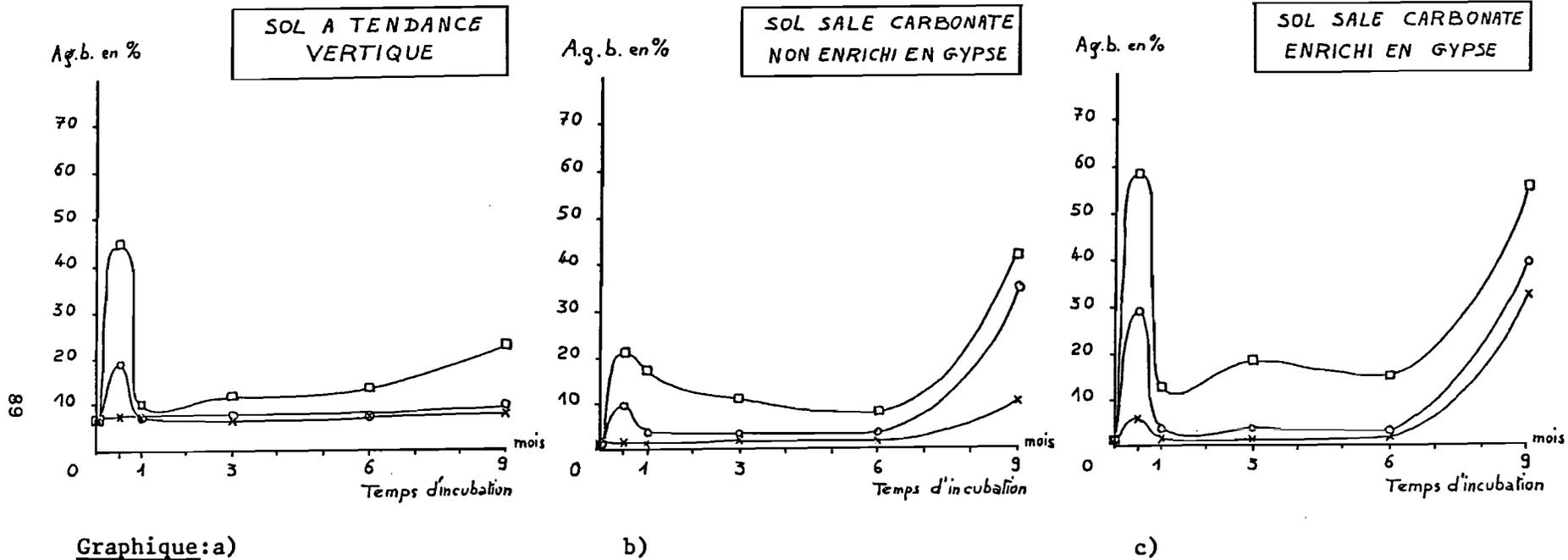


Figure n° 33 : Evolution du taux d'agrégats stables après pré-traitement au benzène (a.g.b.)

Légende:

⊠-x-x Echantillon Témoin non enrichi en paille

⊠-o-o Echantillon enrichi à 1% de paille

⊠-□-□ Echantillon enrichi à 3% de paille

-Amélioration rapide et brève de l'agrégation :

Pour le témoin (sans apport de paille), elle est nulle dans le cas du sol à tendance verticale (graphique a) et le sol salé carbonaté sans apport de gypse (graphique b), mais il y a une légère amélioration pour le sol salé carbonaté avec apport de gypse (graphique c). Pour 1 % et 3 % de paille, le maximum d'amélioration s'observe avec le sol salé carbonaté avec apport de gypse, et le minimum d'amélioration est noté sur le sol salé carbonaté sans apport de gypse. Le sol à tendance verticale est intermédiaire avec une amélioration nette. L'évolution de la structure se résume donc selon cet ordre décroissant :

Sol salé carbonaté + gypse > sol à tendance verticale > sol salé carbonaté.

-Dégradation de la structure des agrégats :

Elle présente une symétrie parfaite pour le sol à tendance verticale (graphique a). Par contre pour le sol salé carbonaté enrichi en gypse, la dégradation est moins intense que l'amélioration du début. Le phénomène s'observe davantage pour le sol salé carbonaté sans gypse, où l'on note une dégradation lente et régulière, alors que dans les autres sols, elle est brève et rapide. L'évolution décroissante est donc la suivante, du moins rapide au plus rapide :

Sol salé carbonaté > sol salé carbonaté + gypse > sol à tendance verticale.

-Stabilisation de l'agrégation :

En ce qui concerne les échantillons témoins (sans apport de paille), on note que les taux d'agrégats stables après le prétraitement au benzène restent faibles et constants, pour les trois types de sol, du premier mois au sixième mois d'incubation. On observe cependant pour les échantillons enrichis à 3 % de paille, une augmentation lente du taux d'agrégats stables pour le sol à tendance verticale, et un maintien à un taux élevé pour le sol salé carbonaté enrichi en gypse.

-Amélioration secondaire de l'agrégation :

Concernant le sol à tendance verticale, elle est nulle pour le témoin (sans paille) et l'échantillon à 1 % de paille, alors qu'elle est assez nette pour l'échantillon à 3 % de paille. Pour le sol salé carbonaté, elle est très importante surtout pour les échantillons à 1 % et 3 % de paille. Pour le sol salé carbonaté enrichi en gypse, cette amélioration est encore plus remarquable, car même pour le témoin, elle est très importante. Avec l'échantillon à 3 % de paille, elle

atteint même le niveau de la première amélioration à 15 jours d'incubation. On peut donc résumer cette évolution de la consolidation secondaire des agrégats par ordre décroissant de la façon suivante :

Sol salé carbonaté + gypse > sol salé carbonaté > sol à tendance verticale.

5.2.5 Variation de la dispersion et de l'instabilité structurale :

-La dispersion (Argile + Limon max.) :

Les taux de dispersion maximum correspondent dans le cas de ces sols, aux taux d'argile + limon dispersés après prétraitement au benzène. Ils sont représentés par la figure n°34 avec les résultats analytiques en annexe T.26. Elle suit globalement mais d'une façon symétrique, une évolution inverse de celle des agrégats stables après prétraitement au benzène. On remarque tout de même que le taux d'argile + limon dépasse largement le taux enregistré au début de l'incubation. Le taux d'Agb. reste pratiquement stable (voir échantillon témoin du sol salé carbonaté avec ou sans gypse).

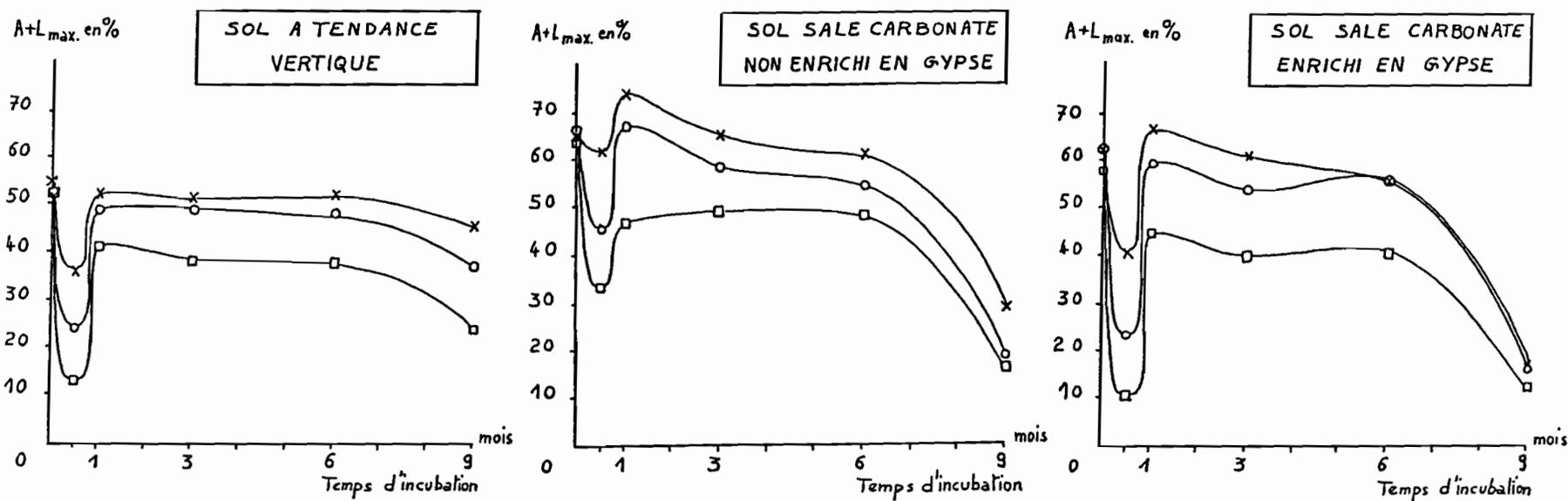
Entre 1 mois et 3 mois d'incubation, alors que le taux d'Agb reste stable, le taux de dispersion diminue, et cette amélioration pourrait être liée à la matière organique de plus en plus stable et polymérisée tels que les acides humiques gris que l'on a observé en progression à cette période d'incubation. D'ailleurs, même durant la quatrième phase, il y a une diminution importante de la dispersion des éléments fins, confirmant la consolidation des agrégats.

-Instabilité structurale (Is) :

L'évolution de Is suit pratiquement celle des taux de dispersion, qui est l'un des principaux facteurs pour calculer l'indice Is. La figure n°35 dont les résultats analytiques sont en annexe T.27, montre une évolution globale presque identique à celle des taux de dispersion (A + L). On observe une diminution importante mais éphémère de Is qui correspond à l'augmentation de la stabilité des agrégats. L'évolution de Is diffère pour le sol à tendance verticale et pour le sol salé carbonaté avec ou sans gypse. L'influence des doses de paille reste pratiquement constante mais à des niveaux de Is très différents.

Pour le sol à tendance verticale, l'indice Is diminue très rapidement au cours des quinze premiers jours d'incubation, puis augmente assez vite durant la deuxième quinzaine de jours. Entre le premier mois et le sixième mois il y a une stabilisation, suivi d'une diminution assez importante à partir du sixième mois.

Pour le sol salé carbonaté, il y a une dégradation de la structure au cours du premier mois si l'on n'apporte pas de matière organique. Pour le même sol avec un apport de gypse, on note une légère amélioration même sans apport de matière organique. Inversement



Graphique: a)

b)

c)

Figure n° 34 : Evolution du taux d'Argile + Limon Maximum en fonction du temps ($A+L_{max.}$)

Légende:

 Echantillon Témoin non enrichi en paille

 Echantillon enrichi à 1% de paille

 Echantillon enrichi à 3% de paille

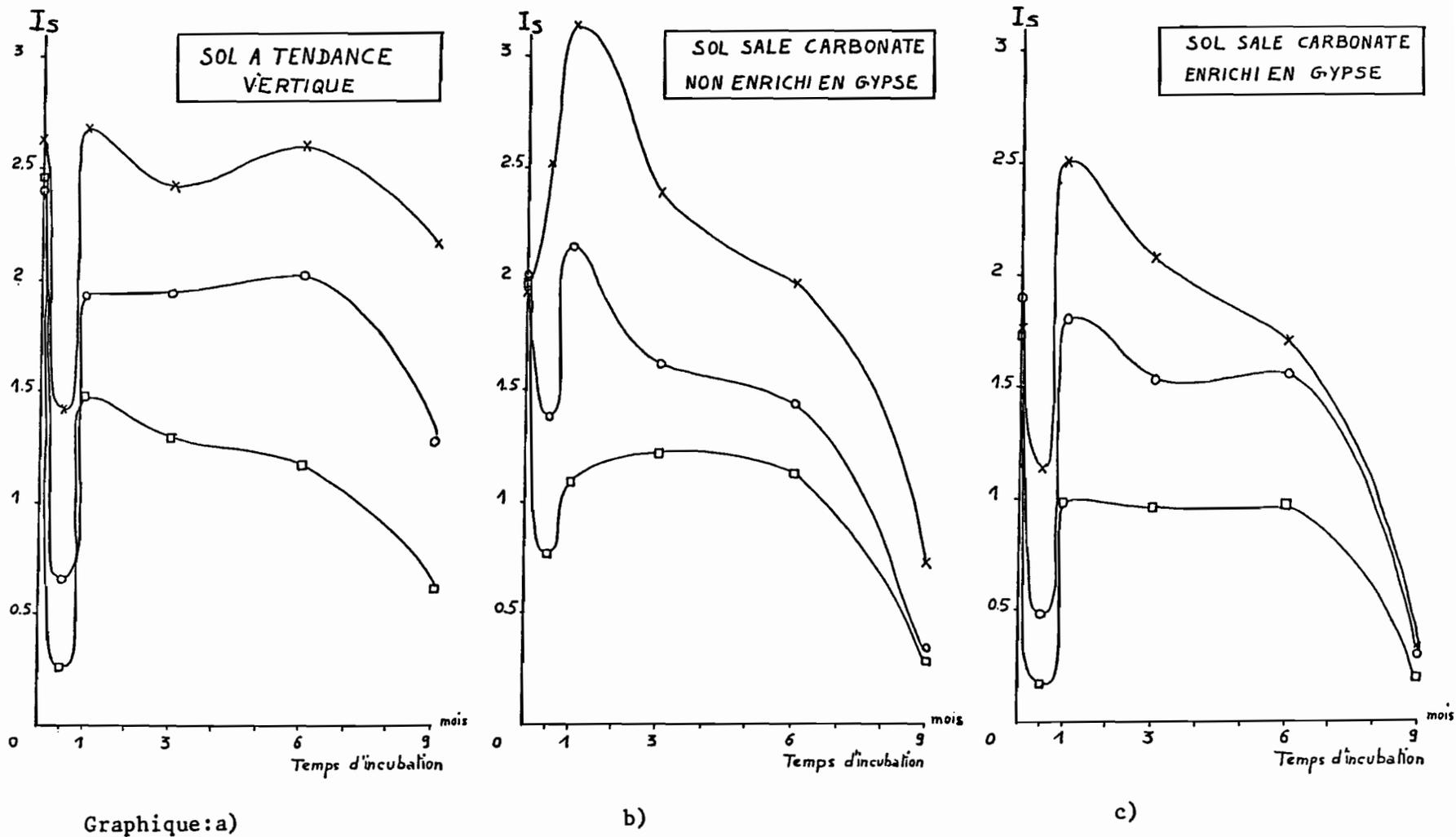


Figure n°35 : Evolution de l'indice d'instabilité structural en fonction du temps (I_s).

Légende: x-x Echantillon Témoin non enrichi en paille

o-o Echantillon enrichi à 1% de paille

□-□ Echantillon enrichi à 3% de paille

avec de la paille, après l'amélioration brève de I_s pendant les premiers quinze jours, il y a une augmentation de l'instabilité à la fin du premier mois, d'autant plus poussée que la dose de paille est plus faible. Mais entre le premier et le sixième mois, on remarque que l'indice I_s s'améliore avec la dose de matière organique et que pour le témoin (sans paille), il reste stable.

A partir du sixième mois, il y a une nette amélioration pour les trois échantillons, enrichis ou non en paille. L'amélioration de la structure entre le sixième et le neuvième mois, serait donc presque indépendante de la dose de paille apportée et de la présence du gypse. Il pourrait y avoir aussi l'influence du régime alterné d'humectation-dessiccation qui provoque une péctisation irréversible des minéraux argileux et une polymérisation des composés humiques (Acides humiques gris), qui jouent le rôle de ciment et entraînent cette amélioration progressive de l'état structural.

Le témoin sans ajout de paille, s'améliore peu durant la quatrième phase pour le sol à tendance vertique, alors que pour le sol salé carbonaté, il rejoint presque l'échantillon à 3 % de paille, en particulier avec un apport de gypse. Cela est probablement dû à la diminution de la dispersion, qui est particulièrement sensible à l'action du calcium.

5.3 EVOLUTION SIMULTANEE DES CARACTERISTIQUES DES CONSTITUANTS ET DES PROPRIETES PHYSIQUES :

Nous avons essayé de mettre en parallèle l'évolution dans le temps, d'une part des taux d'agrégats stables, d'autre part des caractéristiques chimiques de ces sols et en particulier des composés organiques. Ceci afin de mettre en évidence les interactions qui existent manifestement entre ces processus évolutifs.

5.3.1 Relation dans le temps entre agrégats stables après prétraitement au benzène (Agb.) et la matière organique :

-Agb en relation avec le carbone organique :

En se référant aux figures correspondantes (n°14 et n°33), si l'on fait un parallèle entre les deux évolutions dans le temps, on peut définir deux grands processus d'évolution :

- Le premier bref et intense sur un mois d'incubation.
- Le deuxième lent et progressif entre 1 mois et 9 mois d'incubation.

Dans ces deux processus d'évolution, différentes interactions s'établissent entre la matière organique et les agrégats stables.

a) Premier processus d'évolution :

A ce niveau la diminution très rapide de la matière organique est liée à "l'explosion" microbienne créée par l'incorporation de paille et la réhumectation du sol suivi par l'installation du milieu dans des conditions idéales d'humidité et de température. Ce processus débouche sur une très forte biodégradation des composés organiques, soit préexistants dans le sol, soit apportés par la paille et une formation de composés organiques secondaires relativement labiles, qui agissent fortement sur l'agrégation en cette période d'incubation.

b) Deuxième processus d'évolution :

A ce stade le taux de carbone organique semble rester stable, alors que l'on observe une amélioration des taux d'agrégats stables, notamment après prétraitement au benzène. De ce fait ce n'est pas la quantité totale des composés organiques qui influe sur la structure mais comme nous le verrons, il y a une réorganisation et une polymérisation des composés organiques (acides humiques gris en particulier) qui paraissent améliorer lentement l'agrégation.

-Agb en relation avec les fractions humiques :

Agb en relation avec les matières organiques légères :

La diminution très importante des M.O.L. durant les 15 premiers jours d'incubation, peut déboucher sur la formation de produits de décomposition, ou de biosynthèse (mycéliums fongiques par exemple) qui utilisent ces produits de décomposition, en particulier les polysaccharides, et qui peuvent être considérés comme responsables de l'amélioration de l'agrégation enregistrée durant cette période, en tant que source énergétique pour la microflore.

Ces produits de décomposition se trouveraient à leur tour consommés par d'autres colonies bactériennes, vers la fin du premier mois d'incubation, ce qui fait chuter les taux d'agrégats stables. Nos expériences confirment que la présence des polysaccharides microbiens jouerait un rôle important au cours des quinze premiers jours d'incubation (BACHELIER G. 1966).

Agb en relation avec l'humine :

La diminution rapide de l'humine, au cours du premier mois d'incubation, semble montrer qu'une partie de l'humine est biodégradable. Cette diminution est assez analogue à celle des matières organiques légères. Une partie des matières organiques de la paille est séquestrée rapidement mais reste biodégradable. Les produits d'hydrolyse de ces matières organiques contribueraient probablement au processus initial d'amélioration de l'agrégation au même titre que ceux provenant de la décomposition des matières organiques légères.

Les teneurs en humine se sont stabilisées à différents niveaux, et les variations des taux d'agrégation qui interviennent par la suite ne sont pas liées aux variations des taux d'humine stabilisée. Cette stabilisation s'observe beaucoup plus avec le sol salé carbonaté enrichi en gypse qu'avec le sol salé sans apport de gypse et encore moins avec le sol à tendance vertique.

Agb en relation avec les acides fulviques libres :

L'action possible des acides fulviques libres sur l'amélioration des agrégats stables après prétraitement au benzène, se ferait indirectement par la présence de certains polysaccharides existants dans cette fraction au début de l'incubation, durant les 15 premiers jours. Ces composés organiques facilement biodégradables peuvent provoquer une amélioration transitoire de l'agrégation.

Agb en relation avec les acides fulviques extraits par le pyrophosphate de sodium et la soude :

Les acides fulviques, surtout les A.F.P. augmentent au début de l'expérience et peuvent contribuer à améliorer indirectement la stabilité des agrégats par les polysaccharides qu'ils renferment, et qui sont une source d'énergie pour les bactéries. Mais ces acides fulviques qui diminuent par la suite se transformeraient en acides humiques (polymérisation), qui augmentent à cette période et qui agiraient plus durablement sur l'agrégation.

Il y a aussi l'action des polymères anioniques (WALLACE et All. 1986), qui auraient une action importante dans le cas du sol salé carbonaté, surtout en présence des polysaccharides.

Agb en relation avec les acides humiques extraits au pyrophosphate de sodium et la soude :

Pour les A.H.S. nous ne notons aucun changement important des teneurs ce qui paraît montrer que cette fraction a peu d'influence sur l'agrégation. Par contre pour les A.H.P. il y a une forte augmentation à long terme qui pourrait avoir un effet positif sur l'agrégation.

La transformation des acides fulviques en acides humiques et l'augmentation lente du taux d'acides humiques se produisent presque en même temps que le processus d'amélioration lente du taux d'agrégation. Il y a un certain décalage entre la formation des acides humiques et l'agrégation, car les "ciments" humiques doivent avoir le temps de se transformer et produire la consolidation ultérieure des complexes argilo-humiques préformés.

Pour le sol à tendance vertique, l'action des acides humiques paraît moins importante, sauf pour les échantillons enrichis avec des doses importantes de paille (3 %) .

-Agb en relation avec les polysaccharides :

Nos observations confirment la cinétique de décomposition des polysaccharides et la relation avec l'évolution de l'agrégation. On remarque que les polysaccharides ont une évolution en deux temps, alors que les agrégats stables après prétraitement au benzène évoluent en quatre temps.

Les polysaccharides ont surtout un rôle prépondérant durant la première phase de l'incubation après transformation. En effet le rôle joué par les polysaccharides est surtout indirect, en ce sens qu'ils constituent essentiellement une source énergétique facilement disponible pour l'activité microbienne pendant le premier mois d'incubation.

La diminution des polysaccharides à cette période traduit la présence d'une biomasse microbienne hétérotrophe importante. Il est probable que cette biomasse diminue à la fin du premier mois par suite de l'épuisement des ressources énergétiques facilement biodégradables. L'augmentation des taux d'Agb entre le temps zéro et 15 jours d'incubation est donc en relation directe avec l'évolution croissante de l'activité biologique.

La diminution des polysaccharides durant le premier mois de l'incubation, semble donc montrer que ces composés organiques n'agissent pas uniquement comme agents de l'agrégation, mais constituent surtout une réserve énergétique pour la micro-flore qui joue un rôle majeur dans le processus initial rapide et bref de l'agrégation. Lorsque les polysaccharides biodégradables sont épuisés, la micro-flore diminue ainsi que l'agrégation.

Le maximum d'agrégats stables observé à 15 jours d'incubation, correspond à l'optimum de l'activité microbienne qui serait la cause principale de l'augmentation de l'agrégation, par la fabrication de mucus bactérien intervenant dans la consolidation des agrégats par leur action anti-mouillante (BACHELIER G. 1966, MONNIER 1965, DOMMERGUES et MANGENOT 1970). De plus il y a la fabrication de filaments mycéliens qui entourent les agrégats dans un réseau de mycélium protégeant les agrégats contre l'action de l'eau.

La diminution des taux d'agrégats stables après prétraitement au benzène s'explique par l'épuisement des ressources énergétiques pour la biomasse microbienne. La microflore s'attaque alors aux composés organiques de formation secondaire (polysaccharides microbiens, mycélium etc...), qui sont les principaux agents de stabilisation des agrégats.

DOMMERGUES et MANGENOT citent une expérience faite par MARTIN en 1946, qui a incorporé des polysaccharides microbiens sur un sol argilo-limoneux. Il a observé que la teneur en agrégats stables tombe de 67 % à 38 % après huit jours seulement d'incubation, et à 32 % après quarante jours d'incubation.

MONNIER en 1965, a observé une évolution très rapide de la stabilité structurale dès le dixième jour d'incubation, puis commence à se ralentir à partir du vingtième au trentième jour d'incubation. Au dixième jour il observe un maximum du taux d'agrégats stables après prétraitement au benzène. Cette date est d'après lui liée à la fin d'un premier cycle de développement des microorganismes, car dans la semaine suivante il observe une chute jusqu'à 28 % des agrégats stables après prétraitement au benzène.

D'après lui il semblerait donc qu'au quinzième jour, la stabilité est assurée simultanément par des produits de dégradation et par des corps microbiens hydrophobes, qui peuvent être progressivement détruits entre le trentième et le soixantième jour, par de nouveaux microorganismes n'ayant pas des propriétés aussi marquées vis à vis de l'eau.

5.3.2 Agb en relation avec l'apport de gypse :

Si l'on reprend la figure n°33, on remarquera que même sans enrichissement en paille, l'apport de gypse a une action positive sur l'agrégation aussi bien au début qu'à la fin de l'incubation. Ceci en favorisant la floculation des argiles dispersées et améliorant ainsi l'agrégation. Si l'on rajoute de la matière organique, alors la différence entre l'échantillon sans apport de gypse et l'échantillon avec apport de gypse devient encore plus significative.

Le gypse aurait donc aussi une action positive sur l'activité bactérienne, d'ailleurs comme il a été mentionné précédemment, la minéralisation de la matière organique est plus rapide avec gypse que sans gypse.

Il y a aussi une action indirecte par son influence sur l'évolution des composés organiques, d'où l'interaction très marquée avec l'influence de l'apport de paille sur les Agb. L'ion calcium aurait une grande part dans l'agrégation au début, car il semblerait d'après DOMMERGUES et MANGENOT, qu'une liaison calcium s'établirait entre certains polysaccharides et les micro-particules d'argile. Cette augmentation de l'agrégation par le gypse s'expliquerait d'après ces auteurs de deux façons :

- La première est l'intensification des processus de floculation des colloïdes sous l'effet de l'ion calcium.
- La deuxième est la stimulation de l'activité des microorganismes, producteurs de substances agrégatives sous l'influence de l'élévation du pH.

Nos expériences confirment ces deux hypothèses, car nous avons observé qu'au cours de la première phase éphémère, le gypse entraîne une diminution des taux d'éléments fins dispersables (Argile + limon), donc améliore la consolidation des complexes argilo-humiques. Cette action du gypse est amplifiée par l'action des matières organiques apportées. Elle est relativement brève, car après le premier mois les taux de dispersion sont pratiquement identiques avec ou sans gypse.

Nous avons observé également une augmentation du pH avec le temps d'incubation, du moins au début de celle-ci. A long terme, de 6 à 9 mois d'incubation, il apparaît que l'action du gypse ne se fait pas sentir sur les taux de dispersion (Argile + limon max.), mais plutôt sur la stabilité des agrégats après prétraitement au benzène. Il y a donc une action indirecte du calcium sur les produits organiques synthétisés ou polymérisés et les complexes liés par des ponts cationiques aux constituants argileux des agrégats.

Les deux auteurs cités plus haut, ont d'ailleurs observé qu'un apport de luzerne en poudre augmente fortement la stabilité structurale, mais qu'un apport conjoint de cette luzerne avec de la chaux est encore plus efficace. Le chaulage a donc un rôle très favorable sur l'agrégation microbienne au début de l'incubation.

Cette interaction peut aussi être due à la formation de complexes argilo-humiques avec des ponts calcium entre les molécules organiques et les minéraux argileux. Notamment après le sixième mois d'incubation pour les échantillons à 3 % de paille.

Le sulfate de calcium aurait donc une action indirecte d'une part sur l'agrégation du début par la stimulation de l'activité microbienne produisant plus de substances agrégatives, d'autre part sur l'agrégation à long terme par la consolidation des complexes argilo-humiques par des ponts calcium rendant les agrégats plus résistants à l'action de l'eau.

Cette action du gypse sur la structure du sol, peut être d'ordre physico-chimique, impliquant une augmentation de la concentration en électrolytes et un phénomène d'échange, (HALITIM et All. 1983). Il y aurait aussi un effet physique de structuration du matériau par individualisation de micro-agrégats argileux.

5.4 CONCLUSION :

Il ressort donc de ces évolutions, que l'on peut voir deux types d'action sur l'agrégation. Une rapide et brève liée à l'action microbienne, l'autre lente et progressive, liée aux produits humiques plus stables et polymérisés et à une action de l'ion calcium.

La première action se situe entre le temps zéro et un mois d'incubation, où l'on observe une forte agrégation suivie d'une désagrégation tout aussi brutale. A ce niveau, on peut dire que sur le premier temps entre zéro et 15 jours, c'est principalement l'action des produits de fabrication microbienne qui agirait sur la stabilité des agrégats. Trouvant des ressources énergétiques suffisantes (polysaccharides et débris végétaux), les bactéries sécrètent un abondant mucus ayant une action agrégative très importante. Ce sont surtout les substances polysaccharidiques d'origine microbienne qui améliorent le plus la stabilité des agrégats (CHASSIN, 1979).

