

- ELSON L.A. & MORGAN W.J., 1933. - A colorimetric method of determination of glucosamine and chondrosamine, *Biochem. J.*, **27**, 1824-1828.
- HAIDER K., FREDERICK L.-R. & FLAIG W., 1965. - Reactions between amino-acid compounds and phenols during oxidation. *Plant & Soil*, **22**, 49-64.
- JAMES L.-B., 1972. - Amino-acid analysis : the humin problem. *J. Chromat.*, **68**, 123-130.
- JANEL Ph., JOCTEUR-MONROZIER L. et TOUTAIN F., 1979. - Caractérisation de l'azote des litières et des sols par hydrolyse acide. *Soil Biol. Biochem.*, **11**, 141-146.
- JOCTEUR-MONROZIER L., 1984. - *Nature et évolution de l'azote organique dans les sols et les sédiments marins récents*. Thèse Doct. Etat, Univ. Nancy I, 176 p.
- JOCTEUR-MONROZIER L. et DUCHAUFOR Ph., 1986. - Données récentes sur l'humification. *Science du Sol*, **24**, 377-388.
- JOCTEUR-MONROZIER L. et ANDREUX F., 1981. - L'azote organique des sols. Exemples de quantification des formes protéiques et des combinaisons complexes. *Science du Sol*, **3**, 219-242.
- KAI H., AHMAD Z. & HARADA T., 1973. - Factors affecting immobilization and release of nitrogen in soil and chemical characteristics of the nitrogen newly immobilized. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **19**, 275-286.
- LOWE L.E., 1973. - Amino-acid distribution in forest humus layers in British Columbia. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **37**, 569-572.
- MARUMOTO T., FURUKAWA K., YOSHIDA T., KAI H., YAMADA Y & HARADA T., 1974. - Contribution of microbial cells and their cell-walls to the accumulation of soil organic matter decomposable on drying. I. Changes in the contents of individual amino-acids and amino-sugars in the organic nitrogen fraction as a result of the decomposition of applied ryegrass residues. *J. Sci. Soil and Manure*, **45**, 23-28. Résumé In : *Soil Sci. Plant. Nutr.*, **21**, 80-81.
- MOORE S. & STEIN W.H., 1954. - A modified ninhydrin reagent for the photometric determination of amino-acids and related compounds. *J. Biol. Chem.*, **211**, 907-913.
- PARSONS J.W. & TINSLEY J., 1975. - Nitrogenous substances. In : *Soil Components*. I. Organic components. J.E. Gieseking ed., Springer Verlag Publ., Berlin, 263-304.
- SCHLEIFER K.H. & KANDLER O., 1972. - Peptidoglycan types of bacterial cell-walls and their taxonomic implications. *Bacteriol. Rev.*, **36**, 407-477.
- STEVENSON F.J., 1982. - Organic forms of soil nitrogen. In : *Nitrogen in agricultural soils*, F.J. Stevenson ed., Amer. Soc. Agron. Publ., Madison, Wisconsin, 67-122.
- WAGNER G.H. & MUTATKAR V.K., 1968. - Amino components of soil organic matter formed during humification of ¹⁴C-glucose. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **32**, 683-686.

Effets d'apports organiques et de gypse sur la stabilité structurale de deux sols méditerranéens

H. SIDI⁽¹⁾
M. PANSU⁽²⁾

RÉSUMÉ

Des expériences sur modèles de laboratoire ont été conduites avec des mélanges de matériaux terreux (tableau I), de paille de blé et de gypse.

Elles ont amené l'acquisition au cours du temps de nombreuses mesures et tests classiques physiques et chimiques concernant la stabilité structurale et les fractions organiques.

Une classification hiérarchique des données centrées réduites (Fig. 2) a montré l'effet des amendements organiques et gypseux sur les propriétés mesurées des sols, particulièrement leur stabilité structurale, en relation avec le temps d'incubation.

Des informations, sélectionnées à partir d'analyses en composantes principales (Fig. 3) ont permis de préciser :

- les étapes de l'évolution de la stabilité structurale au cours du temps (Fig. 4) ;

- la comparaison de cette évolution avec celle de certaines fractions organiques (Fig. 5, Fig. 6) en liaison ou non avec l'action du gypse.

L'article propose enfin une autre approche de l'étude de la stabilité structurale des sols, sous l'effet d'amendements organiques, par l'utilisation d'un modèle à trois compartiments (Fig. 1, Fig. 7). Cette approche s'avère ici bien représentative des résultats de la classification ascendante hiérarchique et d'un ensemble de connaissances sur les sols, mais des expériences complémentaires sont nécessaires pour valider nos observations.

MOTS-CLÉS : sol - agrégat - matière organique - modélisation - incubation.

EFFECTS OF ORGANIC AND GYPSUM AMENDMENTS ON STRUCTURAL STABILITY OF TWO MEDITERRANEAN SOILS

Laboratory experiments have been carried out on mixtures of soil materials (table I), wheat straw and gypsum.

Numerous data on classic physical and chemical measurements, particularly for the evaluation of the structural stability and the organic fractions of soils, have been acquired with time.

ORSTOM Fonds Documentaire

N° : 31.915 ca 1

14 MAI 1991

(1) I.N.E.S. Agro-vétérinaire, BP 307 W-TIARET, ALGERIE.

(2) ORSTOM, BP 5045, 2051 Avenue du Val de Montferand, 34032 MONTPELLIER CEDEX 05 FRANCE

A hierarchical clustering of the scaled data (fig. 2) has shown the effect of organic and gypsum amendments on measured soil properties, particularly their structural stability, in relation to the incubation time.

Several information selected from a principal components analysis (fig. 3) has been used to assess :

- the main stages of structural stability evolution with time (fig. 4) ;
- the comparison of the evolution of structural stability and certain organic fractions (fig. 5 & 6) in relation with gypsum action.

Finally, this paper suggests another approach by comparative analysis between physical soil structure and organic matter evolution. This approach, which uses a three compartments model (fig. 1 & 7), was found to be in accordance with the hierarchical clustering results and seems representative of the current scientific knowledge about soils. Nevertheless, complementary experiments are necessary to validate our observations.

KEY-WORDS : soil aggregation - soil organic matter - modelisation - incubation.

INTRODUCTION

L'aération des sols, leur capacité de rétention d'eau et par suite, leur activité microbienne et la croissance des plantes sont dépendantes notamment de la taille et de la stabilité des macro-agrégats de diamètre supérieur à 200 μ (COMBEAU *et al.*, 1961 ; RUSSELL, 1973).

La stabilité des agrégats lors de leur immersion dans l'eau dépend de nombreux facteurs. Ainsi, les deux phénomènes d'éclatement (slaking) puis de dispersion des particules fines (HENIN, 1938 ; EMERSON, 1967 ; OADES, 1984) sont influencés par l'humidité initiale, la texture, le type de minéraux argileux (HENIN, 1938 ; KEMPER *et al.*, 1985), le calcium et les hydroxydes amorphes de fer et d'aluminium (GIOVANNINI et SEQUI, 1976) en interaction avec les matières organiques (BARTOLI *et al.*, 1988).

Il est généralement admis que la stabilité des agrégats varie en sens inverse de la mouillabilité des sols (MONNIER, 1965), ce dernier paramètre étant en liaison inverse avec le taux de matière organique. Ainsi, des corrélations positives ont très souvent été observées entre la stabilité des états structuraux et le taux de carbone organique des sols (COMBEAU *et al.*, 1961 ; COMBEAU et QUANTIN, 1964 ; HAMBLIN et DAVIES, 1977 ; OADES, 1984 ; CHANEY et SWIFT, 1984).

Parmi les différents constituants de la matière organique, les polysaccharides semblent jouer un rôle prépondérant sur la stabilité structurale (MONNIER, 1965 ; BACHELIER, 1966 ; DOMMERGUES et MANGENOT, 1970 ; STEVENSON, 1982). Cette action pourrait s'exercer par l'intermédiaire de liaisons calcium-polysaccharides (BARTOLI *et al.*, 1988) et aussi de manière indirecte en favorisant la croissance de microorganismes ayant un rôle stabilisant (CHENU, 1985).

Elle apparaît plus évidente sur les sols pauvres en matière organique (GUCKERT, 1973 ; HAMBLIN et GREENLAND, 1977 ; CHESHIRE, 1979, CHESHIRE *et al.*, 1983). La sta-

bilisation s'avère de courte durée (MONNIER, 1965 ; CHANEY et SWIFT, 1986 I) et n'apparaît pas en présence de sols rendus mono-ioniques (CHANEY et SWIFT, 1986 I).

Les substances humiques peuvent provoquer une amélioration structurale plus persistante dans des conditions où les polysaccharides extra cellulaires sont sans effet (CHANEY et SWIFT, 1986 II) et par l'intermédiaire de liaisons avec le calcium et l'aluminium (BARTOLI *et al.*, 1988). Cette stabilisation a été mise en évidence dans le cas des sols carbonatés (WALLACE *et al.*, 1986).

Par rapport à ces observations, nos expériences d'incubation visaient à préciser l'effet de diverses fractions organiques, en évolution contrôlée, sur la stabilité structurale. Elles ont été conduites en laboratoire sur deux échantillons de sols méditerranéens, pauvres en matières organiques et riches en argiles gonflantes : un sol peu évolué d'apport à tendance vertique et un sol salé carbonaté à hydromorphie de profondeur.

Ces sols provenaient de la région de Mateur (Tunisie) où ils se trouvent soumis depuis longtemps à des cultures continues de blé avec brûlis des pailles. Ils sont « battants » et présentent souvent une structure peu stable. D'un point de vue agronomique, nos expériences permettaient de tester l'effet d'un enfouissement des pailles sur leurs propriétés physiques. D'après BOIFFIN (1974), une politique d'entretien organique des terres constitue un des principaux facteurs (mais non le seul) de maintien d'une stabilité structurale élevée permettant de réduire la « dégradation » de la mince couche superficielle du sol sous l'action des pluies.