Certaines de ces substances organiques agiraient sur la cohésion et la stabilité des agrégats, soit par un processus physique (mycélium), d'autres par un processus chimique sur la diminution de la mouillabilité (mucus). A cette période, l'ion calcium favoriserait une action biologique plus intense, entraînant une fabrication plus poussée de ces composés agrégatifs. Le calcium pourrait agir aussi directement sur la stabilisation des complexes argilo-humiques par la formation de ponts cationiques entre les argiles et les matières organiques.

La désagrégation plus rapide avec le gypse au cours de la deuxième quinzaine serait due à la consommation par d'autres colonies bactériennes plus actives, des produits de décomposition, essentiellement hydrolyse des héli-celluloses provenant de l'auto-lyse des champignons.

A long terme le gypse favorise la formation des matières humiques stables (Acides humiques gris) qui agissent progressivement sur l'amélioration de l'agrégation. A partir du sixième mois, on remarque une forte amélioration due aux alternances d'humectation-dessiccation, sans doute accentuée par le rôle du calcium comme stabilisateur des complexes argilo-humiques.

D'après les travaux de HALITIM en 1985, le comportement de l'argile en présence de calcite est dû essentiellement à un effet physique de cimentation des particules qu'à un effet de concentration en électrolytes, comme c'est le cas avec le gypse. Avant sa solubilisation dans le sol, ce gypse aurait également un effet défavorable sur la conductivité hydraulique en obturant les pores responsables de la circulation de l'eau.

CHAPITRE 6 :

**MODELISATION DE L'EVOLUTION HUMIQUE DES SOLS ET
ETUDE STATISTIQUE DE L'INFLUENCE DES FRACTIONS
HUMIQUES SUR LA STABILITE DES AGREGATS.**

6.1 INTRODUCTION :

Une tentative d'ajustement de la cinétique du carbone a été faite selon le modèle de HENIN-MONNIER et TURC, 1959. Ceci dans le but d'évaluer le devenir des matières végétales incorporées dans le sol pendant plusieurs années, et éventuellement déterminer la dose optimale permettant à long terme d'obtenir un stock organique constant dans le sol à long terme. Cette modélisation a donné des résultats que nous présenteront plus loin.

D'autre part, si les observations faites au chapitre n°5 sur les relations matières humiques-agrégats sont importantes, leur signification doit être confirmée par une analyse statistique. Nous avons adopté deux méthodes d'analyse statistique. La première est basée sur l'analyse en composantes principales et la deuxième est une classification ascendante hiérarchique.

Le choix de ces analyses a été guidé par le fait que ce sont des analyses qui permettent de comparer des groupes d'échantillons entre eux, et ce sont des analyses qui portent sur un ensemble de données plus significatives. L'analyse en composantes principales est une représentation optimale des coefficients de corrélations. Elle est particulièrement intéressante dans notre cas, puisque nous comparons des mesures chimiques et physiques à des échelles différentes. Elle est donc une méthode de choix pour observer les relations matières humiques-agrégats.

6.2 EVOLUTION HUMIQUE DES SOLS : CINETIQUE DE DECOMPOSITION DU CARBONE.

La dynamique du carbone des matières organiques enfouies dans les sols a été décrite pour la première fois par HENIN et DUPUIS 1954. Cette méthode était basée sur la modélisation de la cinétique de la matière organique avec un seul compartiment. Ce travail a été suivi d'un deuxième modèle établi par HENIN et Al. en 1959, faisant intervenir une cinétique à deux compartiments pour l'évolution de la matière organique .

Depuis, de nombreux auteurs se sont intéressés à la dynamique de la matière organique, et ont donc proposé des modèles plus ou moins compliqués, en les ajustant sur des essais pluriannuels. Parmi eux, nous citerons le travail de JENKINSON et RAYNER en 1977, qui propose un modèle à 5 compartiments selon la labilité des matières organiques.

Egalement en 1977, JENKINSON et AYANABA ont réalisé un travail qui porte sur une modélisation avec du carbone marqué. Ce travail fait ressortir une cinétique à deux exponentielles mais sans constante. Sur le premier compartiment la cinétique de décomposition est nettement

plus lente que celle de notre modèle ajusté. Il faut signaler qu'ils ont travaillé dans des conditions de température nettement plus basses que les nôtres (28 °C).

En 1981, PAUL et VAN VEEN ont également présenté une modélisation à 8 compartiments, suivant une cinétique exponentielle. Il faut signaler aussi le travail de MOREL en 1981 faisant état d'un modèle à 2 compartiments basé sur la dynamique du carbone et de l'azote.

Le fait que la plupart des chercheurs aient utilisé des données provenant d'expériences avec des matières végétales marquées par du carbone 14 dans leurs modélisations, nous prive de la possibilité de pouvoir comparer nos résultats à leurs travaux.

On peut dire en résumé, que la plupart de ces travaux confirment, que la dynamique de la matière organique suit au moins deux cinétiques d'évolution, l'une rapide à court terme et l'autre lente à moyen ou long terme.

JENKINSON et Al. en 1977, pour se rapprocher des réalités biochimiques, ont décomposé le premier compartiment en deux : Les matières organiques facilement décomposables (polysaccharides de la cellulose, protéines etc...), et les matières organiques difficilement décomposables (matières ligneuses).

Le compartiment B humifié est lui-même subdivisé en 3 sous-compartiments de durée de vie croissante. Toutefois ces sous-compartiments sont plus ou moins fictifs, et ne sont pas tous réellement mesurables. Il pense que l'on peut distinguer un premier sous-compartiment de durée de vie relativement brève constitué par la biomasse microbienne, le second est appelé matière organique physiquement stabilisée (fixations argileuses) et enfin le sous-compartiment le plus stable ou chimiquement stabilisé.

Il était dans notre cas très utopique d'espérer ajuster sur ce modèle nos courbes de décroissance du carbone comprenant six points seulement. Pour le premier sous-compartiment, il faudrait avoir beaucoup plus de points en début d'expérience.

Pour rendre compte de la décomposition du compartiment humique, il faudrait une expérimentation de plus longue durée. Notre essai n'a duré que 9 mois, et manifestement les courbes obtenues, présentent deux cinétiques d'évolution bien différentes. C'est pourquoi nous avons choisi d'ajuster nos courbes sur le modèle de HENIN et Al. 1959.

6.2.1 Le modèle de HENIN et Al. 1959 :

Les matières organiques "jeunes" provenant de l'enfouissement de la paille se décomposent pour donner d'une part, du gaz carbonique et d'autre part des matières humifiées. Celles-ci constituent un deuxième compartiment qui se décompose lui-même en permanence, mais beaucoup plus lentement. Une série de répétition d'analyses du carbone a été effectuée pour déterminer l'intervalle de confiance de nos mesures (figures en annexe F.8), afin de préciser la signification ultérieure de nos ajustements. Ces répétitions sont au nombre de 10 mesures.

D'après le modèle choisi, l'évolution globale peut être résumée dans le schéma ci-dessous avec :

A : la quantité de matière organique labile, en % de carbone organique par rapport au sol sec.

m : l'apport organique végétal, en % de carbone apporté par année par rapport au sol sec.

α : le paramètre de destruction de la matière organique labile par minéralisation et transformation en humus, (unité Années).

t : Temps d'incubation en année.

B : quantité d'humus, en % de carbone par rapport au sol sec.

k : fraction provenant de A, transformée en humus (coefficient isohumique).

β : coefficient de minéralisation de l'humus, en années⁻¹.



Bilan :

$$\frac{dA}{dt} = m - \alpha A$$

$$\frac{dB}{dt} = k \alpha A - \beta B$$

Soit par intégration :

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

$$B = (B_0 - k m/\beta) e^{-\beta t} + k (A_0 - m/\alpha) \alpha / (\alpha - \beta) (e^{-\beta t} - e^{-\alpha t}) + k m/\beta$$

Soit pour le carbone total :

$$C.T. = [A_0 (1 - k \alpha / (\alpha - \beta)) + m (k / (\alpha - \beta) - 1/\alpha)] e^{-\alpha t} + [B_0 + k A_0 \alpha / (\alpha - \beta) - m \alpha (1/\beta + 1/(\alpha - \beta))] e^{-\beta t} + m (1/\alpha + k/\beta)$$

Ce modèle suppose que les cinétiques de décomposition des matières labiles d'une part, et des matières humifiées d'autre part sont d'ordre 1.

6.2.2 Traitement des données :

a) Saisie :

Toutes les mesures de carbone, comme toutes les autres mesures chimiques sont saisies au cours de leur obtention au moyen du logiciel SPCLAS (PANSU, 1983), dans un fichier pour chaque expérience.

Ce logiciel nous permet ensuite d'obtenir pour chaque variable de chaque fichier, donc ici pour les mesures de carbone, des sous-fichiers contenant les données dans le plan d'expérience initial. Ces données sont ensuite transférées dans le logiciel STATGRAPHICS (société UNIHARE).

b) Principe du traitement :

Un premier tracé en fonction du temps, des trois courbes correspondant aux sols étudiés et représentant les trois doses d'apport, (figures n°36, 37 et 38 en annexe F.9), nous fournit une allure qui aux erreurs de mesure près (coefficient de variation égal 1.9 %), paraissent correspondre au modèle choisi. Une décroissance rapide jusqu'à 30 jours, peut traduire la décomposition des apports végétaux, puis une décroissance lente suggère une décomposition des seules matières humiques.

Un premier ajustement est donc réalisé sur les points 30, 90, 180 et 270 jours, selon un modèle de régression linéaire après transformation logarithmique des valeurs correspondantes de carbone.

$$B = U_2 \exp(V_2 t)$$

Le tableau n°37 ci-dessous, présente les paramètres du modèle pour les trois sols et la courbe à 3 % d'apport organique.

| Sol | paramètres | T | F | S | R2 |
|----------------------------------|------------|--------|------|-------|-------|
| A tendance vertique | U2 16,430 | 149*** | 4,99 | 0,002 | -0,84 |
| | V2 -0,294 | -2,23* | | | |
| Sol salé carbonaté | U2 19,462 | 101 | 4,99 | 0,031 | -0,84 |
| | V2 -0,140 | -2;23 | | | |
| Sol salé carbonaté + Gypse | U2 19,530 | 77*** | 3,12 | 0,042 | -0,78 |
| | V2 -0,031 | -1,8 | | | |

Tableau n°37 : Seuil de signification .
Tests de l'équation B.

avec :

U_2 = Exp (ordonnée à l'origine).

V_2 = Pente.

T = Test t de Student des coefficients.

F = Test de Fisher-Snedecor de l'ajustement.

S = Ecart-type du modèle.

R2 = Coefficient de détermination.

* Signification au niveau 0,9

** Signification au niveau 0,95

***Signification au niveau 0,99

Les premiers points sont ensuite corrigés par déduction des valeurs prédites de la courbe d'humification, et un modèle de régression linéaire est calculé de façon analogue pour ces points.

Le tableau n° 38 ci-dessous, présente les résultats des équations $A = U_1 \exp(V_1 t)$ pour les trois sols pour les apports à 3 % de matière organique.

| Sol | paramètres | T | F | S | R2 |
|----------------------------------|---------------|-------|------|-------|-------|
| A tendance vertique | U_1 6,028 | 1,98 | 4,95 | 0,993 | -0,91 |
| | V_1 -38,071 | -2,22 | | | |
| Sol salé carbonaté | U_1 10,126 | 3,97 | 9,85 | 0,638 | -0,95 |
| | V_1 -34,410 | -3,13 | | | |
| Sol salé carbonaté + Gypse | U_1 5,765 | 1,89 | 2,18 | 1,019 | -0,83 |
| | V_1 -15,017 | -1,48 | | | |

Tableau n° 38 : Seuil de signification.
Tests de l'équation A.

Les modèles pour chaque sol sont la somme des deux exponentielles A et B.

$$CT = A + B = U_1 \exp(V_1 t) + U_2 \exp(V_2 t) \quad (1)$$

A partir des valeurs du modèle précédent, une estimation non linéaire plus précise de chaque coefficient est obtenue au moyen de l'algorithme de Marquardt (1963), toujours basée sur une estimation des moindres carrés, mais pour les modèles non linéaires. L'ajustement n'est possible qu'en partant de valeurs approchées pour le modèle (1), soit les valeurs trouvées ci-dessus. Nous avons écrit un programme annexe pour tester les paramètres statistiques des modèles (test F, R2 et écart-type du modèle S).

Le tableau n° 39 résume les équations trouvées pour chaque sol, pour les apports à 3 % de matière organique. Il donne les tests de signification et l'écart-type de l'ajustement.

Les ajustements des points expérimentaux au modèle deviennent cette fois tous significatifs, alors que les sommes d'exponentielles de départ ne l'étaient pas. Cette étape était pourtant indispensable pour obtenir une approximation possible avec la méthode de Marquardt.

| Sol | Equation (CT =) | F(3, 3) | R2 | S |
|----------------------------|--|----------|------|------|
| A tendance verticale | $4,99 \exp(-14,51t) + 15,68 \exp(-0,015t)$ | 15,8** | 0,94 | 0,67 |
| Sol salé carbonaté | $9,48 \exp(-16,24t) + 17,95 \exp(-0,007t)$ | 60,6*** | 0,98 | 0,63 |
| Sol salé carbonaté + Gypse | $6,17 \exp(-24,11t) + 20,03 \exp(-0,074t)$ | 40,2*** | 0,97 | 0,55 |

Tableau n° 39 : Tests de signification et écart-type.

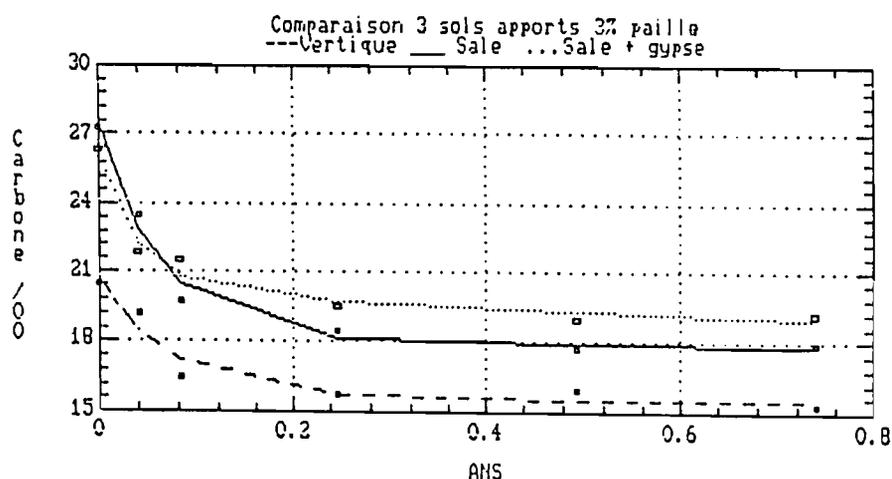


Figure n°35 : Ajustement pour 3 % d'apport organique.

La figure n°35 illustre les ajustements obtenus pour les trois sols à 3 % d'apport organique.

c) Echantillons sans apport et à 1 % d'apport organique :

Le type d'ajustement utilisé précédemment n'étant pas très significatif pour les faibles teneurs de carbone, nous partons des hypothèses suivantes :

- L'ajustement des courbes avec apport à 3 % étant le plus précis, nous supposons que les coefficients des cinétiques d'évolution des deux compartiments humiques sont les mêmes pour un même sol et une même matière organique apportée quelle que soit la dose introduite. Ce qui est logique avec des compartiments exponentiels où la décroissance est indépendante de la quantité.

nous posons alors pour chaque expérience :

$$X1 = \exp(-\alpha t) \quad \text{et} \quad X2 = \exp(-\beta t)$$

Ainsi nous calculons au moyen d'une régression multiple du premier degré sans constante, sur les données des apports 0 et 1 %, les coefficients A et B du modèle $CT = AX1 + BX2 + \epsilon$ (tableau 40, 41).

Les figures n°36, 37 et 38 en annexe F.10, illustrent les ajustements obtenus pour chaque sol avec les trois amendements organiques.

| Sols | CT (=) | R2 |
|----------------------------|--|-------|
| Sol à tendance vertique | $2,23 \exp(-14,51t) + 13,23 \exp(-0,015t)$ | 0,999 |
| Sol salé carbonaté | $5,36 \exp(-16,24t) + 15,33 \exp(-0,007t)$ | 0,997 |
| Sol salé carbonaté + Gypse | $6,39 \exp(-24,11t) + 14,91 \exp(-0,074t)$ | 0,997 |

Tableau n°40 : Coefficient R2 des équations pour 1 % d'apport organique.

| Sol | CT (=) | R2 |
|----------------------------|--|-------|
| Sol à tendance verticale | $1,57 \exp(-14,51t) + 11,68 \exp(-0,015t)$ | 0,998 |
| Sol salé carbonaté | $3,47 \exp(-16,24t) + 13,97 \exp(-0,007t)$ | 0,999 |
| Sol salé carbonaté + Gypse | $3,68 \exp(-24,11t) + 13,92 \exp(-0,074t)$ | 0,999 |

Tableau n°41 : Valeurs et validité des équations pour 0 % d'apport organique.

6.2.3 Modélisation de l'influence des apports organiques :

Si nous supposons, comme les auteurs du modèle (HENIN et All.1959), que le carbone de chaque compartiment varie linéairement en fonction de l'apport, les régressions linéaires aux temps t pour chaque coefficient des exponentielles nous permettent de trouver leur équation en fonction de l'apport de paille m en % du sol, soit :

$$CT = (a1 + b1 m) \exp(-\alpha t) + (a2 + b2 m) \exp(-\beta t)$$

a) Sol à tendance verticale :

| | Compartiment A | | | | Compartiment B | | | |
|---------------------|----------------|-----|--------|------|----------------|------|--------|------|
| | Coefficient | T | F(1,1) | R2 | Coefficient | T | F(1,1) | R2 |
| Ordonnée origine(a) | 1,37 | 4,2 | | | 11,72 | 81,1 | | |
| Pente (b) | 0,43 | 6,6 | 43,2 | 0,99 | 0,49 | 16,6 | 272 | 0,99 |

Tableau n°42 : Ordonnée à l'origine et pente des compartiments A et B.

Le modèle définitif du carbone dans le sol à tendance verticale devient :

$$CT = (1,37 + 0,43 m) \exp(-14,51t) + (11,72 + 0,49 m) \exp(-0,015t)$$

$$CT = CTA + CTB$$

Remarquons que le modèle trouvé, s'il ressemble à celui de HENIN et All.(1959), ne correspond pas exactement à l'équation du carbone total, dû au fait de l'absence du terme constant. Les essais pour ajuster une équation comprenant une constante se sont avérés infructueux avec la méthode d'itération de Marquardt.

b) Sol salé carbonaté :

Les mêmes calculs ont été effectués pour le sol salé carbonaté sans apport de gypse et avec apport de gypse.

Les teneurs en carbone du sol salé carbonaté s'ajustent parfaitement au modèle de HENIN, lorsque un apport de matière organique seul est réalisé. Un apport en complément de gypse perturbe l'ajustement. Les valeurs comparatives pour les deux compartiments entre les deux expériences, montrent que l'apport de gypse semble provoquer le passage direct d'une partie de la paille dans le compartiment B, sans décomposition préalable. Dès lors la cinétique de décomposition du carbone ne suit plus le modèle de HENIN.

Les résultats sont représentés dans le tableau n°43 ci-contre pour les deux expériences.

| | Sans apport de gypse | | Avec apport de gypse | |
|--------|----------------------|-------|----------------------|-------|
| | A | B | A | B |
| a | 3,42 | 13,98 | 4,48 | 13,47 |
| b | 0,74 | 0,49 | 0,26 | 0,78 |
| R2 | 0,99 | 0,99 | 0,50 | 0,97 |
| F(1,1) | 2498 | 8867 | 1,00 | 29,20 |

Tableau n°43 : Tests des ajustements dans les compartiments A et B.

avec : $A_0 = a_1 + b_1 m$ et $B_0 = b_2 + B_2 m$

Le modèle définitif du carbone dans le sol salé carbonaté devient alors :

$$CT = (3,42 + 0,74 m) \exp(-16,24t) + (13,98 + 0,49 m) \exp(-0,007t)$$

6.2.4 Bilans des ajustements et temps de demi-vie :

Les tableaux suivants résument les bilans du carbone total au temps 0.

| Matière végétale apportée (en %) | 0 | 1 | 3 |
|----------------------------------|-------|-------|-------|
| C. Mesuré global | 12,95 | 15,60 | 21,05 |
| C. Mesuré C. sol+C. paille | 12,95 | 15,65 | 21,05 |
| C. Calculé approximation départ | | | 22,45 |
| C. Calculé équation $f(t)$ | 13,25 | 15,46 | 20,67 |
| C. Calculé équation $f(t, m)$ | 13,14 | 15,63 | 20,62 |

Tableau n°44 : Bilans de l'ajustement pour le sol à tendance verticale au temps 0.

| Matière végétale apportée (en %) | 0 | 1 | 3 |
|----------------------------------|-------|-------|-------|
| C. Mesure global | 17,75 | 21,00 | 27,27 |
| C. Mesure sol+paille | 17,75 | 20,45 | 25,85 |
| C. Calculé approximation départ | | | 29,59 |
| C. Calculé équation $f(t)$ | 17,44 | 20,69 | 27,43 |
| C. Calculé équation $f(t, m)$ | 17,41 | 20,74 | 27,42 |

Tableau n°45 : Bilans de l'ajustement pour le sol salé carbonaté sans gypse au temps 0.

| | | | |
|----------------------------------|-------|-------|-------|
| Matière végétale apportée (en %) | 0 | 1 | 3 |
| C. Mesuré global | 17,60 | 20,30 | 26,30 |
| C. Mesuré sol+paille | 17,60 | 20,30 | 25,70 |
| C. Mesuré approximation départ | | | 25,29 |
| C. Calculé équation $f(t)$ | 17,60 | 21,30 | 26,20 |
| C. Calculé équation $f(t, m)$ | 17,96 | 20,76 | 26,38 |

Tableau n°46 : Bilans de l'ajustement pour le sol salé carbonaté avec gypse au temps 0.

On remarque pour le sol à tendance verticale que le bilan des valeurs calculées par l'équation est pratiquement identique à celui obtenu par les mesures proprement dites.

Pour le sol salé carbonaté, le bilan calculé avec l'équation de l'ajustement $f(t)$, est légèrement sur-estimé par rapport au bilan carbone (sol + paille), principalement pour l'échantillon enrichi à 3 % de paille.

| Sols | Constante de vitesse année | Demi-vies |
|--------------|----------------------------|-----------|
| A tendance A | 14,51 | 0,05 |
| verticale B | 0,015 | 45,9 |
| Sol salé A | 16,24 | 0,04 |
| carbonaté B | 0,007 | 97,6 |
| Sol salé A | 24,11 | 0,03 |
| carbonaté B | 0,07 | 9,41 |
| + Gypse | | |

Tableau n°47 : Temps de demi-vie des compartiments.

Le tableau n°47, donne les temps de demi-vie des compartiments des sols étudiés.

6.2.5 Conclusion :

Les estimations des temps de demi-vie des substances organiques dans le compartiment A obtenues dans ces conditions expérimentales, sont peu différentes dans les deux types de sol étudiés. L'apport de gypse en revanche accélère significativement le passage des substances végétales dans le compartiment humique, (environ deux fois). Il semble que certaines de ces matières sont piégées directement dans une cinétique différente du modèle.

La stabilité de l'humus du sol peu évolué d'apport à tendance vertique est deux fois plus faible que pour le sol salé carbonaté. L'apport de gypse accélère très fortement la minéralisation de l'humus dans ce dernier sol, (environ dix fois).

6.3 INFLUENCE DES FRACTIONS HUMIQUES SUR LA STABILITE DES AGREGATS :

Après avoir étudié l'ajustement du carbone en fonction du temps, nous avons déterminé les relations existant entre les fractions humiques de la matière organique et les paramètres physiques analysés (agrégats stables, dispersion et point de flétrissement).

Cette étude comparée nous a amené à faire appel aux analyses multivariées pour préciser les liaisons entre les variables chimiques et physiques sur les échantillons de notre expérience.

Pour une meilleure compréhension de l'analyse, nous pensons qu'il est utile de faire un bref rappel théorique sur les analyses multivariées.

6.3.1 Rappels théoriques :

a) Tableau de mesures et nuages de points :

Soit les j mesures physico-chimiques définissant pour les i échantillons d'une expérience, un tableau de résultats x_{ij} .

Dans le cas où $j=1$ les résultats peuvent être représentés sur un axe, et on peut calculer une moyenne et une variance, paramètres caractérisant les distances entre les mesures.

Pour $j=2$, ils seront dans un plan. On peut calculer la moyenne et la variance de chacune des variables, ainsi qu'un paramètre caractérisant leur interaction, covariance ou corrélation.

Lorsque j devient élevé, on a alors un nuage de points multidimensionnel (KENDALL 1975), comprenant j moyennes, j variances et $1/2j(j-1)$ corrélations. Il faudrait donc prendre en considération $1/2j(j+3)$ paramètres pour caractériser ce nuage.

Le problème devient vite complexe, et avec nos 14 séries de mesures nous aurions 119 paramètres. L'analyse multivariable va nous permettre de simplifier le problème, en considérant le nuage de points comme un objet duquel nous extrairons l'information la plus significative, d'une part en ce qui concerne la définition de sa forme par l'analyse factorielle, d'autre part en regroupant les points les plus proches à l'intérieur du nuage par les méthodes d'analyse discriminantes.

b) Caractéristiques géométriques d'un nuage de points :

Soient les points i caractérisant les échantillons dans l'espace multidimensionnel des j variables. Chaque point est muni d'une masse m_i et de coordonnées C_{ij} définies par les valeurs de mesures x_{ij} .

Entre deux points i et i' , on peut calculer une distance tenant compte éventuellement d'un facteur d'échelles l_j sur les axes j .

$$d^2(i, i') = \sum_j l_j (C_{ij} - C_{i'j})^2$$

Le nuage possède :

- Un centre de gravité g de coordonnées :

$$G_j = \sum_i m_i C_{ij}$$

- Une inertie I autour de ce centre de gravité, caractérisant la dispersion.

$$I = \sum_i m_i d^2(i, g)$$

Avec d = distance des points i au centre de gravité.

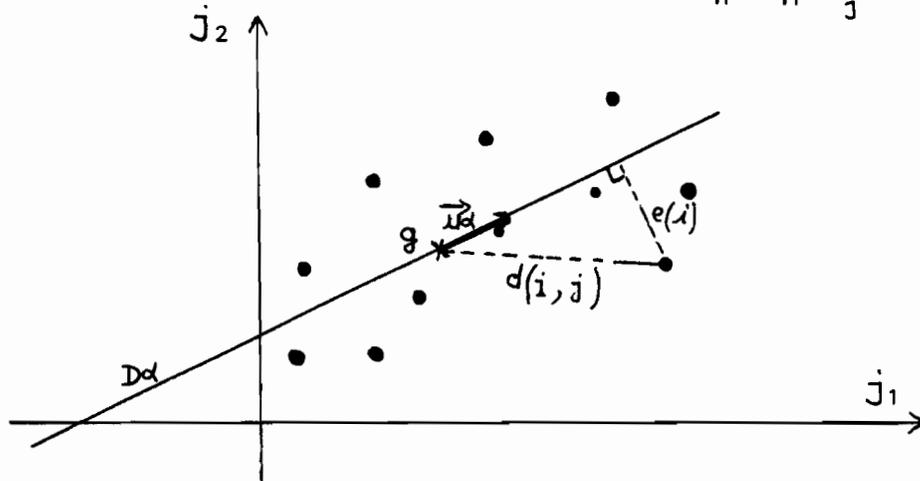
Par rapport aux coordonnées nous aurons donc :

$$\begin{aligned} I &= \sum_i m_i \sum_j l_j (C_{ij} - G_j)^2 \\ &= \sum_{i,j} m_i l_j (C_{ij} - G_j)^2 \end{aligned}$$

c) Analyse factorielle d'un nuage :

En deux dimension nous aurions la situation suivante :

$$\text{avec : } \|\vec{u}_\alpha\| = \sum_j l_j u_j^2 = 1$$



Peut on trouver des droites D_α définies par des vecteurs \vec{u}_α de longueur 1 et passant par g capable de caractériser aux mieux la forme du nuage en extrayant l'inertie maximum?

Si la droite existe, la projection de chaque point i fournit sa coordonnée P_i sur ce nouvel axe factoriel, soit le produit scalaire du vecteur \vec{u}_α et du vecteur \vec{g}_i .

$$P(i) = \sum_j l_j u_j (C_{ij} - G_j)$$

Le théorème de Pythagore permet de décomposer les distances :

$$d^2(i, g) = e^2(i) + P^2(i)$$

et l'inertie :

$$\begin{aligned} I &= \sum_i m_i d^2(i, g) \\ &= \sum_i m_i e^2(i) + \sum_i m_i P^2(i) \\ &= E_\alpha + I_\alpha \end{aligned}$$

E_α est l'inertie d'erreur qui doit être minimum, alors que l'inertie projetée I_α doit être maximum. Par rapport aux coordonnées, celle-ci s'exprime par :

$$I_\alpha = \sum_i m_i \left[\left(\sum_j l_j u_j (C_{i\alpha} - G_j) \right)^2 \right]$$

Soit une forme quadratique qui possède un optimum. L'analyse factorielle va permettre de trouver tous les u_j qui maximisent l'inertie $I(\vec{u}_j)$, et tels que

$$\sum_j l_j u_j^2 = 1.$$

Le théorème fondamental de l'analyse factorielle montre qu'il existe une série de droites D_α appelées axes factoriels possédant les propriétés suivantes :

- Ils sont perpendiculaires deux à deux.
- D_1 donne l'inertie maximale I_1 .
- D_2 donne l'inertie maximale I_2 parmi les droites perpendiculaires à D_1 .
- D_k donne l'inertie maximale I_k parmi les droites perpendiculaires à $D_1, D_2, \dots, \text{et } D_{k-1}$.

La projection d'un point i sur D_α donne sa coordonnée factorielle notée $F_\alpha(i)$.

L'inertie I_α sur la droite est aussi notée λ_α du fait qu'elle correspond à la valeur propre de la matrice de covariance provenant des mesures.

$$\lambda_\alpha = I_\alpha = \sum_i m_i F_\alpha^2(i)$$

L'inertie totale vaut $I = \sum_\alpha I_\alpha$, et l'analyse factorielle correspond bien à une décomposition de l'inertie selon les axes. Examinons le cas de l'analyse en composantes principales.

d) Analyse en composantes principales :

Soit notre tableau des déterminations j ($j = 1, 2, \dots, p$) sur les échantillons i ($i = 1, 2, \dots, n$). Chaque mesure est notée x_{ij} , auquel nous pouvons associer le nuage des n_i points de l'ensemble R^p .

Nous allons centrer et réduire ce nuage (VOLLE 1978), c'est à dire lui substituer le nuage des N_i correspondant aux mesures réduites X_i dont la j ième coordonnée est :

$$X_{ji} = (x_{ji} - \bar{x}_j) / \sigma_j \quad (1)$$

avec

$$\bar{x}_j = 1/n \sum_i x_{ji}$$

$$D^2_j = 1/n \sum_i (x_{ji} - \bar{x}_j)^2$$

Cette transformation rend les variables indépendantes des unités choisies. A toutes les lignes en associe le même poids $m_i = 1$. La distance entre deux échantillons i et i' s'exprime par :

$$d^2(i, i') = \sum_j (X_{ij} - X_{i'j})^2 \quad (2)$$

Les distances entre deux séries de mesures j et j' s'expriment par :

$$d^2(j, j') = 1/n \sum_i (X_{ij} - X_{ij'})^2 \quad (3)$$

Soit :

$$nd^2(j, j') = \sum_i X_{ij}^2 + \sum_i X_{ij'}^2 - 2 \sum_i X_{ij} X_{ij'}$$

En se reportant à l'équation (1), il est aisé de voir que :

$$\sum_i X_{ij}^2 = \sum_i X_{ij'}^2 = n$$

et que :

$$\sum_i X_{ij} X_{ij'} = \frac{\sum_i (x_{ij} - \bar{x}_j)(x_{ij'} - \bar{x}_{j'})}{\sqrt{\sum_i (x_{ij} - \bar{x}_j)^2 \sum_i (x_{ij'} - \bar{x}_{j'})^2}} = nr$$

avec r = coefficient de corrélation entre j et j' .

$$d^2(j, j') = 2 [1 - r(j, j')]$$

Représenter au mieux les distances entre colonnes, revient à représenter au mieux les corrélations. L'analyse en composantes principales est une représentation optimale des coefficients de corrélations.

En pratique si X est la matrice réduite de terme général X_{ij} , pour p variables et n échantillons.

$$X = \begin{pmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1p} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{n1} & X_{n2} & \dots & X_{np} \end{pmatrix}$$

La multiplication de cette matrice par sa transposée donnera :

$$nX'X = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n X_{i1}^2 & \sum_{i=1}^n X_{i1} X_{i2} \dots & \sum_{i=1}^n X_{i1} X_{ip} \\ \sum_{i=1}^n X_{i2} X_{i1} & \sum_{i=1}^n X_{i2}^2 \dots & \sum_{i=1}^n X_{i2} X_{ip} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \sum_{i=1}^n X_{ip} X_{i1} & \sum_{i=1}^n X_{ip} X_{i2} \dots & \sum_{i=1}^n X_{ip}^2 \end{pmatrix}$$

Soit :

$$nX'X = \begin{pmatrix} 1 & r_{12} & \dots & r_{1p} \\ r_{12} & 1 & \dots & r_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{1p} & r_{2p} & \dots & 1 \end{pmatrix} = \text{matrice des corrélations.}$$

Les valeurs propres de cette matrice représentent dans l'ordre l'inertie de l'axe 1, l'axe 2 ...

Toutes les coordonnées factorielles sur j [$G_Q(j)$] vont être à l'intérieur d'une hypersphère de rayon 1.

On peut alors visualiser ces coordonnées sur des plans factoriels (figures n°39, 41 et 43), en choisissant les axes factoriels désirés.

Les variables bien corrélées dans un plan sont les plus éloignées du centre de gravité, et définissent le cercle de rayon 1.

Si $r = 1$, cela entraîne $d^2(j, j') = 0$, et les points sont alors confondus.

Si $r = 0$, cela entraîne $\|d(j, j')\| = 2$, et les vecteurs \vec{J} et \vec{J}' sont orthogonaux.

Si $r = -1$, cela entraîne $\|d(j, j')\| = 2$, et les deux points sont alors diamétralement opposés sur le cercle.

D'une façon générale, le coefficient de corrélation de 2 variables j et j' situées sur le cercle sera traduit par le cosinus de l'angle au centre correspondant.

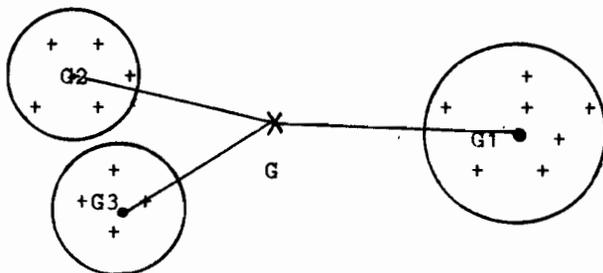
Les axes sont interprétés comme des variables synthétiques. Les variables sont identifiées par leurs coordonnées sur ces axes. Elles possèdent une contribution à la formation de ces axes et une corrélation avec eux. Les variables qui contribuent le plus étant à la fois les plus corrélées avec l'axe et les plus éloignées du centre de gravité. On peut représenter et interpréter de façon analogue les échantillons sur les axes factoriels.

Dans l'étude présentée ici, nous avons surtout interprété la contribution des variables à la formation des axes et leur opposition sur ces derniers.

Nous avons ensuite tenté de regrouper les échantillons de propriétés physico-chimiques comparables au moyen de la classification ascendante hiérarchique.

e) Classification ascendante hiérarchique :

Soit pour les i échantillons ($i = 1, 2 \dots n$), sur lesquels nous avons mesuré j variables ($j = 1, 2 \dots p$), le tableau des mesures centrées réduites X_{ij} . L'ensemble des échantillons peut être représenté par un nuage X_i dans l'ensemble R^p des variables.



Comme précédemment, chaque point i est muni d'une masse m_i , ici égale à 1, de coordonnées C_{ij} . On possède toujours un calcul de distances entre deux points i et i' . L'analyse discriminante recherche des partitions dans ce nuage, figure ci-dessous.

avec :

G : Centre de gravité du nuage.

G_c : Centre de gravité de chaque partition.

Ce schéma représente les partitions d'un nuage de points-échantillons et de leur centre de gravité.

La recherche des partitions va correspondre à une nouvelle décomposition de l'inertie.

Autour de G de coordonnées

$$G_j = \sum_i m_i C_{ij} = n \sum_i C_{ij},$$

l'inertie totale vaut :

$$I = \sum_i m_i d^2(i, g) = n \sum_i d^2(i, g)$$

Autour du centre de gravité de chaque classe de coordonnées :

$$g = \frac{\sum_{i \in c} m_i C_{ij}}{\sum_{i \in c} m_i} = \frac{\sum_{i \in c} C_{ij}}{n_c}$$

On définit l'inertie interne d'une classe :

$$I_{int}(c) = \sum_{i \in c} m_i d^2(i, g_c)$$

Chaque classe va posséder une masse :

$$m_c = \sum_{i \in c} m_i$$

L'inertie externe aux classes sera :

$$I_{ext} = \sum_c m_c d^2(g, g_c)$$

Le théorème fondamental de l'analyse discriminante indique que l'inertie totale est la somme de l'inertie externe et de l'inertie interne de chaque classe :

$$I = I_{ext} + \sum_c I_{int}(c)$$

L'algorithme utilisé de classification ascendante hiérarchique part du nuage initial en considérant que chaque individu est une classe, soit :

$$\sum_c I_{int} = 0 \quad \text{et} \quad I_{ext} = I$$

On choisit ensuite deux classes a et b tel que le saut d'inertie interne (n) soit minimum :

$$(n) = \frac{m_a \cdot m_b}{m_a + m_b} d^2(a, b)$$

On répète l'opération jusqu'à ce que le nuage ne forme plus qu'une seule classe, soit :

$$I = I_{int} \quad \text{et} \quad I_{ext} = 0$$

Nous avons interprété les classes d'échantillons trouvés dans l'ordre de leur pourcentage de contribution à l'inertie en se ramenant au plan d'expérience initial, afin d'expliquer l'effet des facteurs temps d'incubation et apports organiques et minéraux.

Les analyses multivariées ont été réalisées à l'aide du logiciel statistique N. D. M. S. (NOIROT et All. 1981), compatible avec SPCLAS (PANSU 1983) sur HP 9845.

6.3.2. Sol d'apport à tendance verticale :

a) Analyse en composantes principales :

- **Axe n°1** : Il représente 22 % de contribution à l'inertie. Le tableau suivant présente les principales contributions de part et d'autre du centre de gravité de l'axe 1 et les corrélations correspondantes avec cet axe, (Plan factoriel dans la figure n°39) .

Cet axe traduit principalement une opposition fractions fines et fractions agrégées.

| Var. | Ctr. | Cor. | | Var. | Ctr. | Cor. |
|------|------|------|---------------|------|------|------|
| Age | 158 | 444 | | Pf4 | 194 | 545 |
| Agb | 84 | 236 | | A+L | 161 | 454 |
| Aga | 62 | 174 | → opposés à → | Pls | 73 | 206 |
| AFP | 27 | 75 | | MOL | 57 | 160 |
| AHP | 20 | 56 | | CHT | 55 | 155 |
| | | | | CT | 54 | 151 |

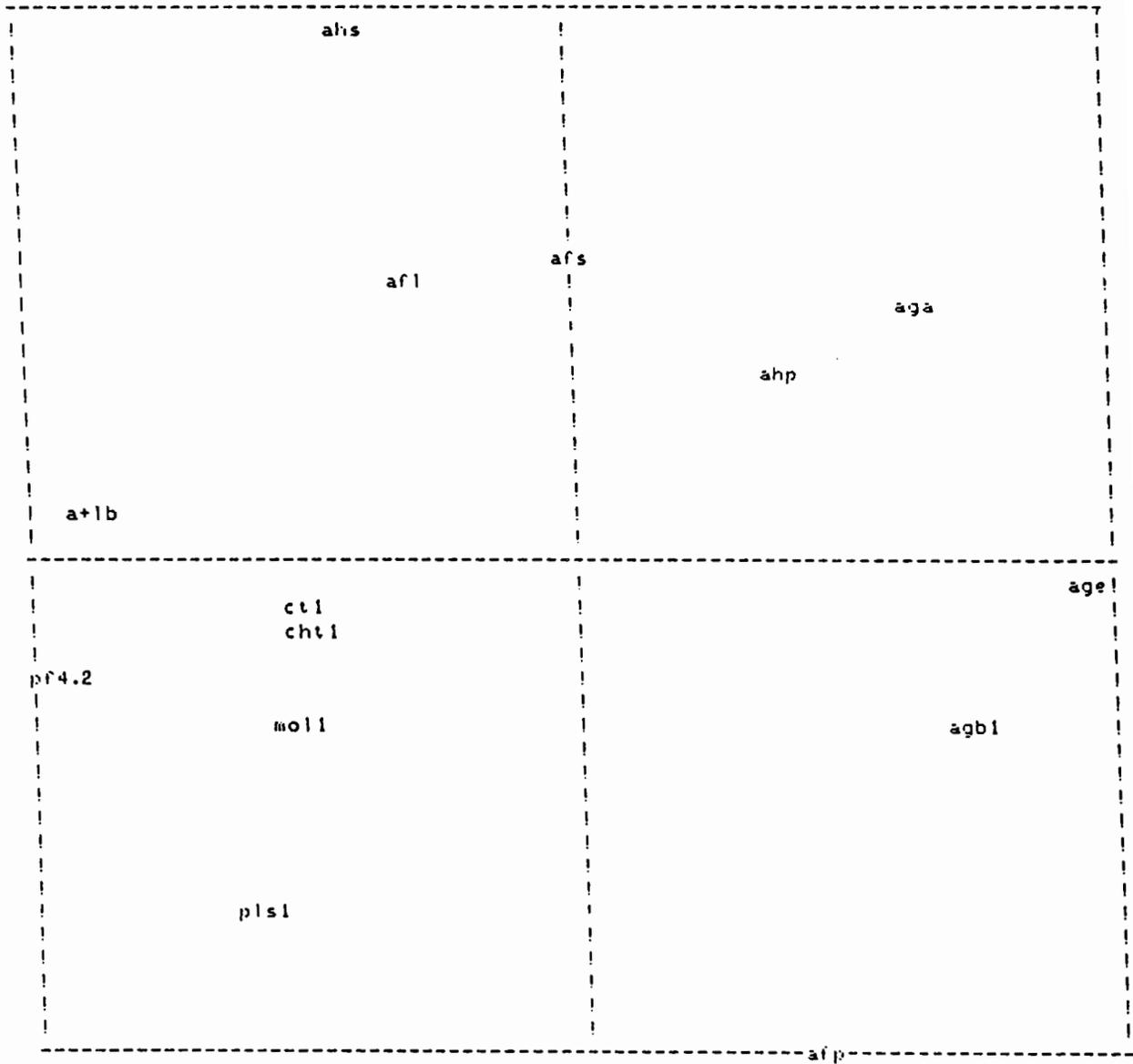
Tableau n°48 : Contributions et corrélations sur l'axe 1.

avec Var. = variable.
 Ctr. = contribution.
 Cor. = corrélation.

Figure n°39

Plan factoriel
Analyse en composantes principales
des données centrées réduites du sol
peu évolué d'apport à tendance verticale.

PLAN FACTORIEL : axe horizontal = 1 axe vertical = 2



Legende en annexe F.O

On remarque également une opposition entre les produits humifiés (acides fulviques et humiques extractibles au pyrophosphate de sodium), et les produits jeunes (matières organiques légères, polysaccharides et carbone de l'humine totale).

Les fractions agrégées s'opposent également aux mesures d'humidité au point de flétrissement, du fait probablement de la diminution de la mouillabilité des agrégats et de l'étroite relation entre le point de flétrissement et les taux d'éléments fins.

Cette répartition suggère donc deux phénomènes liés à l'agrégation, l'un en début et l'autre en fin d'incubation en accord avec les courbes d'agrégats en fonction du temps.

- **Axe n°2** : Il représente 17 % de contribution à l'inertie.

Cet axe semble représenter prioritairement des changements intervenants dans la composition des matières humiques au cours de l'humification, traduisant des processus de transformation et de polycondensation. On a des produits tels que les matières organiques légères et les polysaccharides qui s'opposent quantitativement à d'autres produits dont l'évolution est liée à la transformation des précédents (A. H. S. , A. F. S. , A. F. L.).

Cet axe traduit également une différenciation des mécanismes d'agrégation. Dans le fait que les agrégats après prétraitement au benzène sont les plus influencés par les composés de formation récente comme les polysaccharides alors que les agrégats après prétraitement à l'alcool γ sont insensibles.

| Var. | Ctr. | Cor. | | Var. | Ctr. | Cor. |
|------|------|------|----------------------|------|------|------|
| AHS | 311 | 683 | | AFP | 226 | 497 |
| AFS | 93 | 205 | → <u>opposés à</u> → | Pls | 113 | 249 |
| AFL | 81 | 179 | | Agb | 25 | 55 |
| Aga | 68 | 150 | | MOL | 23 | 51 |
| AHP | 38 | 84 | | | | |

Tableau n°49 : Contributions et corrélations sur l'axe 2.

Ce phénomène se traduit également par la répartition des échantillons sur les axes. Les échantillons à 15 jours d'incubation se retrouvent du côté Agb et produits "jeunes" ou peu polycondensés alors que les échantillons fortement incubés et amendés sont à l'autre bout. Ceci est en bon accord avec les courbes d'agrégats stables après prétraitement au benzène qui passent par un fort maximum à 15 jours d'incubation, alors que les courbes d'agrégats stables après prétraitement à l'alcool n'ont pas ce maximum. La figure n°39 représente le plan factoriel des axes 1 et 2.

- **Axe n°3** : Il ne représente plus que 7 % de contribution à l'inertie. Il traduit également des changements intervenant dans la composition des matières humiques en cours d'humification.

b) Classification ascendante hiérarchique :

L'influence de l'apport organique est bien marquée sur la répartition des classes. Le fractionnement principal fournit deux classes d'échantillons (1 et 2), bien différenciées avec 29 % de contribution à l'inertie. Il s'agit d'une part des échantillons non amendés et d'autre part de tous les échantillons ayant reçu un apport organique.

Aucun fractionnement significatif n'intervient ensuite sur la première classe. Cela veut dire que les échantillons de ce sol à tendance verticale non amendés évoluent très peu en fonction du temps d'incubation, en accord avec la faible réserve organique de ce sol.

Le tableau n°50, représente la répartition des classes d'échantillons pour le sol à tendance verticale d'après leurs enrichissements en matière organique et leurs temps d'incubation, selon le plan d'expérience (dendogramme de la figure n°40). Les chiffres 1 et 2 signifiant par ordre de leur position de la gauche vers la droite, le niveau hiérarchique de fractionnement.

| paille (en %) | 0 | 1 | 3 |
|--------------------|---|-------|------|
| Temps d'incubation | | | |
| To | 1 | 221 | 221 |
| 15 jours | 1 | 22221 | 21 |
| 30 jours | 1 | 22222 | 2221 |
| 90 jours | 1 | 22222 | 2221 |
| 180 jours | 1 | 22222 | 2221 |
| 270 jours | 1 | 22222 | 2221 |

Tableau n°50 : Les classes d'échantillons en fonction de l'apport de paille et du temps d'incubation.

De la classe 2 se distingue ensuite assez nettement (avec 18 % de contribution à l'inertie), l'échantillon à 3 % de matière organique (classe 21), incubé pendant 15 jours. Le taux d'agrégats stables après prétraitement au benzène contribue le plus à la séparation de cette classe.

Figure n°40

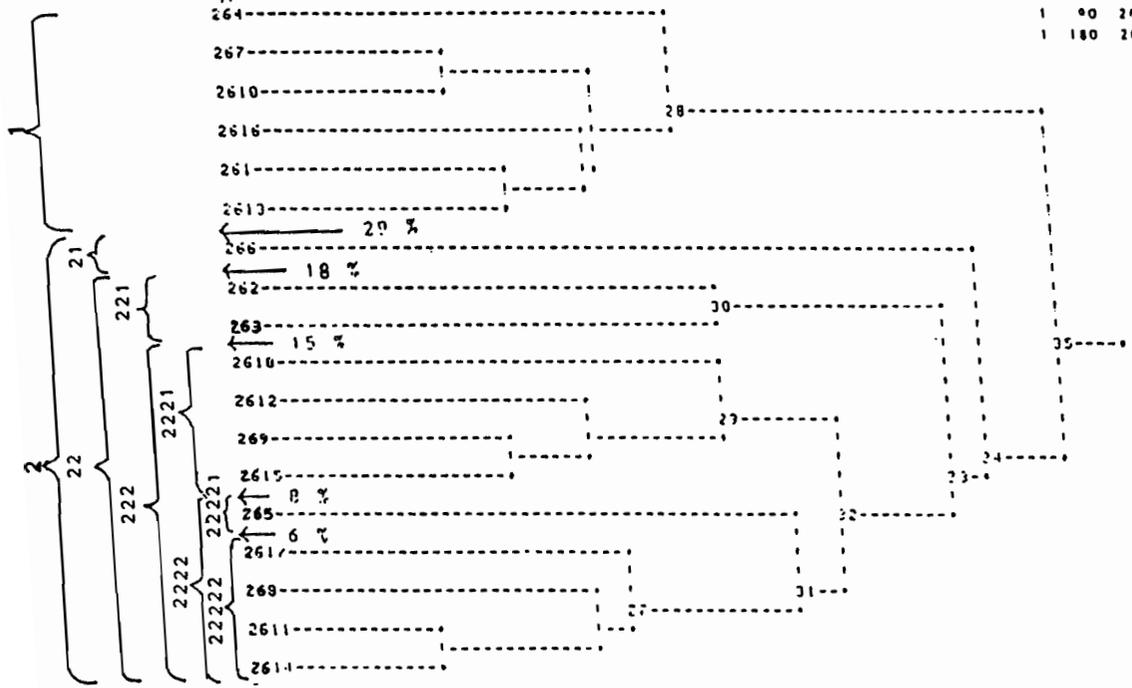
Dendrogramme.

Classification ascendante hiérarchique du sol peu évolué d'apport à tendance verticale.

.....
 Classification ascendante hiérarchique sur
 le fichier DEVERT: Distance centrée réduite

Caractéristiques du nuage
 10 individus et 14 variables
 Inertie totale : 14

| num | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | H. O. Inc. | n° |
|------|----|---|----|---|-----------|-------------|---|---|---|----|----|----|----|----|------------|------|
| 191 | 11 | 1 | 14 | 1 | .0644351 | .451 | | | | | | | | | | |
| 201 | 7 | 1 | 10 | 1 | .0985741 | .631 | | | | | | | | | | |
| 211 | 9 | 1 | 15 | 1 | .1225901 | .971 | | | | | | | | 0 | 15 | 261 |
| 221 | 1 | 1 | 13 | 1 | .1746111 | .951 | | | | | | | | 0 | 30 | 267 |
| 231 | 12 | 1 | 21 | 1 | .2307391 | 1.651* | | | | | | | | 0 | 90 | 2610 |
| 241 | 0 | 1 | 19 | 1 | .2326561 | 1.651* | | | | | | | | 0 | 270 | 2616 |
| 251 | 16 | 1 | 22 | 1 | .2359231 | 1.631* | | | | | | | | 0 | 0 | 261 |
| 261 | 20 | 1 | 25 | 1 | .2677231 | 1.911* | | | | | | | | 0 | 180 | 2613 |
| 271 | 17 | 1 | 24 | 1 | .2755031 | 2.111** | | | | | | | | 3 | 15 | 266 |
| 281 | 4 | 1 | 24 | 1 | .4502221 | 3.221*** | | | | | | | | 1 | 0 | 262 |
| 291 | 18 | 1 | 23 | 1 | .5359221 | 3.831*** | | | | | | | | 3 | 0 | 263 |
| 301 | 2 | 1 | 3 | 1 | .5492571 | 3.921*** | | | | | | | | 3 | 270 | 2618 |
| 311 | 5 | 1 | 27 | 1 | .8491931 | 6.051***** | | | | | | | | 3 | 90 | 2612 |
| 321 | 29 | 1 | 31 | 1 | 1.1206391 | 8.091***** | | | | | | | | 3 | 30 | 269 |
| 331 | 30 | 1 | 32 | 1 | 2.1434071 | 15.311***** | | | | | | | | 3 | 180 | 2615 |
| 341 | 6 | 1 | 33 | 1 | 2.593281 | 19.451***** | | | | | | | | 1 | 15 | 265 |
| 351 | 28 | 1 | 34 | 1 | 4.0963281 | 27.171***** | | | | | | | | 1 | 270 | 2617 |
| n° | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 264 | | | | | | | | | | | | | | 1 | 30 | 268 |
| 267 | | | | | | | | | | | | | | 1 | 90 | 2611 |
| 2610 | | | | | | | | | | | | | | 1 | 180 | 2614 |



Legende en annexe F.O

Ceci est en liaison avec une agrégation rapide de ce sol soumis à un fort apport organique. la classification montre que ce phénomène d'agrégation est ici nettement le plus influent par rapport aux autres évolutions en fonction du temps.

Se séparent ensuite les deux échantillons amendés non incubés (classe 221), avec une contribution à l'inertie de 15 % sous l'influence prépondérante des variations de taux de matière non humifiée, (d'après les corrélations de l'axe 2, tableau n°49).

Des 9 échantillons restants dans la classe 2 se séparent ensuite les échantillons amendés à 3 % et à 1 % (classes 2221 et 2222) avec une contribution de 8 % à l'inertie. Les variations dans le stockage des compartiments humifiés extractible à la soude ou au pyrophosphate, semblent influencer prioritairement ces deux classes, plus que la contribution des agrégats.

Le dernier fractionnement (6 %) concerne la sous-classe des échantillons à 1 % d'apport, desquels se sépare l'échantillon incubé pendant 15 jours (classe 22221), sous l'influence essentielle des taux d'agrégats comme pour le sol à 3 % d'apport incubé pendant 15 jours, avec un maximum d'agrégats à cette période.

Dans ce sol à tendance verticale, la quantité de matière organique apportée semble influencer les propriétés du sol plus que le temps d'incubation. Les faibles temps d'incubation des échantillons amendés provoquent l'influence la plus significative sur la stabilité des agrégats et L'évolution des échantillons ne semble pas très importante après 1 mois d'incubation.

6.3.3 Sol salé carbonaté (sans apport de gypse) :

a) Analyse en composantes principales :

- **Axe n°1** : Il représente 32% de contribution à l'inertie.

| Var. | Ctr. | Cor. | | Var. | Ctr. | Cor. |
|------|------|------|----------------------|------|------|------|
| Age | 220 | 923 | | A+L | 186 | 780 |
| Agb | 169 | 709 | → <u>opposés à</u> → | Pf4 | 57 | 238 |
| Aga | 156 | 652 | | AFL | 5 | 19 |
| AHP | 100 | 421 | | | | |

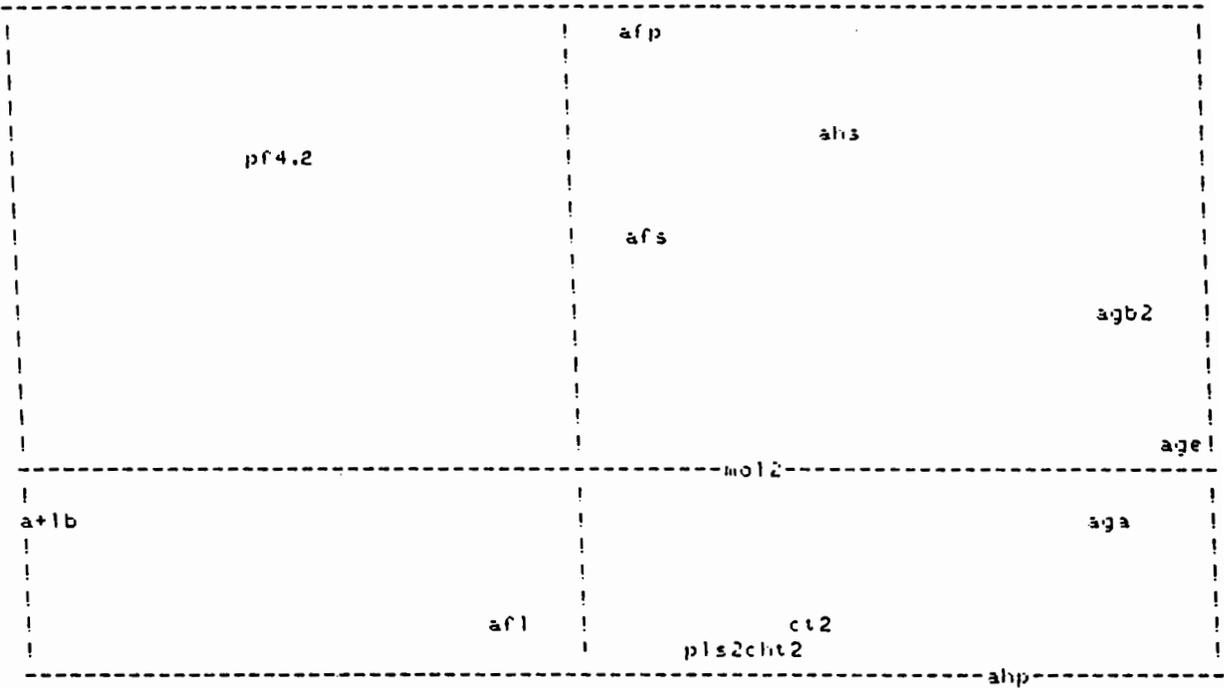
Tableau n°51 : Contributions et corrélations sur l'axe 1.

L'explication de cet axe est assez analogue à celle du sol à tendance verticale, (Plan factoriel dans la figure n°41).

Figure n°41

Plan factoriel.
Analyse en composantes principales
des données centrées réduites du sol
salé carbonaté sans apport de gypse.

PLAN FACTORIEL : axe horizontal = 1 axe vertical = 2



Légende en annexe F.0

- **Axe n°2** : Il représente 15 % de contribution à l'inertie.

| Var. | Ctr. | Cor. | | Var. | Ctr. | Cor. |
|------|------|------|---------------|------|------|------|
| AFP | 322 | 629 | | AHP | 53 | 103 |
| AHS | 172 | 337 | | CHT | 53 | 103 |
| Pf4 | 158 | 308 | → opposés à → | Pls | 40 | 77 |
| AFS | 87 | 169 | | CT | 36 | 71 |
| Agb | 45 | 88 | | AFL | 30 | 50 |

Tableau n°52 : Contributions et corrélations sur l'axe 2.

L'interprétation de cet axe est moins évidente. Il semble traduire l'évolution des matières organiques lors des processus d'humification. On remarque d'une part une opposition entre les formes "jeunes" (AFL, Pls, CHT) et les acide fulviques extractibles au pyrophosphate de sodium qui en provient, d'autre part simultanément une opposition de ces acides fulviques avec les formes plus condensées (acides humiques extractibles au pyrophosphate de sodium), qui contribuent donc à l'inertie dans le même sens que les premiers.

On remarque aussi sur l'axe 2 une opposition entre les formes humiques stabilisantes et l'humidité au point de flétrissement. La figure n°41 représente le plan factoriel des axes 1 et 2.

- **Axe n°3** : Il ne représente plus que 7 % de contribution à l'inertie.

| Var. | Ctr. | Cor. | | Var. | Ctr. | Cor. |
|------|------|------|---------------|------|------|------|
| AFS | 305 | 277 | | Pls | 73 | 67 |
| Aga | 238 | 217 | → opposés à → | MOL | 60 | 55 |
| AFL | 181 | 165 | | Agb | 29 | 27 |

Tableau n°53 : Contributions et corrélations sur l'axe 3.

Cet axe s'interprète comme l'influence de deux types de formes humiques jeunes. Les débris végétaux non encore humifiés et les polysaccharides qu'ils apportent semblent exercer une influence indirecte sur l'agrégation favorisant les formes d'agrégats stables après prétraitement au benzène.

b) Classification ascendante hiérarchique :

Les données chimiques centrées réduites de cette expérience, permettent d'identifier deux classes principales d'échantillons (de 25 % de contribution à l'inertie), elles mêmes divisées ensuite chacune en trois classes. Ces classes sont déterminées par le dendogramme de la figure n°42.

| Paille (en %) | 0 | 1 | 3 |
|--------------------|-----|-----|-----|
| Temps d'incubation | | | |
| To | 121 | 121 | 11 |
| 15 jours | 21 | 122 | 11 |
| 30 jours | 21 | 122 | 122 |
| 90 jours | 21 | 221 | 122 |
| 180 jours | 221 | 221 | 221 |
| 270 jours | 221 | 222 | 222 |

Tableau n°54 : Les classes d'échantillons en fonction de l'apport de paille et du temps d'incubation.

Le tableau n°54, montre la répartition des classes dans le plan d'expérience selon un système d'indice analogue au précédent.

La contribution aux deux classes principales 1 et 2 est surtout due aux matières organiques légères non humifiées et aux matières peu humifiées (acides fulviques libres, humine et polysaccharides).

Dans la classe n°1 (11 % de contribution à l'inertie), la moins humifiée, le classement fournit une sous-classe 11 principale correspondant au sol très organique non ou très peu incubé, et une deuxième sous-classe 12 correspondant à une humification faible parmi laquelle se différencient les échantillons peu organiques non incubés.

Dans la classe n°2 (18 % de contribution à l'inertie), la plus humifiée, la contribution à la première sous-classe (21) est surtout dûe aux taux d'agrégats stables après prétraitement à l'alcool et à l'air. Les échantillons du sol salé carbonaté qui n'ont pas reçu d'amendement organique se désagrègent à des incubations moyennes. Par contre la mesure des taux d'agrégats après prétraitement au benzène ne contribue pas à l'inertie pour ces échantillons n'ayant pas reçu d'amendement organique.

La sous-classe 22 qui regroupe les échantillons les plus incubés se différencie surtout par une contribution des acides humiques extractibles au pyrophosphate de sodium. Ceci confirme les courbes d'évolution en fonction du temps des acides humiques à partir du troisième mois d'incubation.

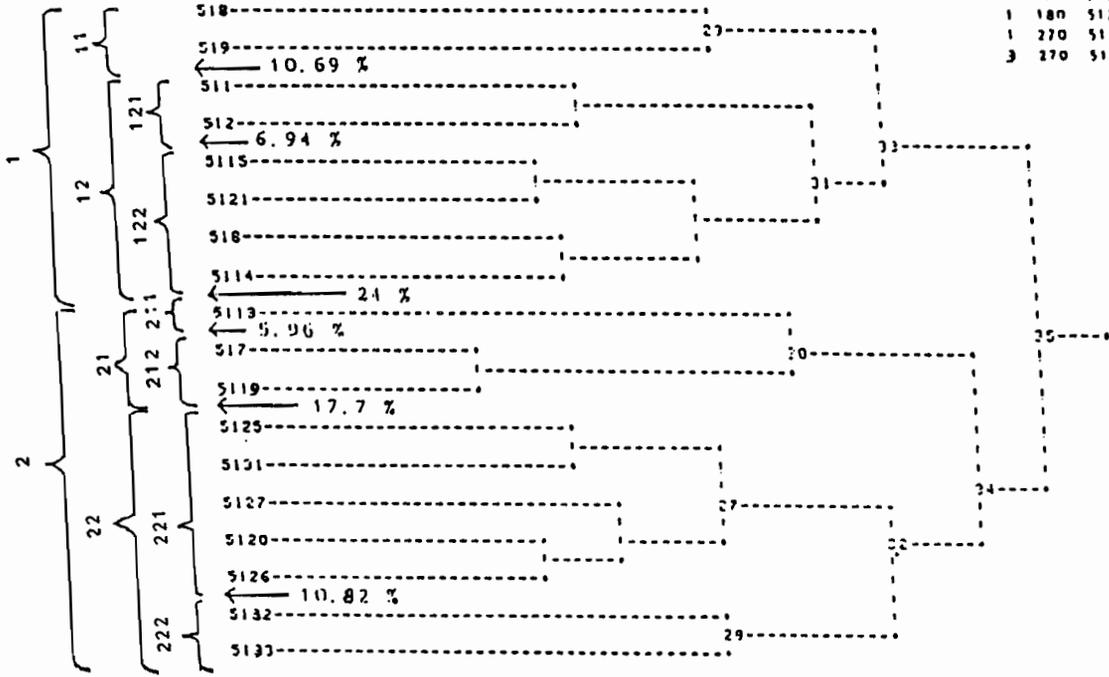
Figure n°42

Dendrogramme.
 Classification ascendante hiérarchique du
 sol salé carbonaté sans apport de gypse

.....
 Classification ascendante hiérarchique sur
 le fichier DESAL2: Distance centrée réduite

Caractéristiques du usage
 18 individus et 14 variables
 Inertie totale : 14

| num | 1 | sin | 1 | bin | 1 | lar | 1 | pct | 1 | n. o. | inc. | n° | |
|-------|-------|-----|----|-----|-----------|--------|---|-----|---|-------|------|------|------|
| 191 | 4 | 1 | 10 | 1 | .0950671 | .691 | | | | | | | |
| 201 | 11 | 1 | 14 | 1 | .1565211 | 1.121 | | | | | | | |
| 211 | 7 | 1 | 12 | 1 | .1701361 | 1.221 | | | | | | | |
| 221 | 5 | 1 | 8 | 1 | .1872411 | 1.351 | | | | | | | |
| 231 | 13 | 1 | 16 | 1 | .1932401 | 1.391 | | | | 3 | 0 | 518 | |
| 241 | 1 | 1 | 2 | 1 | .2296571 | 1.641 | | | | 1 | 15 | 519 | |
| 251 | 15 | 1 | 20 | 1 | .2675731 | 1.911 | | | | 0 | 0 | 514 | |
| 261 | 21 | 1 | 22 | 1 | .4629701 | 3.311 | | | | 1 | 0 | 512 | |
| 271 | 23 | 1 | 25 | 1 | .5079281 | 3.631 | | | | 3 | 30 | 515 | |
| 281 | 17 | 1 | 18 | 1 | .5137801 | 3.671 | | | | 3 | 90 | 5124 | |
| 291 | 3 | 1 | 6 | 1 | .5510781 | 3.941 | | | | 1 | 15 | 518 | |
| 301 | 7 | 1 | 19 | 1 | .8344101 | 5.961 | | | | 1 | 30 | 5114 | |
| 311 | 24 | 1 | 26 | 1 | .8702781 | 6.941 | | | | 0 | 30 | 5117 | |
| 321 | 27 | 1 | 28 | 1 | 1.4170391 | 10.121 | | | | | 0 | 15 | 519 |
| 331 | 29 | 1 | 31 | 1 | 1.4968621 | 10.631 | | | | | 0 | 0 | 5119 |
| 341 | 30 | 1 | 32 | 1 | 2.4752761 | 17.681 | | | | | 0 | 180 | 5125 |
| 351 | 33 | 1 | 34 | 1 | 3.4670441 | 24.761 | | | | | 0 | 270 | 5131 |
| ----- | | | | | | | | | | | | | |
| n° | | | | | | | | | | | | | |
| 518 | ----- | | | | | | | | | | | | |
| 519 | ----- | | | | | | | | | | | | |
| 511 | ----- | | | | | | | | | | | | |
| 512 | ----- | | | | | | | | | | | | |
| 5115 | ----- | | | | | | | | | | | | |
| 5121 | ----- | | | | | | | | | | | | |
| 518 | ----- | | | | | | | | | | | | |
| 5114 | ----- | | | | | | | | | | | | |
| 5113 | ----- | | | | | | | | | | | | |
| 517 | ----- | | | | | | | | | | | | |
| 5119 | ----- | | | | | | | | | | | | |
| 5125 | ----- | | | | | | | | | | | | |
| 5131 | ----- | | | | | | | | | | | | |
| 5127 | ----- | | | | | | | | | | | | |
| 5120 | ----- | | | | | | | | | | | | |
| 5126 | ----- | | | | | | | | | | | | |
| 5132 | ----- | | | | | | | | | | | | |
| 5133 | ----- | | | | | | | | | | | | |



Legende en annexe F.0

Parmi cette classe se différencient (11 %) les échantillons 222 qui sont les plus incubés et ayant reçu le plus d'apport organique.

6.3.4. Sol salé carbonaté (avec apport de gypse) :

a) Analyse en composantes principales :

- **Axe n°1** : Cet axe représente 33 % de contribution à l'inertie. Ce qui est analogue au sol salé carbonaté sans apport de gypse. Il peut s'interpréter de la même manière que précédemment. La différenciation principale concerne toujours les taux d'agrégats. Ceux-ci semblent plus nettement en relation avec l'ensemble des fractions organiques, (voir le plan factoriel dans la figure n°43).

| Var. | Ctr. | Cor. | | Var. | Ctr. | Cor. |
|------|------|------|---------------|------|------|------|
| Age | 191 | 829 | | A+L | 153 | 662 |
| Agb | 161 | 697 | | | | |
| Aga | 155 | 671 | → opposés à → | | | |
| AHS | 90 | 389 | | | | |
| CT | 71 | 309 | | | | |
| AHP | 45 | 194 | | | | |

Tableau n°55 : Contributions et corrélations sur l'axe 1.

La répartition des échantillons selon cet axe est caractéristique de cette observation. Les coordonnées des fractions fines (A+L), correspondent aux échantillons n'ayant pas reçu de matière organique et incubés à des temps moyens.

Les coordonnées correspondant aux agrégats, sont reliées principalement aux échantillons les plus amendés en paille. Cette répartition est proche de celle obtenue pour le sol salé carbonaté sans apport de gypse.

- **Axe n°2** : Il représente 13 % de contribution à l'inertie.

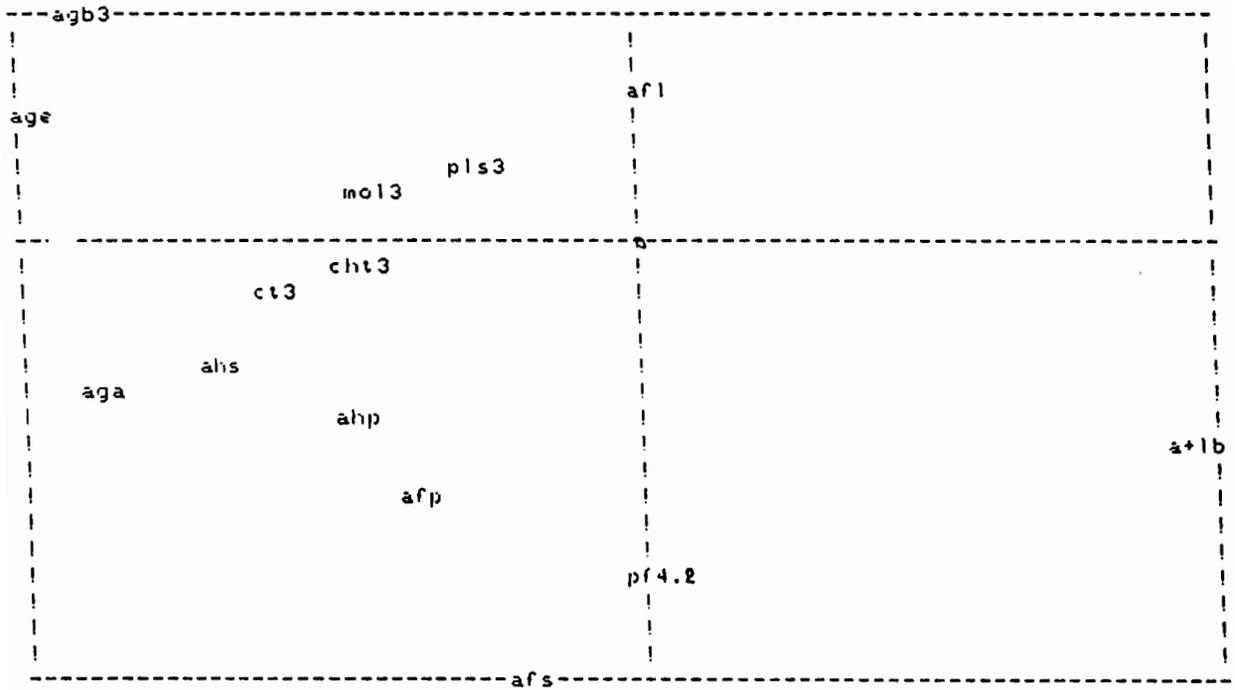
| Var. | Ctr. | Cor. | | Var. | Ctr. | Cor. |
|------|------|------|---------------|------|------|------|
| Agb | 71 | 117 | | AFS | 312 | 509 |
| AFL | 33 | 54 | → opposés à → | Pf4 | 203 | 335 |
| Age | 28 | 46 | | AFP | 121 | 197 |
| Pls | 8 | 14 | | A+L | 85 | 138 |
| | | | | AHP | 61 | 100 |
| | | | | Aga | 39 | 63 |

Tableau n°56 : Contributions et corrélations sur l'axe 2.

Figure n°43

Plan factoriel.
Analyse en composantes principales
des données centrées réduites du sol
salé carbonaté avec apport de gypse.

PLAN FACTORIEL : axe horizontal = 1 axe vertical = 2



Legende en annexe F.0

L'interprétation est presque analogue à celle de l'axe n°2 du même sol sans gypse.

L'effet observé dans ce cas sur l'humidité au point de flétrissement, se manifeste uniquement sur l'axe n°2 et semble uniquement lié aux formes d'agrégats stabilisés par les polysaccharides et les acides fulviques libres. La figure n°43 représente le plan factoriel des axes 1 et 2.

b) Classification ascendante hiérarchique :

On identifie toujours deux classes principales de l'échantillon, avec 25 % de contribution à l'inertie. Dans chacune des classes on peut ensuite identifier deux niveaux de classification significatifs représentés dans le tableau n° 57 (ci-dessous), en utilisant un système d'indices identique au précédent. Cette séparation est déterminée également par le dendogramme de la figure n°44.

Contribuent le plus à ce premier classement, les trois mesures des taux d'agrégats opposés aux fractions fines (A+L), et liées aux formes humifiées (AHS, AHP et AFP).

| paille (en %) | 0 | 1 | 3 |
|--------------------|-----|-----|-----|
| Temps d'incubation | | | |
| To | 221 | 221 | 21 |
| 15 jours | 222 | 122 | 122 |
| 30 jours | 222 | 222 | 122 |
| 90 jours | 222 | 222 | 122 |
| 180 jours | 222 | 222 | 122 |
| 270 jours | 11 | 11 | 122 |

Tableau n°57 : Les classes d'échantillons en fonction de l'apport de paille et du temps d'incubation.

Le niveau supérieur suivant de classification concerne la séparation dans la classe n°2 de l'échantillon ayant reçu 3 % de matière organique sans incubation (classe 21 : 20 % de contribution à l'inertie). A cette classe contribuent principalement les taux d'agrégats, le carbone total et les matières peu humifiées (résidus végétaux, humine et polysaccharides).

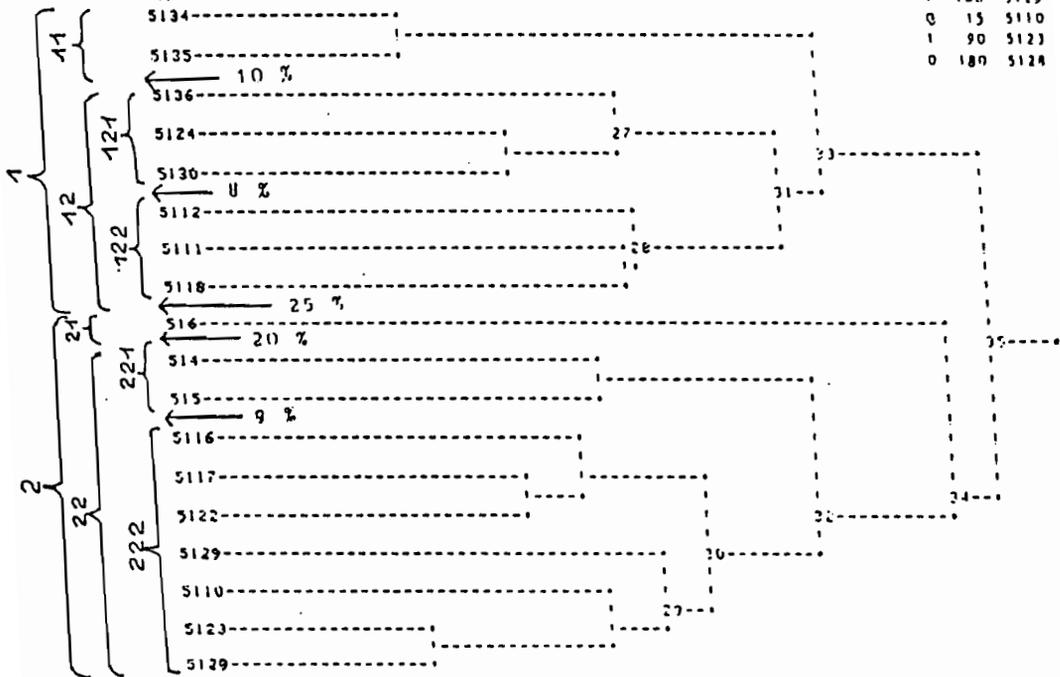
Figure n°44

Dendogramme.
Classification ascendante hiérarchique du
sol salé carbonaté avec apport de gypse.

.....
Classification ascendante hiérarchique sur
le fichier MESNLG: Distance centrée réduite

Caractéristiques du nuage
10 individus et 14 variables
Inertie totale : 14

| num | ain | ben | lin | l | pct | |
|-----|-----|-----|-----|---|-----------|------------|
| 191 | 16 | 1 | 17 | ! | .0928141 | .651 |
| 201 | 11 | 1 | 13 | ! | .0961121 | .671 |
| 211 | 12 | 1 | 15 | ! | .2010031 | 1.441 |
| 221 | 0 | 1 | 10 | ! | .2022531 | 1.441 |
| 231 | 7 | 1 | 22 | ! | .2954911 | 2.111 |
| 241 | 4 | 1 | 20 | ! | .3211961 | 2.291 |
| 251 | 1 | 1 | 2 | ! | .3274241 | 2.341 |
| 261 | 5 | 1 | 9 | ! | .3394161 | 2.851 |
| 271 | 10 | 1 | 21 | ! | .4071151 | 2.911 |
| 281 | 6 | 1 | 26 | ! | .4390161 | 3.131 |
| 291 | 14 | 1 | 24 | ! | .4851541 | 3.471 |
| 301 | 23 | 1 | 29 | ! | .6033991 | 4.361 |
| 311 | 27 | 1 | 28 | ! | 1.0735991 | 7.671 |
| 321 | 25 | 1 | 30 | ! | 1.2519311 | 9.941 |
| 331 | 19 | 1 | 31 | ! | 1.4135321 | 10.101 |
| 341 | 3 | 1 | 32 | ! | 2.8553661 | 20.401 |
| 351 | 33 | 1 | 34 | ! | 3.5306391 | 25.221 |
| | | | | | | n° |
| | | | | | | 0 270 5134 |
| | | | | | | 1 270 5135 |
| | | | | | | 3 270 5136 |
| | | | | | | 3 90 5124 |
| | | | | | | 3 180 5130 |
| | | | | | | 3 15 5112 |
| | | | | | | 1 15 5111 |
| | | | | | | 3 90 5118 |
| | | | | | | 0 0 516 |
| | | | | | | 0 0 511 |
| | | | | | | 1 0 515 |
| | | | | | | 0 10 5116 |
| | | | | | | 1 30 5117 |
| | | | | | | 0 90 5122 |
| | | | | | | 1 180 5129 |
| | | | | | | 0 15 5110 |
| | | | | | | 1 90 5123 |
| | | | | | | 0 180 5129 |



Legende en annexe F.0

Le fractionnement suivant (10 % de contribution à l'inertie), concerne la classe n°2 la plus organique d'où se séparent les deux échantillons ayant reçu les plus faibles apports, mais aux temps d'incubation les plus élevés. A cette classe contribuent les taux d'agrégats et particulièrement les agrégats stables après prétraitement à l'alcool, opposés principalement aux fractions fines (A+L) et à l'humidité au point de flétrissement.

Vient ensuite dans la sous-classe 22, la séparation des deux échantillons non incubés. Cette séparation s'explique de manière analogue au premier sous-fractionnement de la classe n°1.

La contribution du carbone du culot non extractible semble plus importante dans les échantillons non incubés qui ont reçu du gypse que dans le sol salé carbonaté sans apport de gypse. Ce phénomène peut sans doute s'expliquer par un piègeage des matières végétales non humifiées dans le culot d'humine non extractible sous l'influence du sulfate de calcium.

La sous-classe 222 concerne un nombre relativement important d'échantillons que les techniques analytiques employées ne permettent pas de différencier de manière significative. Ce sont les échantillons non ou peu amendés (0 et 1 % de paille), et incubés de 15 jours à 6 mois. Cette observation est en bonne relation avec les courbes en fonction du temps du carbone total, du carbone du culot d'humine et des taux d'agrégats stables après prétraitement au benzène.

Par rapport au sol salé carbonaté sans apport de gypse, ces courbes sont moins différenciées pour les apports faibles (0 et 1 % de paille) et plus nettement séparées de celles concernant l'apport à 3 % de paille.

Par ailleurs on n'observe pas la sous-classe de l'expérience précédente concernant les échantillons à structure dégradée à des incubations moyennes pour des apports nuls. Ceci est dû à l'amélioration de la cohésion des agrégats sous l'action du gypse.

La sous-classe 12 est la dernière à donner lieu à un fractionnement (8 %), en fonction du temps d'incubation. Ainsi contrairement à la précédente, cette sous-classe qui concerne majoritairement tous les échantillons de forts apports se différencie après un mois d'incubation.

Ceci est en accord avec les courbes traduisant pour cette expérience une augmentation particulièrement forte des agrégats pour l'apport à 3 % au cours du premier mois d'incubation.

6.3.5 Analyse comparative du sol salé carbonaté avec ou sans gypse :

Pour approfondir la comparaison, la question est la suivante : Est-ce que l'influence de l'apport du gypse sur la stabilité des agrégats provient du gypse lui même ou bien de l'influence de celui-ci

sur la stabilisation du complexe argilo-humique, la fixation et la décomposition des matières organiques apportées? Une classification hiérarchique regroupant les deux expériences tente d'apporter une réponse.

a) Classification ascendante hiérarchique :

| Gypse-Paille (en %) | 0-0 | 1-0 | 0-1 | 1-1 | 0-3 | 1-3 |
|---------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Temps d'incubation | | | | | | |
| To | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 |
| 15 jours | 12 | 12 | 22 | 21 | 21 | 21 |
| 30 jours | 12 | 12 | 12 | 12 | 21 | 21 |
| 90 jours | 12 | 12 | 11 | 11 | 21 | 21 |
| 180 jours | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 21 |
| 270 jours | 11 | 11 | 11 | 11 | 21 | 21 |

Tableau n°58 : Les classes d'échantillons en fonction du temps d'incubation et des apports de gypse et de paille.

Le tableau n°58, montre la répartition des classes d'échantillons du sol salé carbonaté selon le plan d'expérience à 3 variables (apport de gypse, apport organique et temps d'incubation).

Cette classification fournit deux premiers sous-nuages avec une contribution à l'inertie de 19 % contenant chacune un nombre à peu près égal d'échantillons (19 dans l'une et 17 dans l'autre). Chacune des deux classes comprend environ autant d'échantillons ayant reçu ou non du gypse. Ce n'est donc pas un apport de gypse en soi qui exerce une influence prépondérante sur les propriétés du sol mais l'interaction gypse- matière organique.

A la formation de ces deux classes, contribuent principalement le taux de carbone organique et plus particulièrement les fractions peu humifiées (matières organiques légères, acides fulviques libres, polysaccharides et carbone de l'humine non extractible).

La différenciation suivante (16 % de contribution à l'inertie), sépare dans la classe n°2 les échantillons non incubés des échantillons incubés quel que soit l'amendement. A cette différenciation contribuent les matières humiques "jeunes" (polysaccharides, acides fulviques libres), ainsi que les acides humiques extractibles à la soude et les acides fulviques extractibles au pyrophosphate de sodium et les taux d'agrégats stables.

la sous-classe 11 est la mieux agrégée sous l'influence des acides humiques extractibles au pyrophosphate de sodium.

A la sous-classe 22 contribuent les acides fulviques libres, les polysaccharides, le carbone total et le carbone de l'humine. Les matières humiques en liaison avec les taux d'agrégats contribuent principalement à la sous-classe 21.

Le fractionnement suivant concerne la classe n°1 avec 5 % de contribution à l'inertie. Il est provoqué majoritairement par une contribution des acides humiques extractibles au pyrophosphate de sodium et des fractions d'agrégats, en particulier ceux après prétraitement à l'alcool et à l'air.

6.3.6 Conclusion :

Les deux techniques d'analyse de données employées sont complémentaires :

- L'analyse en composantes principales des données centrées réduites, permet d'identifier des relations agrégats-fractions organiques, bien qu'il faille toujours suspecter un manque d'exhaustivité des déterminations.

- La classification hiérarchique associée, permet plutôt des prévisions agronomiques d'évolution des sols sous l'effet des amendements.

Dans chacun des sols, les principales contributions à l'inertie sont procurées par les mesures d'agrégats stables. Cette stabilisation semblant liée prioritairement aux fractions humiques extractibles au pyrophosphate de sodium, et secondairement aux produits organiques de formation récente, comme les polysaccharides microbiens. Ceci sans que l'expérience puisse nous dire si l'influence de ces produits sur l'agrégation s'exerce de manière directe ou bien du fait de leur corrélation avec les microorganismes.

La classification hiérarchique montre plus nettement des différences d'évolution agronomiques pour chacun des sols. Le temps d'incubation intervient faiblement sur l'évolution du sol à tendance verticale dont l'état dépendra surtout du taux d'apport organique.

Par contre le temps d'incubation intervient beaucoup plus sur les propriétés du sol salé en interaction avec l'apport organique. Ce sol pouvant présenter des risques de destabilisation des agrégats à des temps d'incubation moyens en l'absence d'apport organique.

L'apport de gypse évite ce risque et rend les propriétés de ce sol moins liées au temps d'incubation. Toutefois l'influence du gypse sur l'agrégation ne se visualise qu'en interaction avec la matière organique.

CHAPITRE 7 :
DISCUSSION ET SYNTHESE.

7.1 : DISCUSSION DES RESULTATS :

Pour plus de compréhension, nous nous baserons sur l'évolution des agrégats stables après prétraitement au benzène, et essayerons de découper les grandes phases d'évolution de l'agrégation ou de la dispersion et de déterminer le rôle joué par chaque élément (matière humique, gypse, polysaccharides...). Comme il a été déjà observé, nous aurons quatre phases d'évolution d'agrégats stables à discuter et à expliquer en fonction des évolutions des différents facteurs intervenants sur l'agrégation aux différents niveaux. Ces quatre phases sont les suivantes :

1. Agrégation rapide et éphémère (entre le temps zéro et une quinzaine de jours d'incubation).
2. Désagrégation rapide (entre une quinzaine de jours et environ un mois d'incubation).
3. Agrégation stationnaire (entre environ un mois et six mois d'incubation).
4. Amélioration secondaire de l'agrégation (entre environ six mois et neuf mois d'incubation).

7.1.1 : Agrégation rapide et éphémère :

Comme indiqué sur la figure n°33, représentant les taux d'agrégats stables après prétraitement au benzène, on voit que le phénomène est très bref, car il ne concerne que les quinze premiers jours de l'incubation. Mais le plus intéressant est que cette augmentation du taux d'agrégats stables est stupéfiante de par son intensité. Cela s'explique par le fait que durant cette période, il y a une "explosion" de l'activité microbienne dans le sol par les matières végétales introduites et les conditions idéales d'incubation. Cette explosion microbienne se traduit par une fabrication intensive de polysaccharides microbiens agissant sur l'agrégation et la fabrication de filaments mycéliens enrobant les agrégats dans un réseau filamenteux les protégeant contre l'action de l'eau.

Mais il y a aussi la sécrétion de mucus bactériens qui sont soit adsorbé à la surface des feuillets argileux ou qui englobent les particules d'argile (GUCKERT et BREISH 1975), et qui ont aussi une action anti-mouillante sur les agrégats (CHASSIN 1979). Ce processus est donc essentiellement microbien, d'où sont action rapide et peu durable. Bien entendu cette action microbienne est liée à la présence de produits facilement biodégradables, tel que les polysaccharides introduits par les résidus végétaux apportés, qui constituent une source d'énergie pour les bactéries.

Comme il a été vu auparavant sur certains graphiques, l'action de l'apport du sulfate de calcium est à considérer sérieusement. Donc nous prendrons chaque facteur individuellement, pour voir en détail son rôle sur cette brève amélioration du début d'incubation pour les bactéries et les champignons.

- Action des polysaccharides :

Leur action est très importante dans cette phase d'incubation. En effet si l'on compare l'évolution des polysaccharides contenus dans le sol (figure n°26), et les taux d'agrégats stables après prétraitement au benzène durant cette période, on remarque qu'il y a un certain décalage entre les deux processus. En ce sens que le maximum de polysaccharides est au temps zéro (début d'incubation), alors que le maximum d'agrégats stables est à une quinzaine de jours d'incubation. De plus, entre le temps zéro et quinze jours d'incubation, le taux de polysaccharides diminue alors que le taux d'agrégats stables après prétraitement au benzène augmente.

Cette agrégation n'est pas directement liée aux polysaccharides d'origine végétale. Ces derniers constitueraient plutôt le stock énergétique nécessaire à une activité microbienne intense. En consommant les polysaccharides d'origine végétale, la microflore produit des substances agrégatives (mucus bactérien, filaments mycéliens), qui renforcent la résistance des agrégats à l'action de l'eau.

Cette amélioration importante due aux polysaccharides a été signalée par le travail de CHENU (1985), qui précise que c'est le mode d'action des bactéries essentiel, et que l'action des formes filamenteuses (hyphes mycéliens et racines) est moins affirmée.

Selon DOMMERGUES et MANGENOT 1970, ces substances microbiennes, agissent rapidement sur l'agrégation en l'améliorant. Cela agirait entre le dixième jour et le quinzième jour, mais dans notre cas c'est à 15 jours d'incubation que le taux d'agrégats stables a été mesuré et présente les valeurs les plus élevées. Ensuite on note que les taux de polysaccharides totaux (d'origine végétale et microbienne) ont diminué dans des proportions importantes.

- Action du gypse :

Les observations des graphiques b et c de la figure n°33, révèlent que l'enrichissement en gypse du sol salé carbonaté montre que le taux d'agrégats stables du sol témoin augmente légèrement au cours de cette première phase d'agrégation initiale. Mais l'apport de

gypse a surtout un effet sur l'augmentation du taux d'agrégats pour les échantillons enrichis en matière organique, dont le taux d'agrégats stables est plus que doublé respectivement pour chacune des doses de paille introduite.

Le gypse paraît être responsable d'une forte interaction avec l'action de la paille de blé. Cette amélioration de l'agrégation par le gypse est donc indirecte en favorisant probablement l'activité microbienne. Il provoque en effet une diminution plus rapide des polysaccharides, donc il favorise l'activité de la microflore. Il favorise également au cours de cette première phase, la synthèse des acides fulviques de l'extrait pyrophosphate de sodium (A. F. P.). Toutefois le fait que les A. F. P. continuent à augmenter entre quinze jours et un mois d'incubation, semble montrer que leur action sur l'agrégation est faible ou même négative. Dans la première phase, cette action serait compensée par les polysaccharides encore présents ou récemment synthétisés (origine microbienne).

7.1.2 : Désagrégation rapide :

Cette deuxième phase se développe à partir de quinze jours d'incubation, jusqu'à environ un mois. Cette diminution des taux d'agrégats stables paraît liée à la diminution de l'activité microbienne.

En effet la quantité de polysaccharides d'origine végétale diminuant rapidement sous l'action de la microflore, laquelle ne trouvant plus de source énergétique pour assurer son développement, s'attaque aux produits de néosynthèse récents (polysaccharides d'origine microbienne, biomasse microbienne et mycélium), BACHELIER 1966. Ces produits sont directement responsables de la forte amélioration de l'agrégation durant les quinze premiers jours de l'incubation. Cela explique cette désagrégation rapide qui annihile presque totalement l'effet d'amélioration de la première phase.

Les deux principales causes de cette chute brutale de l'agrégation sont donc :

- Une diminution rapide du stock organique biodégradable qui constitue la source énergétique pour l'activité microbienne (action indirecte).
- Une attaque des produits agrégatifs fabriqués durant les quinze premiers jours par la biomasse microbienne (mucus microbien, divers polysaccharides sécrétés par la biomasse, hyphes mycéliens), et ceci rend les agrégats vulnérables comme auparavant à l'action de l'eau.

Cela confirme les observations faites par différents auteurs dont HENIN et Al 1969, MONNIER 1965, sur l'évolution de l'agrégation.

On constate que l'enrichissement en gypse n'empêche pas la destruction aussi poussée des taux d'agrégats stables après prétraitement au benzène. Le taux d'agrégats stables à l'eau diminue même plus fortement pour les sols enrichis en gypse.

Comme indiqué plus haut, l'augmentation des acides fulviques de l'extrait pyrophosphate de sodium (A. F. P.) est alors maximum. On peut penser que ces A. F. P. ont un rôle hydrophile et favorisent plutôt l'éclatement des agrégats, d'où le minimum enregistré à la fin de cette deuxième phase.

Durant ces deux premières phases entre le temps zéro et un mois d'incubation, d'après MONNIER 1965, BACHELIER 1966, il y aurait deux actions agissant simultanément :

- La première est la sécrétion de mucus bactérien entre le temps zéro et une quinzaine de jours d'incubation (notre cas présent), qui agit sur la protection des agrégats par leur action anti-mouillante.

- La deuxième est la fabrication par cette masse microbienne, toujours entre le temps zéro et quinze jours d'incubation, de filaments mycéliens qui agissent sur la protection des agrégats par la formation d'un réseau entourant les agrégats, leur permettant de mieux résister à l'action de l'eau (augmentation de la cohésion des agrégats).

Après quinze jours d'incubation, il y a consommation par les bactéries de ces substances agrégatives, et dégradation du réseau filamenteux rendant les agrégats très instables. L'activité microbienne diminue progressivement en fonction de l'épuisement de la source énergétique constituée durant les quinze premiers jours de l'incubation (polysaccharides d'origine végétale), et entre quinze jours et un mois (polysaccharides microbiens et filaments mycéliens).

La sécrétion de mucus diminue donc avec l'activité microbienne jusqu'au point d'arrêt de cette influence microbienne sur l'agrégation. Ensuite ce sont les produits humiques plus stables qui prennent le relai, pour une action beaucoup plus lente et durable.

7.1.3 : Agrégation stationnaire :

A ce stade d'incubation, on passe à un autre type d'action qui paraît plus lente, où se produit avec un certain temps de latence, la stabilisation des agrégats. Elle serait due à des produits de maturation des matières humiques. C'est surtout les produits de la matière organique stable qui ont une action favorable lente et régulière. Les acides humiques gris (figure n°22), augmentent lentement et paraissent agir au cours de cette troisième phase sur l'augmentation du taux d'agrégats stables à l'eau, pour le sol salé

carbonaté. Par contre, le taux d'agrégats stables n'augmente pas au cours de cette troisième phase pour le sol d'apport à tendance verticale, avec des taux d'A.H.G. qui restent constant ou diminuent légèrement.

L'influence du gypse sur le sol salé carbonaté, au cours de cette troisième phase est peu marquée, si ce n'est que les taux d'agrégats stables pour les échantillons enrichis avec 3% de paille sont nettement plus élevés avec gypse que sans gypse. Cela pourrait s'expliquer par une interaction avec l'influence des produits de l'humification des composés organiques provenant de la décomposition de la paille apportée. De sorte que l'on a une formation et une stabilisation par le calcium des complexes argilo-humiques, spécialement avec les acides humiques gris.

7.1.4 : Amélioration secondaire de l'agrégation :

Ce phénomène intervient à partir du sixième mois d'incubation. D'après la figure n°33, le rôle du gypse est important. Il est clair que plus il y a de gypse, plus l'amélioration est importante. Cela pourrait s'expliquer par le rôle de l'ion calcium dans la stabilisation des complexes argilo-humiques. A ce niveau pourrait intervenir aussi les acides humiques gris qui sont maximum durant cette période. Il se pourrait aussi que le fait que l'humine reste constante, qu'il y ait une réorganisation de certaines fractions de l'humine engendrant une action plus importante des stabilisateurs.

7.2 : SYNTHÈSE :

On peut classer schématiquement l'évolution de l'agrégation, sous l'influence de deux actions principales : la première est essentiellement microbienne. Elle agit au début de l'incubation (entre le temps zéro et un mois d'incubation). La deuxième est surtout due à l'action des matières humiques stabilisées (acides humiques gris).

7.2.1 : Action microbienne :

Elle est très rapide et très brève. Dans un premier temps, il y a consommation des résidus végétaux facilement biodégradables. Cela entraîne une " explosion " de l'activité microbienne synthétisant des produits agrégatifs (composés de polysaccharides microbiens, filaments mycéliens etc...), agissant d'une part comme ciment entre les feuillets argileux et d'autre part par diminution de la mouillabilité des agrégats.

Les polysaccharides agissent par cimentation et par diminution de la mouillabilité des agrégats. Les filaments mycéliens agissent surtout par augmentation de la cohésion des agrégats (formation d'un réseau mycélien protégeant les agrégats.

Dans un deuxième temps, quand les polysaccharides introduits par les résidus végétaux constituent une source d'énergie insuffisante pour la microflore présente dans le sol, il y a biodégradation d'une partie des composés polysaccharidiques d'origine microbienne et des filaments mycéliens protégeant les agrégats, entraînant une diminution brutale de la stabilité des agrégats.

Il y a un changement total du bilan des processus antagonistes vers le quinzième jour d'incubation. Ces deux processus d'évolution sont directement liés à la synthèse ou à la dégradation par la biomasse microbienne des produits agrégatifs sécrétés.

7.2.2 : Action de la matière organique humifiée :

C'est surtout l'action des acides humiques gris qui paraît être prépondérante. D'ailleurs ils représentent environ les 60% des acides humiques totaux. Ce sont des acides humiques très stables car très polymérisés qui agissent progressivement et à long terme sur l'amélioration de la stabilité des agrégats.

D'après la figure n°22, on voit que les acides humiques gris augmentent à partir du troisième mois d'incubation. Le gypse intervient également à cette époque d'incubation, mais son action est plus efficace quand il y a suffisamment de matière organique. C'est l'action stabilisante par le calcium des complexes argilo-humiques qui est prépondérante.

Au delà du sixième mois d'incubation, on note une remontée très importante des taux d'agrégats, qui est très nette sur les échantillons du sol salé carbonaté. Cette augmentation est d'autant plus importante, que le sol est enrichi en matière organique.

On peut donc affirmer qu'il peut y avoir deux phénomènes agissant en même temps. Celui des complexes argilo-humiques beaucoup plus important dans les échantillons enrichis en paille, d'autant plus stables qu'il y a du calcium. Ensuite celui du carbonate de calcium, qui pourrait avoir un rôle de cimentation entre les agrégats. Les quantités d'acides humiques gris sont maximum à cette période d'incubation, ce qui pourrait avoir un effet favorable d'amélioration à long terme.

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de cette étude était de suivre l'évolution des propriétés physiques de deux types de sol d'une région méditerranéenne (Mateur, Tunisie), sous l'influence d'amendements organiques et gypseux. Le but est d'atténuer les contraintes physiques que présentent ces sols, en particulier la mauvaise structure, l'insuffisance du drainage et essayer éventuellement d'enrayer la progression vers les horizons de surface du phénomène d'alcalinisation.

Dans cette optique, nous avons incorporé de la paille de blé calibrée (200 à 2000 μ) à ces deux sols (sol à tendance vertique et sol salé carbonaté). Un complément de gypse a été apporté en plus pour le sol salé carbonaté. Ces échantillons ont été incubés pendant 9 mois à 28 °C avec une teneur en eau ramenée au 2/3 de l'humidité équivalente à la capacité de rétention au champ deux fois par semaine, donc sans drainage. Au cours de cette période, 6 prélèvements ont été effectués pour suivre la cinétique des composés organiques et l'évolution des propriétés physiques, particulièrement les taux d'agrégats stables en fonction du temps d'incubation.

A travers les résultats obtenus, un certain nombre de conclusions peuvent être dégagées.

en premier lieu, nous constatons que la minéralisation initiale des matières organiques est beaucoup plus rapide dans le sol salé carbonaté que dans le sol à tendance vertique. Cela est probablement dû à la libération des composés organiques par la dissolution du calcaire sous l'action du gaz carbonique, provenant de leur minéralisation.

Il ressort également de ces résultats que l'évolution de l'agrégation suit deux cinétiques différentes et bien distinctes. L'une brève et intense dès les premiers jours de l'incubation, l'autre faible mais plus durable à long terme.

La première est probablement liée à l'action biologique de la microflore du sol, favorisée par l'apport de débris végétaux contenant des composés facilement biodégradables, comme les polysaccharides que l'on voit d'ailleurs diminuer très rapidement à cette période d'incubation. L'accroissement de l'agrégation durant les premiers jours d'incubation est provoquée par des substances agrégatives fabriquées par la microflore, et qui agiraient soit par l'augmentation de la cohésion des agrégats soit par diminution de leur mouillabilité.

Durant la deuxième quinzaine d'incubation, ces substances agrégatives consommées par de nouvelles colonies microbiennes, disparaissent à leur tour et induisent une diminution rapide de la stabilité des agrégats.

Nous avons observé également, dans le sol salé carbonaté enrichi en gypse, une nette amélioration de l'agrégation, beaucoup plus importante que dans le témoin (sans apport de gypse). Cette différence s'accroît avec des apports de paille plus élevés. Cette observation

montre qu'il existe une interaction entre l'effet du gypse et celui de la matière organique sur l'agrégation de ce sol. Le gypse agit probablement indirectement en stimulant la biomasse microbienne qui produirait plus de substances agrégatives.

Durant cette première phase de l'agrégation, ce serait donc surtout les matières organiques de formation secondaire qui agiraient sur l'agrégation.

La deuxième phase est très lente, car elle commence par une stabilisation entre le premier mois et le sixième mois. C'est durant le troisième trimestre qu'une augmentation progressive commence. Au cours de cette période, nous avons observé parallèlement une forte augmentation des teneurs en acides humiques gris pour les échantillons du sol salé carbonaté. Cette amélioration de l'agrégation est d'autant plus importante que l'apport organique est plus élevé.

Le fait d'apporter du sulfate de calcium renforce ce phénomène d'amélioration de la stabilité des agrégats. C'est probablement l'action du calcium par son rôle de cation de liaison entre les minéraux argileux et les matières humiques et formant ainsi des complexes argilo-humiques très stables (fulvates et humates calciques), qui augmentent les taux d'agrégats stables.

Les échantillons de sol enrichis étant soumis à un régime hydrique alterné, il est probable que les alternances d'humectation-dessiccation ont une action à long terme sur l'amélioration de l'agrégation par le durcissement non réversible des petits agrégats qui deviennent hyperstables.

Par conséquent ces résultats montrent que l'apport organique améliore très nettement la stabilité des agrégats. Cette amélioration de l'agrégation rend le milieu plus filtrant et limite ainsi le problème de l'hydromorphie et éventuellement évacuer les sels des horizons de surface. Il est probable que l'amendement organique corrige ainsi l'insuffisance de drainage, mais il serait nécessaire de le vérifier par des mesures de perméabilité faites sur le terrain. De toute façon, l'installation d'un réseau de drainage satisfaisant est nécessaire pour éviter un trop long séjour de l'eau en surface.

D'après les résultats de notre étude, il semblerait qu'il vaut mieux apporter du gypse en même temps que la matière organique, car l'effet sur les propriétés physiques est plus marqué. C'est amendement favorise la décomposition de la matière organique en humus plus stable ayant un meilleur pouvoir stabilisant à long terme, en plus de l'action spécifique du gypse sur l'élimination du sodium, en particulier pour les sols salés carbonatés.

L'apport de gypse n'a pas en lui même une influence très importante sur l'agrégation, mais apporté en même temps que la matière organique, il contribue à améliorer la stabilité des agrégats par interaction très significative avec la matière organique. L'action du gypse est probablement due à la stabilisation des complexes organo-

minéraux (fulvates et humates calciques). Cette action semble être bénéfique même à long terme, où l'on voit une nette amélioration de l'agrégation dans les cas où le gypse a été apporté avec la matière organique.

L'ajustement réalisé selon le modèle de HENIN a permis d'établir la cinétique du carbone au cours du temps. L'équation obtenue comporte la différence de deux exponentielles fonction du temps. L'une pour la cinétique rapide aux faibles temps d'incubation, l'autre pour la cinétique lente aux temps d'incubation plus élevés. Toutefois la précision de l'ajustement sur seulement six points expérimentaux est limitée, quoique significative au niveau 0.99.

L'analyse multivariable réalisée par ailleurs, confirme les correspondances existantes entre les taux d'agrégats stables et les substances organiques présentes dans ces modèles de laboratoires. En particulier, cela confirme que ce sont les matières humiques stabilisées qui ont le plus de contribution à la stabilisation des agrégats. Viennent ensuite les produits organiques de formation récente (polysaccharides microbiens).

De cette analyse il ressort que le temps d'incubation influence plus l'évolution du sol salé carbonaté que le sol à tendance vertique, particulièrement pour les apports organiques élevés. L'apport de gypse pour le sol salé carbonaté rend l'évolution des propriétés de ce sol moins dépendantes de la durée d'incubation.

D'après les analyses sur les temps de demi-vie des substances organiques sur les deux compartiments A et B, il apparaît que pour le sol salé carbonaté l'apport de gypse accélère significativement la transformation des matières végétales en humus. La stabilité de l'humus est deux fois moins élevée pour le sol à tendance vertique que pour le sol salé carbonaté. L'apport de gypse multiplie presque par dix la vitesse de minéralisation de l'humus dans le sol salé carbonaté.

En ce qui concerne le sol salé carbonaté, il paraît donc possible d'améliorer les propriétés physiques de ce sol et particulièrement la battance, par les amendements organiques et gypseux. Il est par contre très difficile de se débarrasser des sels. Pour l'installation de la culture de betterave à sucre sur ce sol, il serait donc souhaitable de faire germer les graines en pépinière dans un sol non salé à structure fine jusqu'au stade de jeunes plantules et de procéder à un repiquage dans ces sols. Ensuite la betterave tolère assez bien les sols quelques peu salés.

Les sols de la plaine de Mateur (TUNISIE) sont très pauvre en matière organique, et présentent une structure de plus en plus dégradée. Les terres de cette région ont besoin de relever leur stock organique pour essayer d'améliorer leur stabilité structurale et leur perméabilité. La pratique du "brûli" des chaumes de blé se pratique couramment dans cette région, et cela est bien dommage car ces sols ont besoin de matière organique ne serait ce que pour améliorer leur

mauvaise structure. Il est vrai que leur enfouissement pose des problèmes pratiques, car les déchaumeuses éprouvent des difficultés sur ces sols très lourds durcis par la dessiccation.

Les résultats qui ressort de notre expérimentation de laboratoire montre l'effet bénéfique considérable que peut avoir la paille de blé sur la stabilité des agrégats. Cette action est encore plus remarquable en présence du gypse. Ces résultats montrent donc que l'enfouissement de la matière organique procure une action à long terme de maintien d'un stock humique dans le sol, et une action immédiate de développement intense de la faune du sol et de la vie microbienne.

Il conviendrait aussi de mettre au point pour ces sols l'enfouissement des résidus de culture que la betterave à sucre semble procurer, 3 à 6 Tonnes/Hectare de résidus secs, c'est à dire 450 à 900 kilogrammes d'humus par hectare et par an (DABIN, 1982). Il ne faut pas oublier également l'importance que pourrait avoir le recyclage des sous-produits rejetés par l'usine sucrière pilote. L'épandage de ces boues résiduelles ou mélasses devrait contribuer à améliorer les propriétés physiques peu favorables de ces sols de la plaine de Mateur.

Des essais pratiques avec la betterave à sucre paraissent donc souhaitable. Les indications obtenues en laboratoire montrent l'efficacité des amendements organiques avec du gypse pour les sols salés carbonatés. Les techniques d'apport de résidus de culture ou de compost et les épandages de boues de sucrerie doivent être jugés par des essais de terrain, afin de voir s'ils améliorent les propriétés physiques de ces sols. On pourrait ainsi juger de la rentabilité économique de ces amendements et de ce système d'exploitation, incluant la betterave à sucre dans les assolements à l'échelle de la plaine de Mateur.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ANDERSON, D. W., PAUL, E. A. and ARNAUD R. J. ST. (1974) - Extraction and characterization of humus with reference to clay associated humus. *Can. J. Soil Sci.* 54 : 317-323.
- ANDERSON, D. W. (1979) - Processes of humus formation and transformation in soils of the canadian great plains. *Can. J. Soil Sci.* 30, 77-84.
- ANDERSON, D. W. and All. (1981) - Particle size fractions and their use in studies of soil organic matter : I. The nature and distribution of forms of carbon, nitrogen, and sulfur. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, Vol. 45, n° 4 p. 767-772.
- ANONYME (1980) - Mieux et moins cher que la chaux magnésienne un amendement intéressant et peu coûteux : LES ECUMES DE SUCRERIE. *La Côte d'Or Agricole et Viticole* n°6, 8 p., extrait de "Bulletin G.S. Culture" n° 18 juin 1976.
- ANONYME (1984) - Les sous-produits de la betterave. Savoir utiliser les restes. Documents A. P. C. A. France Agricole. *Rev. des chambres d'Agr.* n°700, 1984.
- BACHELIER, G. (1966) - Les sucres dans le sol et leur dosage global. *Cah. O. R. S. T. O. M.*, Ser. pédol., vol. IV, fasc. n°1, p. 9-23.
- BALESDENT, J. (1982) - Etude de la dynamique de l'humification de sols de prairies d'altitude (Haut-Jura) au moyen des datations C14 des matières organiques. *Univ. Nancy I, thèse Doct-Ing.*, 90 p.
- BOIFFIN, J., KELI ZAGBAHI, J. et SEBILLOTTE, M. (1986) - Systèmes de culture et statut organique des sols dans le noyonnais : application du modèle de Hénin-Dupuis. *Agr.*, 1986, 6 (5), p. 437-446.
- BONNEAU, J. M. et SOUCHIER, B. (1979) - Constituants et propriétés du sol. T.2, Ed. Masson, 1979, 459 pages, Paris.
- BRUCKERT, S. (1979) - Analyse des complexes organo-minéraux des sols. *Chp. IX*, p. 187-209.
- BRUCKERT, S. (1979) - Séparation des complexes organo-minéraux et des matières organiques libres par tamisage dans l'eau : Application aux sols à complexes argilo-humiques floculés. *Ann. Sci. U.F.C.B., biologie végétale* 3° Ser. Fasc. 20, p. 3-7.
- BRUCKERT, S. et GAIFFE, M. (1983) - Essai de séparation des principales fractions organiques des sols : Bilan et caractérisation analytiques. Note présentée par LAVOLLAY, J., *C.R. Acad. Sc. Paris*, t. 297, Ser. II, p. 627-630.

- CHANEY, K. et SWIFT, R. S. (1986) - Etude sur la stabilité des agrégats. I- Reformation des agrégats du sol. II- Effet des substances humiques sur la stabilité des agrégats du sol reformé. J. Soil Sci., n°37, p 329-335.
- CHARTRES, C. J. et All. (1985) - The effects of gypsum on macroporosity and crusting of two red duplex soils. Aust. J. Soil Res., 23 : 167-79.
- CHASSIN, P., LE BERRE, B. et NORIO, N. (1977) - Influence des substances humiques sur les propriétés des argiles. Importance du mode de préparation sur les propriétés d'hydratation des associations montmorillonite-acides humiques. C.R. Acad. Sc. Paris, t. 284, sér. D, p. 1659-1662.
- CHASSIN, P. (1979) - Hypothèse sur la structure du complexe argilo-humique. Conséquences sur les processus d'humidification. Sci. du Sol 4, p. 323-332, 1979, Versailles.
- CHENU, C. (1985) - Etude expérimentale des interactions argiles-polysaccharides neutre. Contribution à la connaissance des phénomènes d'agrégation d'origine biologique dans les sols. Thèse Doct. 3ème cycle, Univ. Paris VII, 198 p.
- CHESHIRE, M. V. (1979) - Nature and origin of carbohydrates in soils. Acad. Press., London, 261 p.
- CHESHIRE, M. V., SPARLING G. P. and MUNDIE C. M. (1984) - Influence of soil type, crop and air drying on residual carbohydrate content and aggregate stability after treatment with periodate and tetraborate. Plant and Soil 76, 339-347,
- CHRISTMAN, J. (1981) - Betterave industrielle. Techniques agricoles 2060, 33 pages.
- COMBEAU, A. et QUANTIN, P. (1964) - Observation sur les relations entre stabilité structurale et matière organique dans quelques sols d'Afrique centrale. Cah. O. R. S. T. O. M., Ser. pédol., vol. II, fasc. n°1, p. 3.
- DABIN, B. et THOMAN, Ch. (1971) - Etude comparative de deux méthodes de fractionnement des composés humiques. (Méthode TIURIN et méthode électrophorétique). Ser. Initiat. Doc. Tch. O. R. S. T. O. M. n°16.
- DABIN, B. (1982) - Facteur de fertilité chimique et utilisation des sols tropicaux. Cours photocopié, 209 pages, O. R. S. T. O. M. Bondy.
- DOMMERMUES, Y. et MANGENOT, F. (1970) - Ecologie microbienne du sol. Ed. Masson et Cie, 796 p., 180 fig., 101 tabl. Paris.
- DUCHAUFOR, Ph. (1977) - Pédogénèse et classification. T.1, Ed. Masson, 1977, 469 pages, Paris.

- ENNABLI, M. (1967) - Contribution à l'étude hydrogéologique de la plaine de Mateur. Thèse Doct. troisième cycle.
- FELLER, C. (1979) - Une méthode de fractionnement granulométrique de la matière organique des sols. Application aux sols tropicaux, à texture grossière, très pauvre en humus. Cah. O. R. S. T. O. M., Ser. pédol., vol. XVII, fasc. n°4, p. 339-346.
- FELLER, Ch. et Al. (1983) - Etude de la matière organique de différentes fractions granulométriques d'un sol sableux tropical. Effet d'un amendement organique (compost). Cah. O. R. S. T. O. M., Ser. pédol. vol. XX, fasc. n°3, p. 223-238.
- FOURNET, A. (1963) - Etude pédologique de la plaine de Mateur (oued Djoumine, M'saken et Rhezala). Rap. O. R. S. T. O. M. n° 225b.
- GIOVANNINI, G. and SEQUI, P. (1976) - Iron and aluminium as cementing substances of soil aggregates. I : Acetylacetone in benzene as an extractant of fractions of soil iron and aluminium. Journal of soil sciences, 27, 140-47, 1976.
- GIOVANNINI, G. and SEQUI, P. (1976) - Iron and aluminium as cementing substances of soil aggregates. II : Changes in stability of soil aggregates following extraction of iron and aluminium by acetylacetone in a non-polar solvent. Journal of soil sciences, 27, 148-53, 1976.
- GOUNOT, LE HOUEYOU, (1955) - Sols de Tunisie. Bull. de la division des sols n°5, année 1973.
- GRAS, F. (1975) - Les sols très calcaires du Liban sud. Evolution et mise en valeur. Thèse doct-ing., Univ. Strasbourg, 191 pages.
- GREENE, R. S. B. and FORD, G. W. (1985) - The effect of gypsum on cation exchange in two red duplex soils. Aust. J. Soil Res., 23 (1), 61-74.
- GRIERSON, I. T. (1978) - Gypsum and red-brown earths. John Wiley & Sons Ed., 1978, p. 315-324.
- GUCKERT, A. (1973) - Contribution à l'étude des polysaccharides dans les sols et de leur rôle dans les mécanismes d'agrégation. Thèse doct. d'Etat, Univ. Nancy I, 124 pages.
- GUCKERT, A., BREISCH, H. et REISINGER, O. (1975a) - Soil biol. biochem., 7, p. 241-250.
- HALITIM, A., ROBERT, M. et BERRIER, J. (1983) - Etude expérimentale de l'interaction de la calcite et du gypse avec la montmorillonite : conséquences sur le rôle de ces deux minéraux dans le compartiment de matériaux argileux et l'amendement des sols. C. R. Acad. Sc. Paris, t 296, sér. II, p. 1459-1464.

- HALITIM, A. (1985) - Contribution à l'étude des sols des zones arides (Hautes plaines steppiques de l'Algérie). Morphologie, distribution et rôle des sels dans la genèse et le comportement des sols. Thèse Doct. d'Etat, sér. C, n°126, 384 p.
- HENIN, S. et DUPUIS, M. (1945) - Essai de bilan de la matière organique du sol. Ann. Agr. XV, p. 17-29.
- HENIN, S. et TURC, L. (1957) - Quelques données nouvelles concernant le bilan de la matière organique des sols. C.R. Acad. Agri. Fr. 1957, p. 89-93.
- HENIN, S., MONNIER, G. et TURC, L. (1959) - Un aspect de la dynamique des matières organiques des sols. G.R. Acad. Sci. Fr. t (248), p. 138-141.
- HOFMAN, G. et VAN RUYMBEKE (1979) - Evolution of soil humus content and calculation of global humification coefficients on different organic matter treatments during A 12-year experiment with belgian silt soils. State Univ. of Ghent, Belgium, Vol. 129, n°2.
- JENKINSON, D.S. and AYANABA, A. (1977) - Decomposition of carbon-14 Labeled Plant Material Under Tropical Conditions. Soil Sci. Soc. Am. J., Vol. 41, 1977.
- JENKINSON, D.S., RAYNER, J.N. (1977) - The turnover of soil organic matter in some of the rothamsted classical experiments. Soil Sci., Vol.123, n°5, p. 298-303.
- KENNETH, M. OATES and CALDWELL, A.G. (1985) - Use of by-product gypsum to alleviate soil acidity. Soil Sci. Soc. Amer. Journal, 49 (4), 915-918.
- MAALEJ, (1983) - Etude pédologique d'une partie de la plaine de Mateur. Aptitude des sols à la culture de la betterave à sucre. Mémoire de fin d'étude du cycle de spécialisation. I. N. A. T., Tunis.
- MARQUARDT, D.W. (1963) - An algorithm for least squares estimation of non linear parameters. Journal of the Society of industrial and applied mathematics. Vol.11, n°2, p.431-441.
- MIZOURI, M. (1982) - Etude des sols de la plaine Techga - Mateur (Zone sud), et de leur aptitude à la culture de la betterave à sucre. Mémoire deuxième année O. R. S. T. O. M.
- MONNIER, G. (1965) - Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols. Thèse Paris, 140 pages.
- MORI, A. (1963) - Etude pédologique de la plaine de Mateur (oued Tine). Rap. O. R. S. T. O. M. n° 225a.

- MORI, A. (1963) - Etude pédologique de la plaine de Mateur (oued Mellah et oued Sedjenane). Rap. O. R. S. T. O. M. n°225c.
- MOUREAUX, Ch. (1967) - Influence de la température et de l'humidité sur les activités biologiques de quelques sols ouest-africains. Cah. O. R. S. T. O. M., Ser. pédol., vol. V, fasc. n°4, p. 393.
- NOIROT, et All. (1981) - Logiciel statistique. non publié.
- OADES, J. M. et TURCKENEK, L. W. (1978) - Accretion of organic carbon, nitrogen and phosphorus in sand and silt fractions of a red-brown earth under-pasture. Aust. J. soil Res., 1978, 16, 351-4.
- PANSU, M. (1983) - SPCLAS, un logiciel basic pour le calcul, le classement et la gestion des résultats d'un laboratoire d'analyses physico-chimiques. O. R. S. T. O. M. Bondy, 1983, 60 pages.
- SAINT-ELLIER, A. (1984) - Un remède à la formation de croûte. La France Agricole n°20, page 32.
- SIDI, H. (1983) - Etude pédologique de la plaine de MATEUR (zone Ichkel). Aptitude à la culture de la betterave à sucre. Rapport 2ème année O. R. S. T. O. M., 4 cartes, 52 p., 1983 Tunis.
- STEVENSON, F. J. (1982) - Humus chemistry. John Wiley & Sons Ed. 1982.
- SHARMA, M. L. and TUNNY, J. (1978) - Interaction of gypsum with homofina and kriliun on the structural stability and water flow properties of soils. John Wiley & Sons Ed., 1978, p. 181-190.
- THOMANN, Ch. (1963) - Quelques observations sur l'extraction de l'humus dans les sols. Méthode au pyrophosphate de sodium. Cah. O. R. S. T. O. M., Ser. pédol., fasc. n°3, p. 43-72.
- TURENNE, J. F. et PLENECASSAGNE, A. (1976) - Dynamique de la matière organique en sols cultivés. Effet d'une culture intercalaire de sorgho en vertisols irrigués. Cah. O. R. S. T. O. M., Ser. pédol., vol. XIV, fasc. n°3, p. 193.
- VAN VEEN, J. A. and PAUL, E. A. (1981) - Organic carbon dynamics in grassland soils. 1- Background information and computer simulation. Can. J. Soil Sci. Vol. 61, p. 185-201.
- WALLACE, A., WALLACE, G. A. et CHA, J. W. (1986) - Mechanisms involved in soil conditioning by polymers. Soil Sci., Vol. 114, n°5, p. 381-386, Mai 1986.

A N N E X E S

.....

BLOC F :

- Schémas et description de profils.
- Figures.
- Détails des techniques d'analyses.

BLOC T :

- Tableaux des résultats analytiques.

A N N E X E S

B L O C F

LEGENDE GENERALE
DES ANNEXES F.

PLANS FACTORIELS :

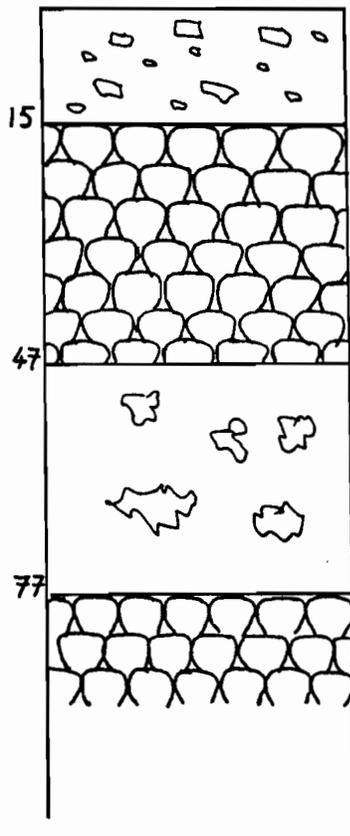
mol = Matière Organique Légère.
afl = Acides Fulviques Libres.
afp = Acides Fulviques extraits au pyrophosphate de sodium.
afs = Acides Fulviques extraits à la soude.
ahp = Acides Humiques extraits au pyrophosphate de sodium.
ahs = Acides Humiques extraits à la soude.
ct = Carbone Total.
cht = Carbone de l'Humine Totale.
pls = Polysaccharides.
pf4,2 = Humidité au point de flétrissement.
a+lb = Argile + Limon (après prétraitement au benzène).
aga = Agrégats stables après prétraitement à l'alcool.
agb = Agrégats stables après prétraitement au benzène.
age = Agrégats stables sans prétraitement.

DENODOGRAMMES :

n° = Numéro de l'échantillon.
num = Numéro de la classe de l'échantillon.
ain = Ainé.
ben = Benjamin.
inr = Inertie.
ptc = Pourcentage de contribution.
M. O. = Doses de Matière Organique apportées (en % du poids sec du sol)
Inc. = Durée d'Incubation (en jours).

F. 1
Sol calcimagnésique
brun calcaire à nodules.

R.M. = Roche dure carbonatée
Culture en place : fourrage
régime agronomique : assolement blé -
fourrage.



Horizon 1 : 7,5 YR 4/2. Horizon frais -
limoneux argileux - structure polyédrique
anguleuse - peu de racines - pauvre en
matière organique - forte effervescence
à HCl - présence de quelques grès calcai-
re arrondis non altérés - limite inférieure
régulière.

Horizon 2 : 2,5 Y 8/2. Horizon frais -
limono-argileux - structure non identifiée
pas de racine - non organique - très forte
effervescence à HCl - bloc et pierres de
grès calcaire (90 %) - quelques amas cal-
caire - limite inférieure ondulée.

Horizon 3 : 2,5 Y 7/4. Horizon frais -
limono-argileux - structure polyédrique
anguleuse peu nette - pas de racines -
très forte effervescence à HCl - quelques
cailloux de grès arrondis non altérés -
présence de nombreux amas calcaires (70 %)
limite inférieure ondulée.

Horizon 4 : 2,5 Y 7/8. Horizon frais -
argilo-limono-sableux - structure non
identifiée - vacuité non identifiée - très
forte effervescence à HCl - nombreux blocs
pierres de grès calcaire non altérés (90 %)
présence de quelques amas calcaires.

LEGENDE



Horizon gravillonneux, calcaire.



Horizon très caillouteux (90 %).



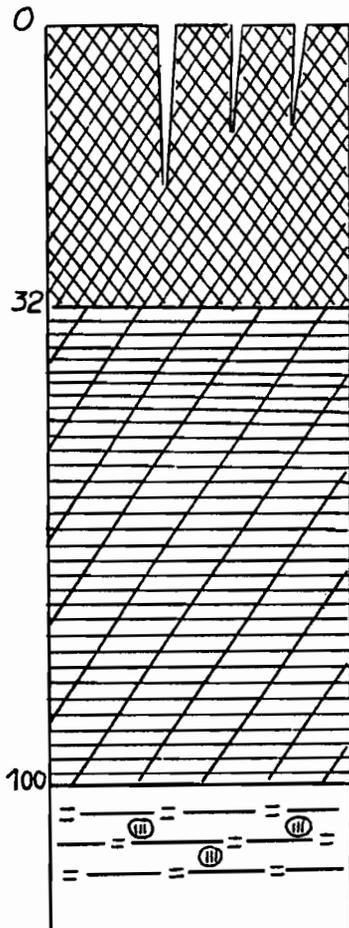
Amas calcaires.

R. M. = Roche-Mère.

- Résultats analytiques en T.2

F. 2

Sol peu évolué d'apport
à tendance verticale.



Horizon 1 : 10 YR 3/2. Horizon frais - argilo-limoneux - structure polyédrique anguleuse - Nombreuses racines - pauvre en matière organique - peu de face de glissement - présence de fente de retrait en surface - transition régulière de 3 à 4 cm - quelques concrétions de Manganèse.

Horizon 2 : 10 YR 3/3. Horizon frais - argileux - structure polyédrique anguleuse très nette, de 3 cm - peu de racines - pauvre en matière organique - présence de faces de glissements obliques nettes - limite inférieure irrégulière peu nette.

Horizon 3 : 10 YR 6/6. Horizon humide - argileux - structure polyédrique peu nette pas de racines - très pauvre en matière organique - présence de concrétion ferromanganiques et de nodules calcaires durs - Face de glissement peu nette - vive effervescence à HCl.

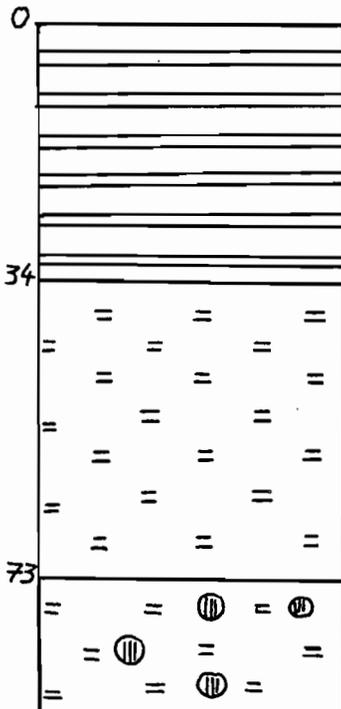
LEGENDE

-  Horizon humifère avec fentes de retrait.
-  Horizon à structure grossière.
-  Horizon à nodules calcaires.
-  Concrétions Ferro-manganiques.

- Résultats analytiques en T.3

F. 3
Sol peu salé carbonaté
à hydromorphie temporaire.

R.M. = Calcaire marneux
Culture en place : betterave
Régime agronomique : blé - fourrage
- betterave (essai)



Horizon 1 : 2,5 Y 3/2. Horizon frais - limono-argileux - structure polyédrique subanguleuse nette - nombreuses racines de 10 cm de diamètre - nombreux vides relativement riche en matière organique - effervescence à HCl - limite inférieure régulière - transition de 2 cm.

Horizon 2 : 2,5 Y 3/2. Horizon frais - argilo-limoneux - structure polyédrique subanguleuse peu nette - racine de diamètre d'environ 5 cm. peu de vides - pauvre en matière organique - effervescence à HCl - limite inférieure irrégulière - transition de 4 cm.

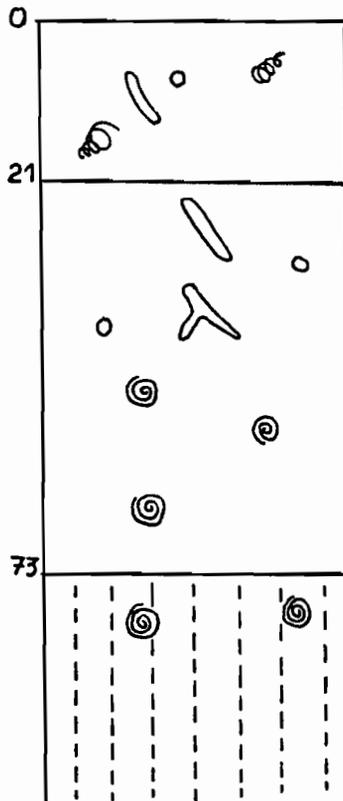
Horizon 3 : 2,5 Y 4/2. Horizon frais - argileux - structure polyédrique anguleuse - nette - peu de vide - pauvre en matière organique - effervescence à HCl - quelques faces luisantes peu nettes. présence de concrétions Ferro-manganiques.

- LEGENDE** :
-  Horizon organique.
 -  Horizon à nodules calcaires.
 -  Concrétions Ferro-manganiques.

R. M. = Roche-Mère.

- Résultats analytiques en T.4

F. 4
Sol salé carbonaté
à hydromorphie de profondeur.



Horizon 1 : 2,5 YR 4/2. Horizon frais - Argilo-limoneux - structure polyédrique subanguleuse - quelques racines fines - de nombreuses traces biologiques (galeries de vers de terre et turricules) - pauvres en matière organique - forte effervescence avec HCl - limite inférieure irrégulière - transition de 4 cm.

Horizon 2 : 2,5 YR 4/2. Horizon humide - argileux - structure polyédrique subanguleuse peu nette - quelques racines et traces biologiques - très pauvre en matière organique - effervescence avec HCl - limite inférieure irrégulière - transition de 4 cm.

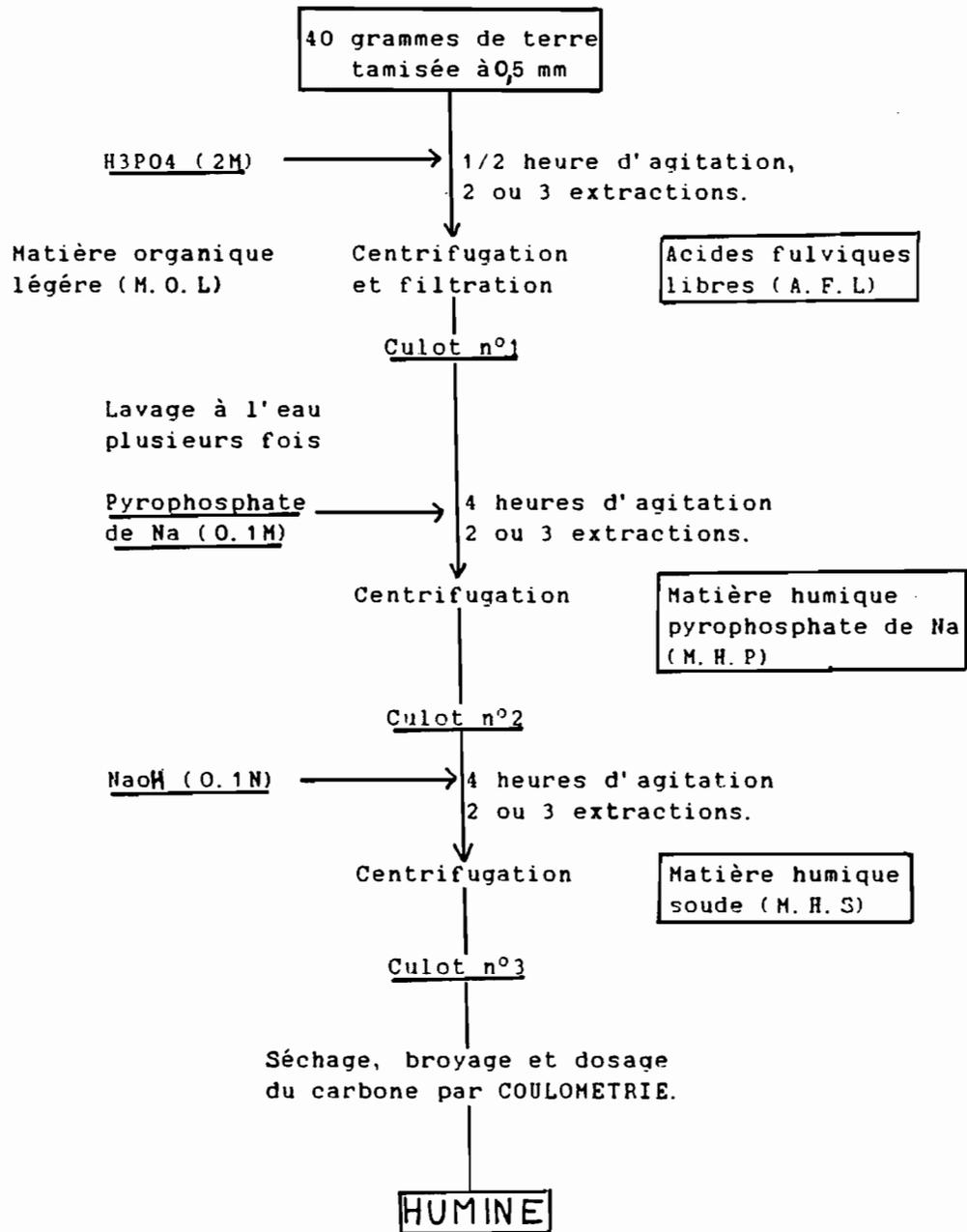
Horizon 3 : 2,5 Y 5/4. Horizon très humide - argileux - structure polyédrique subanguleuse nette - non organique - effervescence avec HCl - présence de tâches gris-verdâtre d'hydromorphie.

LEGENDE :

-  Galeries de lombrics.
-  Turricules de lombrics.
-  Coquilles d'escargots.
-  Gleyification.

- Résultats analytiques en T.5

Figure n°6: TECHNIQUE D' EXTRACTION DES MATIERES HUMIQUES DU SOL. (Méthode de Bondy).



Calcul du supplément d'azote à
apporter sous forme ammoniacal.

En raison du rapport C/N trop élevé ($26.93/0.31 = 86.87$), de la paille de blé utilisée (calibrée entre 200μ et 2000μ), nous l'avons abaissé à 15 par l'adjonction d'azote sous forme ammoniacale.

La quantité d'azote à ajouter pour fixer le rapport C/N à 15 est de :

$$26.93/15 = 1.79 \text{ \% d'azote (N).}$$

Comme il y a déjà 0.31 % d'azote dans cette paille, il resterait à ajouter :

$$1.79 - 0.31 = 1.48 \text{ \% d'azote (N).}$$

Il faudrait 1.48 grammes d'azote (N) pour 100 grammes de paille. Donc pour 1 gramme de paille il faut 0.0128 gramme d'azote (N), ou :

$$0.0148 \times 17/14 = 0.018 \text{ gramme d'azote (NH}_3\text{).}$$

Or NH₃ a un poids moléculaire de 17, une densité de 0.92 et à un pourcentage de 20.

Donc pour un litre, nous avons 920 grammes de NH₃, et comme il est à 20 %, il y aurait :

$$920 \times 20 / 100 = 184 \text{ grammes/litre.}$$

ou 0.184 gramme/ml.

Il faudrait donc en millilitre de NH₃ : $0.018 / 0.184 = 0.08 \text{ ml}$. Ceci pour 1 gramme de paille par 100 grammes de terre sèche.

Cette quantité d'azote ammoniacal a été apportée mélangée avec l'eau d'huméctation pour ramener les échantillons à 80 % de leur humidité équivalente.

Calcul de la dose de gypse à apporter
pour le sol salé carbonaté à alcali.

L'apport de gypse a été fait sous forme de sulfate de calcium hydraté (CaSO₄, 2H₂O), dont le poids moléculaire est de 172 grammes.

$$1 \text{ équivalent gramme} = 172/2 = 86 \text{ grammes de CaSO}_4 \text{ (2H}_2\text{O)}.$$

Comme il y a 11.7 milli-équivalent (mék.) de sodium échangeable dans le complexe absorbant, il nous en faut autant en calcium échangeable. Cela nous donnerait :

$$11.7 \text{ méq.} \times 86 = 1006 \text{ milligrammes de CaSO}_4 \text{ (2H}_2\text{O), pour 100 grammes de terre sèche. C'est à dire 1 gramme pour 100 grammes.}$$

La dose de sulfate de calcium à apporter est de 1 %

DOSAGE DES POLYSACCHARIDES TOTAUX.
Méthode colorimétrique à l'anthrone.
(Réf. GUCKERT 1973).

Première phase : EXTRACTION.

- Prendre 5 grammes de sol tamisé à 2 mm dans un flacon de 250 ml.
- Ajouter 50 ml de H₂SO₄ 3N (*), fermer et mettre à l'étuve à 80 °C pendant 24 heures.
- Centrifuger, puis recueillir le surnageant que l'on volume à 100 ml.

Deuxième phase : DOSAGE.

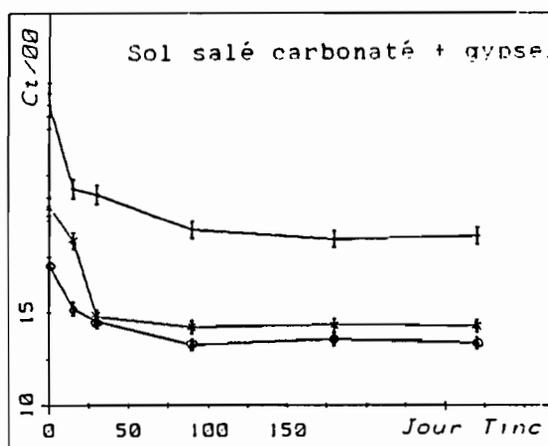
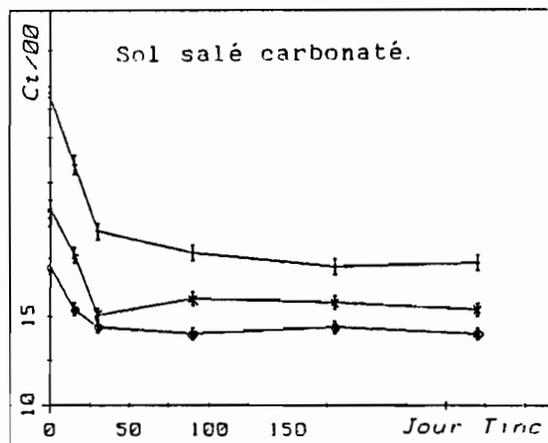
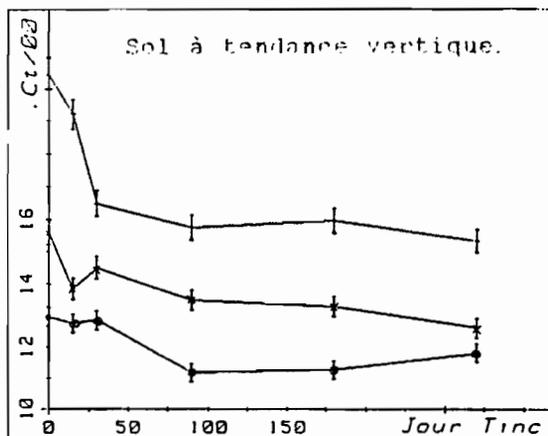
- Préparer une solution d'anthrone à 0.2 % dans H₂SO₄ concentré (d = 1.84).
- Préparer une gamme étalon de glucose (0-5-10-15-20-25- X/ ml).
- Après dilution des extraits de sol, pipetter 5 ml dans des tubes de 150.25 mm, placés dans un récipient contenant des glaçons. Même chose pour la gamme étalon.
- Additionner dans chaque tube 10 ml de la solution d'anthrone, en laissant couler lentement le long de la paroi du tube.
- Agiter par un mouvement de rotation.
- Obturer avec un morceau de para-film.
- Placer immédiatement les tubes dans un bain-marie à 80 °C pendant 25 minutes (**).
- Refroidir les tubes dans un bac contenant des glaçons.
- Passer au colorimètre à 6250 mμ.
- Exprimer les résultats en mg/100 grammes de sol.

* A signaler que l'extraction préliminaire à l'eau, préconisée par la méthode GUCKERT a été supprimée, en raison de la très faible teneur en sucre enregistrée à ce niveau, et de plus difficilement dosable par la colorimétrie.

** Le temps de passage au bain-marie a été réduit à 10 minutes au lieu de 25 minutes.

F 8

Mesure du carbone.
Intervalles de confiance
pour une probabilité de 0.95



Témoin.



Echantillon enrichi
à 1 % de paille.



Echantillon enrichi
à 3 % de paille.

Figure n°36 Ajustements $C=f(T)$ 3 Apports
Sol verticale 0 1 et 3% Paille

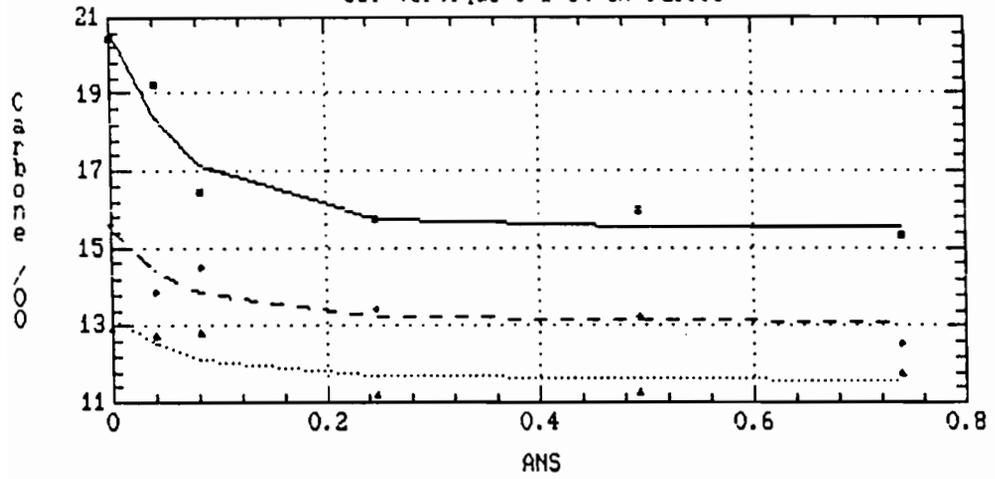


Figure n°37 AJUSTEMENTS Alg. MARQUARDT Sol SALE
Paille = 3% — 1% --- 0% Paille

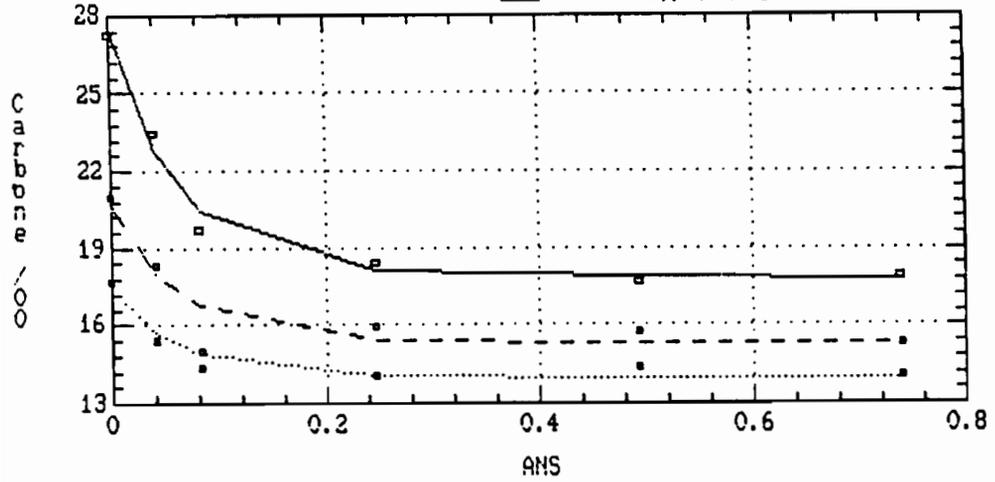
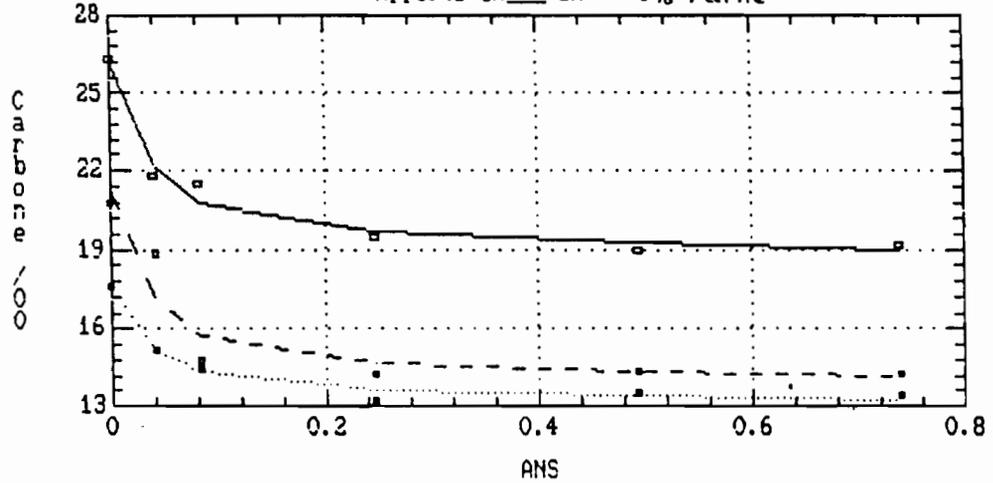


Figure n°38 SOL SALE + GYPSE $C=f(t)$ alg. MARQUARDT
Apports=3% — 1% --- 0% Paille



A N N E X E S

B L O C T

Tableau n°1
Les sels dans la nappe phréatique.

| N° de Profil | Milligramme par litre | | | | | | | | C.E. ² à 25°C. | Milliéquivalent par litre | | | | | | | P.H. | Cl/ SO ₄ | S.A.R. ³ | Faciès chimiques |
|--------------|-----------------------|-----|------|----|-----------------|------|-------------------|-------------------|------------------------------|---------------------------|-------|-------|------|-----------------|-------|-------------------|------|------------------------|---------------------|---------------------|
| | Ca | Mg | Na | K | SO ₄ | Cl | CO ₃ H | R.S. ¹ | | Ca | Mg | Na | K | SO ₄ | Cl | CO ₃ H | | | | |
| 25 | 290 | 174 | 759 | 3 | 1430 | 888 | 305 | 3920 | 5,00 | 14,50 | 14,50 | 33,0 | 0,07 | 29,80 | 25,0 | 5,00 | 7,8 | 0,83 | 8,66 | sulfato-chlorurée |
| 27 | 85 | 69 | 129 | 0 | 216 | 222 | 305 | 1040 | 1,33 | 4,25 | 5,75 | 5,60 | 0,00 | 4,50 | 6,25 | 5,00 | 7,9 | 1,38 | 2,50 | chloruro-sulfatée |
| 36 | 42 | 83 | 406 | 0 | 293 | 462 | 354 | 1700 | 2,16 | 2,10 | 6,90 | 17,65 | 0,00 | 6,10 | 13,00 | 5,80 | 8,3 | 2,13 | 8,32 | « |
| 42 | 185 | 69 | 143 | 0 | 552 | 186 | 244 | 1420 | 11,94 | 9,25 | 5,75 | 6,25 | 0,00 | 11,50 | 5,25 | 4,00 | 7,7 | 0,45 | 2,28 | sulfato-chlorurée |
| 44 | 390 | 162 | 476 | 2 | 1377 | 738 | 183 | 3340 | 4,74 | 19,50 | 13,50 | 20,70 | 0,05 | 28,70 | 20,80 | 3,00 | 7,7 | 0,72 | 5,09 | « |
| 45 | 350 | 138 | 828 | 1 | 1459 | 1172 | 244 | 4260 | 5,86 | 17,50 | 11,50 | 36,00 | 0,03 | 30,40 | 33,00 | 4,00 | 8,0 | 1,08 | 9,45 | chloruro-sulfatée |
| 51 | 460 | 276 | 1725 | 1 | 1548 | 2840 | 305 | 7360 | 10,78 | 23,00 | 23,00 | 75,00 | 0,03 | 32,25 | 80,00 | 5,00 | 7,7 | 2,48 | 15,63 | « |
| 57 | - | - | - | - | - | - | - | 17420 | 33,36 | - | - | - | - | - | - | - | 7,7 | - | - | - |
| 60 | - | - | - | - | - | - | - | 36720 | 66,17 | - | - | - | - | - | - | - | 7,4 | - | - | - |
| 61 | 100 | 96 | 897 | 2 | 816 | 1033 | 427 | 3340 | 4,46 | 5,00 | 8,00 | 39,00 | 0,04 | 17,00 | 29,10 | 7,00 | 7,8 | 1,72 | 15,29 | chloruro-sulfatée |
| 62 | 40 | 60 | 874 | 0 | 336 | 1100 | 549 | 2980 | 4,13 | 2,00 | 5,00 | 38,00 | 0,00 | 7,00 | 31,00 | 9,00 | 7,8 | 4,42 | 20,31 | « |
| 63 | - | - | - | - | - | - | - | 39262 | 65,88 | - | - | - | - | - | - | - | 7,2 | - | - | - |
| 64 | 235 | 171 | 1472 | 1 | 878 | 2228 | 366 | 5580 | 8,09 | 11,75 | 14,25 | 64,00 | 0,03 | 18,30 | 62,75 | 6,00 | 7,7 | 3,42 | 17,75 | chloruro-sulfatée |
| 65 | - | - | - | - | - | - | - | 42880 | 73,39 | - | - | - | - | - | - | - | 7,1 | - | - | - |
| 66 | - | - | - | - | - | - | - | 40400 | 68,94 | - | - | - | - | - | - | - | 7,2 | - | - | - |
| 67 | 530 | 402 | 2139 | 10 | 2568 | 3408 | 244 | 9940 | 14,65 | 26,50 | 33,50 | 93,00 | 0,26 | 53,50 | 96,00 | 4,00 | 7,8 | 1,79 | 16,97 | chloruro-sulfatée |

1- R. S. = Résidu Sec.

2- C. E. = Conductivité Électrique en millimhos/cm.

3- S. A. R. = Sodium Adsorption Ratio.

Tableau n°5

Résultats analytiques du sol
calcimagnésique brun calcaire.

(Description du profil en F.1)

| Profondeur en Cm | Granulométrie en % | | | | | C.Orga* en % | PH H2O | CaCO3 en % | | H.Sat** en % | Humidité % | |
|---------------------------|--------------------|------|------|------|------|-----------------|-----------|------------|-------|-----------------|------------|--------|
| | A. | L.F. | L.G. | S.F. | S.G. | | | Total | actif | | pF 4.2 | pF 2.5 |
| 0 - 15 | 19 | 32.5 | 21 | 11.5 | 12.5 | 145 | 8.5 | 23.5 | 12.6 | 55 | 21.3 | 29 |
| 14 - 47 non prélevé | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 47 - 77 | 31 | 38 | 15 | 10 | 3 | - | 8.4 | 55.4 | 20.1 | 50 | 15.6 | 23.1 |
| 77 et plus non prélevé | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |

* C. Orga = Carbone Organique (en %).

** H. Sat = Humidité à Saturation.

Tableau n°6
 Résultats analytiques
 du sol à tendance vertique.

(Description du profil en F.2)

| Profondeur en Cm | PH H2O | CaCO3 % | | M.O. en % | | | Granulométrie en % | | | | | C.E.* | Humidité % | |
|---------------------|-----------|---------|-------|-----------|------|------|--------------------|------|------|------|------|-------|------------|-----------|
| | | total | actif | C. | N. | C/N | A. | L.F. | L.G. | S.F. | S.G. | | pF 4.2 | pF 2.8 |
| 0 - 32 | 7.2 | 1.2 | - | 1.3 | 0.1 | 13 | 48 | 17 | 16 | 10 | 6 | 0.7 | 17.7 | 22.2 |
| 32 - 100 | 7.7 | 2.1 | - | 0.7 | 0.08 | 8.75 | 46 | 21.5 | 15 | 12 | 6 | 0.5 | 23.7 | 27.3 |
| 100 et plus | 7.9 | 19.2 | 6.1 | - | - | - | 31 | 16 | 15 | 10 | 25.5 | 0.5 | 16.1 | 20.7 |

* C. E. = Conductivité Électrique de l'extrait pâte saturée (mili-S/cm)

M.O.= Matière organique.

Tableau n°7
 Résultats analytiques du sol peu
 salé carbonaté à hydromorphie temporaire.
 (Description du profil en F.3)

| Profondeur en Cm | Granulométrie en % | | | | | CaCO ₃ % | | M.O.* en % | | | Solution sol | | | Extrait Pâte saturée (meq/l.) | | | | Humidité | |
|---------------------|--------------------|------|------|------|------|---------------------|-------|------------|------|------|---------------|------------|------------------------|----------------------------------|-----|-----|------|-----------|-----------|
| | A. | L.F. | L.G. | S.F. | S.G. | total | actif | C. | N. | C/N | H.Sat. %** | C.E. ** | PH H ₂ O | Ca | Mg | K | Na | pF 2.8 | pF 4.2 |
| 0 - 34 | 37 | 40 | 14 | 5 | 1 | 24 | 17.1 | 1.4 | 0.14 | 10 | 65 | 0.6 | 8.4 | - | - | - | - | 35.8 | 28.7 |
| 34 - 73 | 56.5 | 31.5 | 5 | 4 | 1 | 25 | 16.5 | 1.2 | 0.19 | 6.31 | 65 | 0.6 | 8.8 | - | - | - | - | 37.3 | 31.6 |
| 73 - 125 | 60 | 26.5 | 8 | 4.5 | 0.5 | 28 | 17.1 | 0.9 | 0.15 | 6 | 75 | 2.7 | 8.6 | 6.8 | 5.3 | 0.1 | 20.4 | 38.3 | 31.8 |

* M. O. = Matière Organique (en %).
 **C. E. = Conductivité Électrique (mili-S /cm).
 ***H.Sat. = Humidité à Saturation.

180

1.4

Tableau n°8
 Résultats analytiques du sol salé
 carbonaté à hydromorphie de profondeur.
 (Description du profil en F.4)

| Profondeur en Cm | PH H2O | CaCO3 % | | M.O. % | | | Granulométrie en % | | | | | C.E.* | Humidité | |
|---------------------|-----------|---------|-------|--------|------|-----|--------------------|------|------|------|------|-------|-----------|-----------|
| | | total | actif | C. | N. | C/N | A. | L.F. | L.G. | S.F. | S.G. | | pF 4.2 | pF 2.8 |
| 0 - 21 | 8.0 | 28 | 11.4 | 1.7 | 0.20 | 8.5 | 49 | 23 | 15 | 5 | 3 | 4.7 | 21.7 | 25.1 |
| 21 - 73 | 8.7 | 27 | 11.6 | 1.2 | 0.31 | 3.6 | 52 | 31 | 8 | 5 | 1 | 8.8 | 24.5 | 28.9 |
| 73 et plus | 8.7 | 29 | 12.1 | - | - | - | 53 | 27 | 8 | 8 | 1 | 8.9 | 25.9 | 29.3 |

* C. E. = Conductivité Eléctrique (mmhos/cm).

M.O. = Matière organique.

Tableau n°9
 Les ions dans le sol salé
 carbonaté à hydromorphie de profondeur.
 (Description du profil en F.4)

| Profondeur en Cm | Complexe Absorbant en meq/100 grs | | | | Solution du sol en meq./litre. | | | | | | | | |
|---------------------|--------------------------------------|------|------|------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-----------------|------------------------------|------|------|------|-----|
| | Ca | Mg | K | Na | CO ₃ ²⁻ | CO ₃ H ⁻ | SO ₄ ²⁻ | Cl ⁻ | NO ₃ ⁻ | Ca | Mg | Na | K |
| 0 - 21 | 25.4 | 7.62 | 0.91 | 9.15 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 21 - 73 | 21.7 | 7.30 | 0.8 | 11.7 | - | 2.0 | 40 | 68 | - | 10.8 | 16.3 | 75.5 | 0.1 |
| 73 et plus | 15 | 6.4 | 0.5 | 10.5 | - | 2.0 | 16.6 | 30 | - | 2.5 | 4.5 | 43 | 0.1 |

Tableau n°13
 Carbone organique total (en ‰).
 -Méthode Walkley et Black-

| M. V. Inc. | Sol à tendance vertique | | | Sol salé carbonaté | | | | | |
|---------------|-------------------------|-------|-------|----------------------|-------|-------|------------------|-------|-------|
| | | | | non enrichi en gypse | | | enrichi en gypse | | |
| | 0 % | 1 % | 3 % | 0 % | 1 % | 3 % | 0 % | 1 % | 3 % |
| Temps Zero | 12.95 | 15.60 | 20.45 | 17.75 | 21.00 | 27.27 | 17.60 | 20.80 | 26.30 |
| 15 jours | 12.73 | 13.84 | 19.21 | 15.38 | 18.35 | 23.49 | 15.20 | 18.90 | 21.76 |
| 30 jours | 12.85 | 14.51 | 16.49 | 14.40 | 15.03 | 19.70 | 14.50 | 14.80 | 21.45 |
| 90 jours | 11.18 | 13.47 | 15.72 | 14.00 | 15.98 | 18.45 | 13.25 | 14.21 | 19.50 |
| 180 jours | 11.27 | 13.26 | 15.94 | 14.35 | 15.76 | 17.70 | 13.56 | 14.36 | 19.00 |
| 270 jours | 11.80 | 12.57 | 15.31 | 14.00 | 15.34 | 17.91 | 13.38 | 14.30 | 19.20 |

M. V. = Matière Végétale apportée (en ‰).

Inc. = Temps d'incubation (en jours).

Tableau n°14
Carbone minéral (en ‰)
 (Carbone total (Coulomètre)-Carbone organique (Walkley & Black))
 Sol salé carbonaté à hydromorphie de profondeur.

| Inc. \ M.V. | Non enrichi en gypse | | | Enrichi en gypse | | |
|-------------|----------------------|-------|-------|------------------|-------|-------|
| | 0 % | 1 % | 3 % | 0 % | 1 % | 3 % |
| Temps Zero | 24.37 | 23.85 | 25.18 | 24.60 | 25.57 | 25.31 |
| 15 jours | 27.97 | 30.15 | 26.35 | 28.90 | 26.41 | 26.44 |
| 30 jours | 30.95 | 30.87 | 30.99 | 29.58 | 29.10 | 27.50 |
| 90 jours | 29.31 | 25.03 | 27.30 | 28.60 | 28.84 | 29.75 |
| 180 jours | 26.95 | 27.84 | 27.04 | 27.97 | 27.50 | 24.87 |
| 270 jours | 26.76 | 28.34 | 26.36 | 28.35 | 28.17 | 24.95 |

M.V.= Matière Végétale apportée (en %).

Inc.= Temps d'incubation (en jours).

Tableau n°15
 Carbone des matières organiques légères (en %)
 -Méthode du coulomètre-

| M. V. Inc. | Sol à tendance vertique | | | Sol salé carbonaté | | | | | |
|---------------|-------------------------|------|------|----------------------|------|------|------------------|------|------|
| | | | | non enrichi en gypse | | | enrichi en gypse | | |
| | 0 % | 1 % | 3 % | 0 % | 1 % | 3 % | 0 % | 1 % | 3 % |
| Tzmps Zero | 0.24 | 1.67 | 2.66 | 0.25 | 1.16 | 2.25 | 0.23 | 1.13 | 2.19 |
| 15 jours | 0.18 | 1.18 | 2.40 | 0.23 | 1.10 | 1.98 | 0.22 | 1.12 | 1.85 |
| 30 jours | 0.10 | 1.04 | 1.62 | 0.13 | 1.08 | 1.74 | 0.16 | 1.00 | 1.34 |
| 90 jours | 0.07 | 0.55 | 1.15 | 0.03 | 0.47 | 1.11 | 0.08 | 0.19 | 1.00 |
| 180 jours | 0.05 | 0.21 | 0.80 | 0.03 | 0.10 | 0.55 | 0.02 | 0.10 | 0.41 |
| 270 jours | 0.05 | 0.15 | 0.56 | 0.05 | 0.05 | 0.12 | 0.32 | 0.03 | 0.36 |

M. V. = Matière Végétale apportée (en %).
 Inc. = Temps d'incubation (en jours).

Tableau n°16
Carbone des acides fulviques libres (en %)
-Méthode ANNE modifiée-

| M. V. Inc. | Sol à tendance vertique | | | Sol salé carbonaté | | | | | |
|---------------|-------------------------|------|------|----------------------|------|------|------------------|------|------|
| | | | | non enrichi en gypse | | | enrichi en gypse | | |
| | 0 % | 1 % | 3 % | 0 % | 1 % | 3 % | 0 % | 1 % | 3 % |
| Temps Zero | 0.51 | 0.73 | 0.94 | 1.66 | 1.87 | 1.47 | 1.74 | 1.16 | 1.36 |
| 15 jours | 0.60 | 0.77 | 0.85 | 0.74 | 0.87 | 1.08 | 0.74 | 0.82 | 1.06 |
| 30 jours | 0.64 | 0.84 | 0.90 | 0.70 | 0.82 | 0.95 | 0.73 | 0.82 | 0.89 |
| 90 jours | 0.71 | 0.84 | 0.98 | 0.62 | 0.72 | 0.80 | 0.60 | 0.69 | 0.78 |
| 180 jours | 0.54 | 0.80 | 0.89 | 0.42 | 0.55 | 0.66 | 0.39 | 0.42 | 0.58 |
| 270 jours | 0.48 | 0.66 | 0.77 | 0.39 | 0.46 | 0.60 | 0.39 | 0.50 | 0.63 |

186

T. 10

M. V. = Matière Végétale apportée (en %).
 Inc. = Temps d'Incubation (en jours).

Tableau n°17
Carbone des acides fulviques extraits
au pyrophosphate de sodium (en %)
-Méthode ANNE modifiée-

| M. V. Inc. | Sol à tendance verticale | | | Sol salé carbonaté | | | | | |
|---------------|--------------------------|------|------|----------------------|------|------|------------------|------|------|
| | | | | non enrichi en gypse | | | enrichi en gypse | | |
| | 0 % | 1 % | 3 % | 0 % | 1 % | 3 % | 0 % | 1 % | 3 % |
| Temps Zero | 0.70 | 0.88 | 0.79 | 0.74 | 0.61 | 0.63 | 0.50 | 0.65 | 0.50 |
| 15 jours | 1.45 | 1.18 | 1.72 | 0.65 | 0.78 | 0.74 | 0.71 | 0.90 | 0.93 |
| 30 jours | 0.95 | 0.76 | 0.87 | 0.76 | 0.89 | 0.88 | 0.87 | 1.03 | 1.13 |
| 90 jours | 0.60 | 0.77 | 0.71 | 0.74 | 0.79 | 0.90 | 0.84 | 0.72 | 0.79 |
| 180 jours | 0.79 | 0.61 | 0.78 | 0.48 | 0.70 | 0.69 | 0.60 | 0.92 | 0.83 |
| 270 jours | 0.59 | 0.70 | 0.32 | 0.48 | 0.73 | 0.80 | 0.55 | 0.72 | 1.02 |

M. V. = Matière Végétale apportée (en %).

Inc. = Temps d'incubation (en jours).

Tableau n°18
Carbone des acides fulviques
extraits à la soude (en %)
-Méthode ANNE modifiée-

| M. V. Inc. | Sol à tendance vertique | | | Sol salé carbonaté | | | | | |
|---------------|-------------------------|------|------|----------------------|------|------|------------------|------|------|
| | | | | non enrichi en gypse | | | enrichi en gypse | | |
| | 0 % | 1 % | 3 % | 0 % | 1 % | 3 % | 0 % | 1 % | 3 % |
| Temps Zero | 0.50 | 0.67 | 0.74 | 0.69 | 0.71 | 0.71 | 0.38 | 0.33 | 0.42 |
| 15 jours | 0.58 | 0.25 | 1.02 | 0.33 | 0.48 | 0.47 | 0.43 | 0.53 | 0.37 |
| 30 jours | 0.64 | 0.63 | 0.84 | 0.61 | 0.49 | 0.74 | 0.55 | 0.39 | 0.44 |
| 90 jours | 0.61 | 0.77 | 0.88 | 0.36 | 0.45 | 0.79 | 0.32 | 0.43 | 0.48 |
| 180 jours | 0.44 | 0.69 | 1.00 | 0.49 | 0.48 | 0.16 | 0.39 | 0.63 | 0.53 |
| 270 jours | 0.55 | 0.47 | 1.19 | 0.35 | 0.23 | 0.83 | 0.38 | 0.37 | 0.53 |

M. V. = Matière Végétale apportée (en %).
 Inc. = Temps d'incubation (en jours).

Tableau n°19
Carbone des acides humiques extraits
au pyrophosphate de sodium (en %.)
-Méthode ANNE modifiée-

| M. V. Inc. | Sol à tendance vertique | | | Sol salé carbonaté | | | | | |
|---------------|-------------------------|------|------|----------------------|------|------|------------------|------|------|
| | | | | non enrichi en gypse | | | enrichi en gypse | | |
| | 0 % | 1 % | 3 % | 0 % | 1 % | 3 % | 0 % | 1 % | 3 % |
| Temps Zero | 1.90 | 1.97 | 1.86 | 1.51 | 1.32 | 1.47 | 1.42 | 1.20 | 1.27 |
| 15 jours | 2.23 | 2.47 | 2.18 | 1.42 | 1.40 | 1.49 | 1.17 | 1.17 | 1.32 |
| 30 jours | 2.57 | 2.46 | 2.43 | 1.12 | 1.21 | 1.42 | 1.03 | 1.12 | 1.32 |
| 90 jours | 1.27 | 2.13 | 2.47 | 1.22 | 1.46 | 1.39 | 1.06 | 1.51 | 1.61 |
| 180 jours | 1.53 | 2.12 | 2.09 | 2.04 | 2.20 | 2.28 | 1.93 | 1.82 | 2.33 |
| 270 jours | 2.06 | 2.12 | 2.00 | 2.14 | 2.01 | 2.30 | 1.78 | 1.84 | 1.98 |

M. V. = Matière Végétale apportée (en %).
 Inc. = Temps d'incubation (en jours).

Tableau n°20
 Carbone des acides humiques
 extraits à la soude (en %))
 -Méthode ANNE modifiée-

| M. V. Inc. | Sol à tendance vertique | | | Sol salé carbonaté | | | | | |
|---------------|-------------------------|------|------|----------------------|------|------|------------------|------|------|
| | | | | non enrichi en gypse | | | enrichi en gypse | | |
| | 0 % | 1 % | 3 % | 0 % | 1 % | 3 % | 0 % | 1 % | 3 % |
| Temps Zero | 0.19 | 0.25 | 0.50 | 0.21 | 0.29 | 0.34 | 0.27 | 0.24 | 0.18 |
| 15 jours | 0.17 | 0.21 | 0.18 | 0.21 | 0.32 | 0.60 | 0.42 | 0.27 | 0.38 |
| 30 jours | 0.31 | 0.27 | 0.52 | 0.34 | 0.51 | 0.68 | 0.30 | 0.36 | 0.36 |
| 90 jours | 0.27 | 0.36 | 0.56 | 0.22 | 0.30 | 0.46 | 0.23 | 0.29 | 0.45 |
| 180 jours | 0.26 | 0.51 | 0.60 | 0.31 | 0.37 | 0.19 | 0.29 | 0.24 | 0.57 |
| 270 jours | 0.35 | 0.49 | 0.41 | 0.35 | 0.15 | 0.52 | 0.32 | 0.43 | 0.49 |

190

T. 14

M. V. = Matière Végétale apportée (en %).
 Inc. = Temps d'incubation (en jours).

Tableau n°21
 Carbone des Acides Humiques Gris
 de l'extrait pyrophosphate de sodium (en %))
 -Méthode d'électrophorèse sur papier-

| M. V. Inc. | Sol à tendance vertique | | | Sol salé carbonaté | | | | | |
|---------------|-------------------------|------|------|----------------------|------|------|------------------|------|------|
| | | | | non enrichi en gypse | | | enrichi en gypse | | |
| | 0 % | 1 % | 3 % | 0 % | 1 % | 3 % | 0 % | 1 % | 3 % |
| Temps Zero | 1.04 | 1.18 | 1.06 | 0.95 | 0.84 | 0.88 | 0.89 | 0.74 | 0.75 |
| 15 jours | 1.32 | 1.38 | 1.26 | 0.91 | 0.87 | 1.03 | 0.77 | 0.64 | 0.77 |
| 30 jours | 1.49 | 1.43 | 1.46 | 0.75 | 0.79 | 0.91 | 0.64 | 0.73 | 0.83 |
| 90 jours | 0.77 | 1.19 | 1.38 | 0.77 | 0.93 | 0.90 | 0.72 | 0.95 | 1.05 |
| 180 jours | 0.90 | 1.27 | 1.19 | 1.22 | 1.45 | 1.46 | 1.31 | 1.27 | 1.36 |
| 270 jours | 1.32 | 1.31 | 1.16 | 1.30 | 1.27 | 1.47 | 1.21 | 1.31 | 1.29 |

M. V. = Matière Végétale apportée (en %).
 Inc. = Temps d'incubation (en jours).

Tableau n°22
 Carbone des Acides Humiques Intermédiaires
 de l'extrait pyrophosphate de sodium (en %) ₀
 -Méthode d'électrophorèse sur papier-

| M. V. Inc. | Sol à tendance vertique | | | Sol salé carbonaté | | | | | |
|---------------|-------------------------|------|------|----------------------|------|------|------------------|------|------|
| | | | | non enrichi en gypse | | | enrichi en gypse | | |
| | 0 % | 1 % | 3 % | 0 % | 1 % | 3 % | 0 % | 1 % | 3 % |
| Temps Zero | 0.28 | 0.26 | 0.24 | 0.20 | 0.17 | 0.22 | 0.20 | 0.17 | 0.18 |
| 15 jours | 0.29 | 0.30 | 0.31 | 0.18 | 0.18 | 0.15 | 0.14 | 0.14 | 0.20 |
| 30 jours | 0.33 | 0.37 | 0.34 | 0.16 | 0.17 | 0.18 | 0.12 | 0.12 | 0.17 |
| 90 jours | 0.18 | 0.32 | 0.35 | 0.15 | 0.19 | 0.17 | 0.13 | 0.23 | 0.19 |
| 180 jours | 0.20 | 0.30 | 0.25 | 0.30 | 0.26 | 0.30 | 0.27 | 0.18 | 0.33 |
| 270 jours | 0.29 | 0.28 | 0.32 | 0.30 | 0.26 | 0.30 | 0.25 | 0.28 | 0.30 |

M. V. = Matière Végétale apportée (en %).
 Inc. = Temps d'incubation (en jours).

Tableau n°23
 Carbone des Acides Humiques Bruns
 de l'extrait pyrophosphate de sodium (en %.)
 -Méthode d'électrophorèse sur papier-

| M. V. Inc. | Sol à tendance vertique | | | Sol salé carbonaté | | | | | |
|---------------|-------------------------|------|------|----------------------|------|------|------------------|------|------|
| | | | | non enrichi en gypse | | | enrichi en gypse | | |
| | 0 % | 1 % | 3 % | 0 % | 1 % | 3 % | 0 % | 1 % | 3 % |
| Temps Zero | 0.58 | 0.53 | 0.56 | 0.36 | 0.31 | 0.37 | 0.33 | 0.29 | 0.34 |
| 15 jours | 0.62 | 0.79 | 0.61 | 0.33 | 0.35 | 0.31 | 0.26 | 0.29 | 0.35 |
| 30 jours | 0.75 | 0.66 | 0.63 | 0.21 | 0.25 | 0.33 | 0.27 | 0.27 | 0.32 |
| 90 jours | 0.32 | 0.62 | 0.74 | 0.30 | 0.34 | 0.32 | 0.21 | 0.33 | 0.37 |
| 180 jours | 0.43 | 0.55 | 0.65 | 0.52 | 0.49 | 0.52 | 0.35 | 0.37 | 0.44 |
| 270 jours | 0.45 | 0.53 | 0.52 | 0.54 | 0.48 | 0.53 | 0.32 | 0.25 | 0.30 |

M. V. = Matière Végétale apportée (en %).

Inc. = Temps d'incubation (en jours).

Tableau n°24
Carbone de l'humine (en %.)
-Méthode du coulomètre-

| M. V. Inc. | Sol à tendance verticale | | | Sol salé carbonaté | | | | | |
|---------------|--------------------------|------|-------|----------------------|-------|-------|------------------|-------|-------|
| | | | | non enrichi en gypse | | | enrichi en gypse | | |
| | 0 % | 1 % | 3 % | 0 % | 1 % | 3 % | 0 % | 1 % | 3 % |
| Temps Zero | 8.77 | 9.54 | 12.42 | 11.77 | 16.86 | 22.54 | 11.52 | 17.22 | 21.47 |
| 15 jours | 7.43 | 9.21 | 11.24 | 11.05 | 13.41 | 18.10 | 11.36 | 14.17 | 16.28 |
| 30 jours | 7.01 | 8.02 | 9.64 | 9.90 | 11.97 | 13.57 | 10.29 | 10.46 | 16.06 |
| 90 jours | 7.05 | 7.92 | 9.43 | 9.60 | 11.63 | 12.83 | 10.06 | 10.51 | 14.57 |
| 180 jours | 6.91 | 7.83 | 9.43 | 9.47 | 11.42 | 12.63 | 9.72 | 10.32 | 13.44 |
| 270 jours | 6.94 | 7.59 | 9.40 | 9.52 | 11.47 | 12.41 | 9.50 | 10.22 | 13.25 |

M. V. = Matière Végétale apportée (en %).
Inc. = Temps d'Incubation (en jours).

Tableau n°25
 Teneur des polysaccharides par rapport
 au carbone organique total (en p. p. m.)
 -Méthode colorimétrique à l'anthrone. GUCKERT 1973-

| M. V. Inc. | Sol à tendance vertique | | | Sol salé carbonaté | | | | | |
|---------------|-------------------------|-----|-----|----------------------|-----|-----|------------------|-----|-----|
| | | | | non enrichi en gypse | | | enrichi en gypse | | |
| | 0 % | 1 % | 3 % | 0 % | 1 % | 3 % | 0 % | 1 % | 3 % |
| Temps Zero | 47 | 73 | 130 | 24 | 49 | 104 | 28 | 48 | 115 |
| 15 jours | 45 | 65 | 94 | 20 | 44 | 75 | 23 | 37 | 60 |
| 30 jours | 38 | 45 | 49 | 19 | 30 | 51 | 21 | 24 | 36 |
| 90 jours | 33 | 40 | 45 | 17 | 19 | 21 | 17 | 20 | 22 |
| 180 jours | 36 | 38 | 42 | 20 | 26 | 40 | 16 | 21 | 26 |
| 270 jours | 36 | 34 | 42 | 23 | 28 | 37 | 16 | 22 | 25 |

M. V. = Matière Végétale apportée (en %).
 Inc. = Temps d'incubation (en jours).

T.20

Tableau n°26
PH et complexe absorbant du sol
peu évolué d'apport à tendance verticale

(Les sels solubles n'ont pas été dosés)

| M.V. Inc. | | PH | | Complexe Absorbant méq./100 grs. | | | | | |
|-----------|-----|-----|-----|----------------------------------|------|------|------|-------|-------|
| | | H2O | Kcl | Ca | Mg | Na | K | T ph7 | S |
| 0 | 0 | 7.0 | 5.9 | 15.18 | 4.44 | 1.10 | 0.39 | 26.0 | 21.09 |
| | 15 | 7.2 | 6.2 | 17.80 | 4.26 | 1.15 | 0.38 | 27.0 | 23.59 |
| | 30 | 7.5 | 6.5 | 11.74 | 4.54 | 1.19 | 0.46 | 26.0 | 17.93 |
| | 90 | 7.6 | 6.6 | 19.26 | 4.54 | 1.19 | 0.46 | 29.0 | 25.45 |
| | 180 | 7.8 | 6.8 | 16.84 | 4.26 | 1.16 | 0.45 | 27.0 | 22.71 |
| | 270 | 7.5 | 6.8 | 20.12 | 4.72 | 1.09 | 0.43 | 26.6 | 26.36 |
| 1 | 0 | 7.0 | 6.0 | 17.90 | 4.66 | 1.50 | 0.40 | 34.0 | 24.46 |
| | 15 | 7.2 | 6.2 | 15.56 | 4.28 | 1.35 | 0.37 | 26.0 | 21.56 |
| | 30 | 7.6 | 6.5 | 18.00 | 4.52 | 1.35 | 0.48 | 26.0 | 24.35 |
| | 90 | 7.9 | 6.8 | 17.26 | 4.28 | 1.27 | 0.43 | 31.5 | 23.24 |
| | 180 | 7.7 | 6.7 | 17.46 | 4.56 | 1.34 | 0.44 | 27.0 | 23.80 |
| | 270 | 7.8 | 7.0 | 20.18 | 5.00 | 1.30 | 0.46 | 28.0 | 26.94 |
| 3 | 0 | 7.0 | 6.0 | 13.84 | 4.38 | 1.37 | 0.37 | 27.0 | 20.31 |
| | 15 | 7.2 | 6.2 | 16.34 | 4.50 | 1.76 | 0.39 | 24.0 | 22.99 |
| | 30 | 7.5 | 6.5 | 17.60 | 4.50 | 1.61 | 0.44 | 25.0 | 24.15 |
| | 90 | 7.6 | 6.6 | 17.62 | 4.42 | 1.58 | 0.43 | 28.0 | 24.05 |
| | 180 | 7.7 | 6.7 | 16.34 | 4.14 | 1.66 | 0.43 | 24.0 | 22.57 |
| | 270 | 7.7 | 6.8 | 26.50 | 4.26 | 1.16 | 0.41 | 30.0 | 32.33 |

M.V. = Matière Végétale apportée (en %).

Inc. = Temps d'Incubation (en jours).

T. = Capacité d'échange (en méq./100 grs).

S. = Bases Echangeables (en méq./100 grs).

T.21

Tableau n°27

PH et complexe absorbant du sol
salé carbonaté non enrichi en gypse

(Les sels solubles n'ont pas été dosés)

| M.V. Inc. | | PH | | Complexe Absorbant méq./100 grs. | | | | | |
|-----------|-----|-----|-----|----------------------------------|------|-------|------|-------|--------|
| | | H2O | Kcl | Ca | Mg | Na | K | T ph7 | S |
| 0 | 0 | 8.0 | 6.7 | 66.40 | 7.62 | 9.91 | 1.61 | 34.6 | 85.54 |
| | 15 | 8.5 | 7.3 | 61.40 | 6.34 | 9.83 | 1.53 | 44.0 | 79.10 |
| | 30 | 8.5 | 7.2 | 64.60 | 6.64 | 9.93 | 1.61 | 38.0 | 82.78 |
| | 90 | 7.8 | 7.2 | 68.80 | 6.70 | 9.92 | 1.57 | 41.0 | 86.99 |
| | 180 | 7.8 | 7.3 | 70.40 | 6.60 | 9.91 | 1.58 | 41.0 | 88.49 |
| | 270 | 7.4 | 6.7 | 70.80 | 6.88 | 10.58 | 3.34 | 39.0 | 91.60 |
| 1 | 0 | 8.0 | 6.7 | 67.60 | 7.10 | 10.15 | 1.55 | 42.0 | 86.40 |
| | 15 | 8.4 | 7.2 | 59.80 | 6.30 | 10.15 | 1.53 | 32.0 | 77.78 |
| | 30 | 7.9 | 7.0 | 62.80 | 6.78 | 10.15 | 1.63 | 39.0 | 81.38 |
| | 90 | 7.9 | 7.2 | 68.20 | 6.52 | 10.14 | 1.60 | 39.0 | 86.46 |
| | 180 | 7.8 | 7.2 | 80.10 | 7.60 | 11.10 | 2.60 | 42.0 | 101.40 |
| | 270 | 7.2 | 6.8 | 76.00 | 7.48 | 11.08 | 2.52 | 40.0 | 97.08 |
| | 0 | 7.6 | 6.8 | 67.40 | 7.28 | 10.48 | 1.54 | 30.0 | 86.70 |
| | 15 | 8.2 | 7.2 | 61.60 | 6.28 | 10.55 | 1.50 | 38.0 | 79.93 |
| | 30 | 8.0 | 7.0 | 62.20 | 6.76 | 10.51 | 1.57 | 34.0 | 81.04 |
| | 90 | 7.9 | 7.2 | 64.20 | 6.08 | 10.34 | 1.48 | 34.0 | 82.10 |
| | 180 | 7.7 | 7.2 | 80.12 | 7.20 | 11.56 | 2.48 | 47.0 | 101.36 |
| | 270 | 7.1 | 6.6 | 77.60 | 7.10 | 11.64 | 2.16 | 41.0 | 98.50 |

M.V. = Matière Végétale apportée (en %).

Inc. = Temps d'Incubation (en jours).

T. = Capacité d'échange (en méq./100 grs).

S. = Bases Echangeables (en méq./100 grs).

T.22
 Tableau n°28
 PH et complexe absorbant du sol
 salé carbonaté enrichi en gypse

(Les sels solubles n'ont pas été dosés)

| M.V. | Inc. | PH | | Complexe Absorbant méq./100 grs. | | | | | |
|------|------|-----|-----|----------------------------------|------|-------|------|-------|--------|
| | | H2O | Kcl | Ca | Mg | Na | K | T ph7 | S |
| 0 | 0 | 7.5 | 6.8 | 69.80 | 7.98 | 9.90 | 1.55 | 24.0 | 89.20 |
| | 15 | 7.8 | 7.3 | 67.60 | 6.50 | 9.93 | 1.56 | 36.0 | 85.59 |
| | 30 | 7.7 | 7.2 | 73.80 | 6.48 | 9.93 | 1.57 | 39.5 | 91.78 |
| | 90 | 7.9 | 7.4 | 72.60 | 6.14 | 9.88 | 1.50 | 40.0 | 90.12 |
| | 180 | 7.8 | 7.3 | 86.80 | 6.90 | 10.62 | 2.44 | 44.0 | 106.76 |
| | 270 | 7.2 | 6.7 | 80.14 | 7.04 | 10.62 | 2.28 | 44.5 | 100.08 |
| 1 | 0 | 7.4 | 6.8 | 73.60 | 6.92 | 10.15 | 1.54 | 38.0 | 92.21 |
| | 15 | 7.7 | 7.2 | 67.40 | 6.34 | 10.12 | 1.54 | 32.0 | 85.40 |
| | 30 | 7.7 | 7.2 | 69.40 | 6.58 | 10.16 | 1.60 | 38.0 | 87.74 |
| | 90 | 7.8 | 7.3 | 71.60 | 6.18 | 10.13 | 1.54 | 37.0 | 89.45 |
| | 180 | 7.8 | 7.2 | 72.10 | 7.22 | 11.04 | 2.50 | 41.0 | 92.86 |
| | 270 | 7.2 | 6.7 | 84.60 | 7.04 | 11.02 | 2.34 | 42.0 | 105.0 |
| 3 | 0 | 7.4 | 6.8 | 73.80 | 6.89 | 10.56 | 1.49 | 36.0 | 92.74 |
| | 15 | 7.6 | 7.1 | 69.20 | 6.30 | 10.47 | 1.52 | 41.0 | 87.49 |
| | 30 | 7.6 | 7.1 | 66.40 | 6.08 | 10.44 | 1.51 | 46.0 | 84.43 |
| | 90 | 7.7 | 7.3 | 67.60 | 6.04 | 10.44 | 1.50 | 40.0 | 85.58 |
| | 180 | 7.5 | 7.0 | 76.00 | 6.88 | 11.60 | 2.42 | 42.0 | 96.90 |
| | 270 | 7.1 | 6.6 | 78.60 | 7.06 | 11.64 | 3.36 | 37.0 | 99.66 |

M.V. = Matière Végétale apportée (en %).
 Inc. = Temps d'Incubation (en jours).
 T. = Capacité d'échange (en méq./100 grs).
 S. = Bases Echangeables (en méq./100 grs).

Tableau n°29
Agrégats stables après les différents prétraitements (en %)
Sol peu évolué d'apport à tendance verticale

| M. V. Agréats Inc. | 0 % | | | 1 % | | | 3 % | | |
|--------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | Aga (%) | Age (%) | Agb (%) | Aga (%) | Age (%) | Agb (%) | Aga (%) | Age (%) | Agb (%) |
| Temps Zero | 47.0 | 23.9 | 6.8 | 49.0 | 24.5 | 6.7 | 50.1 | 21.2 | 6.9 |
| 15 jours | 50.8 | 33.4 | 7.4 | 58.3 | 47.7 | 19.0 | 62.8 | 55.4 | 44.8 |
| 30 jours | 48.3 | 19.9 | 7.0 | 54.9 | 29.0 | 7.1 | 59.5 | 29.8 | 9.9 |
| 90 jours | 49.4 | 23.5 | 6.7 | 56.1 | 27.4 | 7.5 | 59.3 | 33.5 | 11.8 |
| 180 jours | 48.3 | 20.7 | 7.1 | 52.6 | 26.2 | 7.3 | 60.1 | 38.0 | 13.6 |
| 270 jours | 47.5 | 24.1 | 7.6 | 54.1 | 42.6 | 9.4 | 62.0 | 46.7 | 22.9 |

M. V. = Matière Végétale apportée (en %).
Inc. = Temps d'incubation (en jours).

Aga = Agrégats stables à l'eau après prétraitement à l'alcool.
Agb = Agrégats stables à l'eau sans prétraitement.
Age = Agrégats stables à l'eau après prétraitement au benzène.

Tableau n°30
Agrégats stables après les différents prétraitements (en %)
Sol salé carbonaté non enrichi en gypse.

| M. V. Agréats Inc. | 0 % | | | 1 % | | | 3 % | | |
|--------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | Aga (%) | Age (%) | Agb (%) | Aga (%) | Age (%) | Agb (%) | Aga (%) | Age (%) | Agb (%) |
| Temps Zero | 61.7 | 39.7 | 1.7 | 60.4 | 38.4 | 1.3 | 59.4 | 38.2 | 1.5 |
| 15 jours | 46.1 | 28.3 | 1.7 | 51.0 | 38.6 | 9.3 | 56.9 | 54.2 | 21.0 |
| 30 jours | 46.9 | 25.0 | 1.3 | 54.3 | 39.2 | 3.5 | 63.4 | 49.2 | 17.1 |
| 90 jours | 53.7 | 29.2 | 1.7 | 61.6 | 45.3 | 3.1 | 62.4 | 49.4 | 10.5 |
| 180 jours | 56.5 | 36.7 | 1.7 | 65.8 | 45.8 | 3.0 | 68.0 | 53.7 | 7.8 |
| 270 jours | 60.0 | 51.5 | 10.2 | 66.5 | 65.4 | 34.7 | 70.1 | 64.7 | 41.6 |

M. V. = Matière végétale apportée (en %). Aga = Agrégats stables à l'eau après prétraitement à l'alcool.
 Inc. = Temps d'incubation (en jours). Agb = Agrégats stables à l'eau sans prétraitement.
 Age = Agrégats stables à l'eau après prétraitement au benzène.

Tableau n°31
Agrégats stables après les différents prétraitements (en %)
Sol salé carbonaté enrichi en gypse.

| M. V. Agréats Inc. | 0 % | | | 1 % | | | 3 % | | |
|--------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | Aga (%) | Age (%) | Agb (%) | Aga (%) | Age (%) | Agb (%) | Aga (%) | Age (%) | Agb (%) |
| Temps Zero | 63.9 | 41.6 | 1.7 | 61.3 | 38.0 | 1.6 | 61.9 | 38.8 | 1.5 |
| 15 jours | 55.0 | 47.6 | 5.9 | 60.5 | 57.7 | 29.1 | 66.3 | 64.6 | 58.5 |
| 30 jours | 51.8 | 29.0 | 1.6 | 58.3 | 40.4 | 3.6 | 68.5 | 55.2 | 12.5 |
| 90 jours | 56.0 | 32.2 | 1.5 | 62.2 | 42.1 | 3.3 | 66.7 | 51.4 | 18.4 |
| 180 jours | 59.7 | 37.5 | 1.8 | 63.2 | 43.3 | 2.6 | 70.3 | 55.3 | 14.7 |
| 270 jours | 61.1 | 59.2 | 32.3 | 64.5 | 64.3 | 39.5 | 69.4 | 68.5 | 55.8 |

201

T. 25

M. V. = Matière végétale apportée (en %).
 Inc. = Temps d'incubation (en jours).
 Aga = Agrégats stables à l'eau après prétraitement à l'alcool.
 Agb = Agrégats stables à l'eau sans prétraitement.
 Age = Agrégats stables à l'eau après prétraitement au benzène.

Tableau n°32
Taux de dispersion, Argile+Limon (en %)
Après prétraitement au benzène.

| M. V. Inc. | Sol à tendance vertique | | | Sol salé carbonaté | | | | | |
|---------------|-------------------------|-------|-------|----------------------|-------|-------|------------------|-------|-------|
| | | | | non enrichi en gypse | | | enrichi en gypse | | |
| | 0 % | 1 % | 3 % | 0 % | 1 % | 3 % | 0 % | 1 % | 3 % |
| Temps Zero | 54.60 | 52.50 | 52.00 | 65.50 | 66.60 | 64.00 | 61.90 | 62.40 | 58.20 |
| 15 jours | 35.90 | 23.90 | 12.50 | 61.90 | 45.20 | 33.30 | 40.00 | 23.40 | 10.90 |
| 30 jours | 52.00 | 48.40 | 41.10 | 73.80 | 67.60 | 46.30 | 66.60 | 59.30 | 44.20 |
| 90 jours | 51.00 | 48.40 | 38.00 | 65.00 | 58.20 | 48.40 | 60.30 | 53.60 | 39.00 |
| 180 jours | 51.50 | 47.80 | 37.40 | 60.80 | 54.10 | 47.30 | 55.10 | 55.10 | 40.00 |
| 270 jours | 44.70 | 36.90 | 23.40 | 28.60 | 18.20 | 15.60 | 16.60 | 16.10 | 12.00 |

M. V. = Matière Végétale apportée (en %).
Inc. = Temps d'incubation (en jours).

Tableau n°33
Indice d'instabilité structurale (Is)

| M. V. Inc. | Sol à tendance verticale | | | Sol salé carbonaté | | | | | |
|---------------|--------------------------|------|------|----------------------|------|------|------------------|------|------|
| | | | | non enrichi en gypse | | | enrichi en gypse | | |
| | 0 % | 1 % | 3 % | 0 % | 1 % | 3 % | 0 % | 1 % | 3 % |
| Temps Zero | 2.63 | 2.40 | 2.46 | 1.94 | 2.02 | 1.97 | 1.76 | 1.90 | 1.73 |
| 15 jours | 1.42 | 0.65 | 0.25 | 2.51 | 1.38 | 0.77 | 1.13 | 0.48 | 0.17 |
| 30 jours | 2.68 | 1.93 | 1.48 | 3.13 | 2.14 | 1.09 | 2.50 | 1.78 | 0.99 |
| 90 jours | 2.42 | 1.94 | 1.29 | 2.38 | 1.61 | 1.21 | 2.07 | 1.53 | 0.86 |
| 180 jours | 2.60 | 2.02 | 1.17 | 1.97 | 1.44 | 1.12 | 1.70 | 1.55 | 0.87 |
| 270 jours | 2.16 | 1.27 | 0.61 | 0.72 | 0.33 | 0.27 | 0.33 | 0.29 | 0.19 |

M. V. = Matière Végétale apportée (en %).
Inc. = Temps d'incubation (en jours).

Tableau n°34
 Humidité dans les sols au point
 de flétrissement, à pF 4.2 (en %).

| M. V. Inc. | Sol à tendance vertique | | | Sol salé carbonaté | | | | | |
|---------------|-------------------------|-------|-------|----------------------|-------|-------|------------------|-------|-------|
| | | | | non enrichi en gypse | | | enrichi en gypse | | |
| | 0 % | 1 % | 3 % | 0 % | 1 % | 3 % | 0 % | 1 % | 3 % |
| Temps Zero | 17.70 | 18.50 | 19.30 | 21.70 | 21.80 | 22.40 | 21.10 | 21.40 | 23.00 |
| 15 jours | 16.90 | 17.10 | 17.70 | 21.60 | 21.60 | 21.49 | 20.49 | 20.70 | 21.10 |
| 30 jours | 17.00 | 16.40 | 18.40 | 22.87 | 22.70 | 23.50 | 21.43 | 21.58 | 21.97 |
| 90 jours | 17.16 | 17.60 | 16.50 | 21.31 | 22.16 | 22.00 | 21.71 | 21.28 | 21.93 |
| 180 jours | 17.10 | 17.50 | 18.10 | 21.00 | 21.20 | 21.50 | 21.10 | 21.40 | 21.80 |
| 270 jours | 16.70 | 17.40 | 17.30 | 20.90 | 21.10 | 21.30 | 20.60 | 20.50 | 21.30 |

M. V. = Matière Végétale apportée (en %).

Inc. = Temps d'incubation (en jours)

Tableau n°35
 Carbone des matières humiques totales
 de l'extrait pyrophosphate de sodium (en %))
 -Méthode ANNE modifiée-

| M. V. Inc. | Sol à tendance vertique | | | Sol salé carbonaté | | | | | |
|---------------|-------------------------|------|------|----------------------|------|------|------------------|------|------|
| | | | | non enrichi en gypse | | | enrichi en gypse | | |
| | 0 % | 1 % | 3 % | 0 % | 1 % | 3 % | 0 % | 1 % | 3 % |
| Temps Zero | 2.60 | 2.85 | 2.65 | 2.25 | 1.93 | 2.10 | 1.92 | 1.85 | 1.77 |
| 15 jours | 3.68 | 3.65 | 3.90 | 2.07 | 2.18 | 2.23 | 1.88 | 1.97 | 2.25 |
| 30 jours | 3.52 | 3.22 | 3.30 | 1.88 | 2.10 | 2.30 | 1.90 | 2.15 | 2.45 |
| 90 jours | 2.87 | 2.90 | 3.18 | 1.96 | 2.25 | 2.29 | 1.90 | 2.23 | 2.40 |
| 180 jours | 2.32 | 2.73 | 2.87 | 2.52 | 2.90 | 2.95 | 2.53 | 2.74 | 3.16 |
| 270 jours | 2.63 | 2.82 | 2.32 | 2.62 | 2.74 | 3.10 | 2.33 | 2.57 | 3.00 |

M. V. = Matière Végétale apportée (en %).

Inc. = Temps d'incubation (en jours).

Tableau n°36
Carbone des matières humiques totales
de l'extrait soude (en ‰)
-Méthode ANNE modifiée-

| M. V. Inc. | Sol à tendance vertique | | | Sol salé carbonaté | | | | | |
|---------------|-------------------------|------|------|----------------------|------|------|------------------|------|------|
| | | | | non enrichi en gypse | | | enrichi en gypse | | |
| | 0 % | 1 % | 3 % | 0 % | 1 % | 3 % | 0 % | 1 % | 3 % |
| Temps Zero | 0.68 | 0.92 | 1.24 | 0.90 | 1.00 | 1.05 | 0.65 | 0.57 | 0.60 |
| 15 jours | 0.75 | 0.46 | 1.20 | 0.58 | 0.80 | 1.07 | 0.85 | 0.80 | 0.75 |
| 30 jours | 0.95 | 0.90 | 1.36 | 0.95 | 1.00 | 1.42 | 0.85 | 0.75 | 0.80 |
| 90 jours | 0.88 | 1.13 | 1.44 | 0.58 | 0.75 | 1.25 | 0.55 | 0.72 | 0.93 |
| 180 jours | 0.70 | 1.20 | 1.60 | 0.80 | 0.85 | 0.35 | 0.68 | 0.87 | 1.10 |
| 270 jours | 0.90 | 0.96 | 1.60 | 0.70 | 0.38 | 1.35 | 0.70 | 0.80 | 1.02 |

M. V. = Matière Végétale apportée (en ‰).
 Inc. = Temps d'incubation (en jours).

" EFFET DE L'APPORT DE MATIERE ORGANIQUE ET DE GYPSE SUR LA STABILITE STRUCTURALE DE SOLS DE REGION MEDITERRANEEENNE (Mateur-TUNISIE) "

RESUME :

Les propriétés physiques des sols à argiles gonflantes de la plaine de Mateur (TUNISIE), posent des problèmes, notamment pour la culture de la betterave à sucre, (structure battante, faible perméabilité). Une expérimentation de laboratoire a donc été réalisée, pour déterminer les améliorations que peuvent apporter des amendements organiques et gypseux sur un sol à tendance vertique et un sol salé carbonaté.

Trois doses de matière organique (paille de blé) ont été apportées avec en sous-traitement un apport de gypse pour le sol salé carbonaté. Les échantillons ont été incubés dans des conditions de température constante (28°C), et d'humidité contrôlée. L'incubation a duré 9 mois.

Sur les échantillons prélevés au cours de ces expériences, nous avons étudié :

- L'évolution des matières organiques, en particulier des matières humiques extractibles et des polysaccharides.
- L'évolution des agrégats stables à l'eau (tests HENIN-MONNIER).

L'analyse des résultats obtenus, aboutit aux conclusions suivantes :

Dans ces deux sols, on observe deux phases très nettes d'évolution de l'agrégation. L'une très brève, avec une forte amélioration des taux d'agrégats stables (15 premiers jours), puis une décroissance aussi rapide (15 jours suivants), correspondant à la minéralisation rapide des constituants énergétiques apportés ou préexistants dans ces sols. Elle serait donc essentiellement d'origine biologique. L'autre phase intervient après 6 mois. Elle est moins intense, mais plus durable, et paraît liée à l'action des produits humiques qui se polymérisent (acides humiques gris).

Dans le sol salé carbonaté, le gypse seul a une action limitée sur de l'agrégation. En revanche la synergie avec l'action de l'amendement organique, amplifie nettement les deux phases de l'agrégation. Durant la première, les deux apports conjugués stimuleraient l'activité bactérienne et la synthèse des substances agrégatives. A long terme, cette action porte sur l'agrégation et la polymérisation des acides humiques.

L'ajustement d'un modèle sur l'évolution du carbone organique dans ces sols, montre que la stabilité de l'humus dans le sol à tendance vertique est deux fois plus faible que dans le sol salé carbonaté; et l'apport de gypse accélère très fortement la minéralisation de l'humus.

MOTS CLES :

MATIERE ORGANIQUE - ACIDES HUMIQUES ET FULVIQUES - POLYSACCHARIDES - GYPSE - AGREGATS - STABILITE STRUCTURALE - SOL VERTIQUE - SOL SALE CARBONATE -BETTERAVE SUCRIERE.