Dans le cas du sol salé, nous avons également cherché à appréhender l'interaction de l'apport organique avec le calcium au moyen d'amendements gypseux. Ce choix se trouvait en outre justifié par les nombreux effets du gypse déjà signalés : diminution du sodium échangeable (GREENE et FORD, 1985), amélioration de l'aération des sols (JAYAWARDANE et BLACKWELL, 1985 ; CHARTRES *et al.*, 1985), réduction de la battance (SO *et al.*, 1978) de sols riches en minéraux interstratifiés (CHARTRES *et al.*, 1985) analogues à ceux de notre expérience.

L'interprétation des données a été réalisée en deux temps :

- étude de la cinétique d'humification et de minéralisation des matières organiques (PANSU et SIDI, 1987) ;
- étude des variations de stabilité structurale en relation avec l'évolution des fractions organiques. C'est ce deuxième aspect que nous développerons ici.

L'analyse statistique multivariable a été choisie pour classer les échantillons sous l'influence globale de toutes les mesures collectées puis pour identifier les mesures les plus discriminantes. Nous avons pu alors étudier plus précisément l'évolution comparée de ces dernières en fonction du temps et pour chaque amendement, organique et gypseux.

I. MATÉRIELS ET MÉTHODES

A) MATÉRIELS UTILISÉS ET PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

Déjà décrites précédemment (SIDI, 1987), les principales caractéristiques des deux sols utilisés sont rappelées dans le tableau I.

SOLS	pH	CaCO ₃ %		M.O. en %			Granulométrie en %					C.E. mS/cm	Humidité %	
		total	actif	C.	N.	C/N	A. <2μ	L.F. 2-20μ	L.G. 20-50μ	S.F. 50-200μ	S.G. >200μ		pF 4,2	pF 2,8
VE	7,2	1,2	-	1,3	0,1	13	48	17	16	10	5	0,7	17,7	22,2
SA	8,0	28	11,4	1,7	0,20	8,5	49	23	15	5	3	4,7	21,7	25,1

Tableau I : Caractéristiques analytiques des échantillons étudiés.

VE : sol peu évolué d'apport à tendance vertique (0-32cm).

SA : sol salé carbonaté à hydromorphie de profondeur (0-21cm).

C.E. = conductivité électrique de l'extrait pâte saturée.

Analytical characteristics of soil samples.

VE : vertic alluvial soil (0-32cm).

SA : carbonated and sodic soil with hydromorphic subsoil (0-21cm).

C.E. = electrical conductivity of saturated extract.

L'apport organique consiste en une paille de blé, découpée et calibrée entre 0,2 et 2 mm, avec des doses apportées correspondant à 0 (témoin), 2,7 et 8,1 pour mille de carbone organique dans le sol sec. Pour le sol salé carbonaté, nous avons ajouté un sous traitement avec des apports de 1% de gypse.

Les conditions d'incubation en laboratoire (SIDI, 1987) ont été choisies pour optimiser les cinétiques d'humification et de minéralisation: ajout d'ammonium en début d'expérience pour ramener à 15 le rapport C/N de l'amendement, température constante de 28 °C, alternances humectations-dessiccations avec une teneur en eau ramenée tous les trois jours à 80% de l'humidité équivalente à la capacité de rétention au champ. Un régime hydrique alterné favoriserait les processus de polymérisation et conservation des substances humiques (DUCHAUFOR, 1977) et les processus de polymérisation-dépolymérisation entre les acides humiques et fulviques (TURENNE et PLENECASSAGNE, 1976).

Les prélèvements ont été effectués à 0, 15, 30, 90, 180 et 270 jours d'incubation. Les essais conduits en double comprenaient donc 36 échantillons pour chacune des trois expériences notées comme suit :

VE : sol peu évolué d'apport à tendance vertique ;

SA : sol salé carbonaté à hydromorphie de profondeur ;

SG : sol SA amendé à 1 % de gypse.

Les essais en double ont été réunis et homogénéisés préalablement aux analyses.

B) LES MÉTHODES ANALYTIQUES

Les teneurs en carbone organique ont été mesurées selon la méthode WALKLEY et BLACK. Les teneurs en carbone des échantillons provenant du sol non carbonaté ont été vérifiées par combustion sous oxygène à 1200°C et dosage du CO₂ dégagé par coulométrie.

Le fractionnement des matières humiques a été réalisé selon la méthode de DABIN (1976). Le carbone des matières organiques légères et de l'humine a été dosé par combustion et coulométrie du CO₂ alors que le carbone des extraits humiques et fulviques, a été mesuré après séchage par oxydation sulfochromique et dosage en retour au sel de MOHR.

Les polysaccharides ont été dosés par hydrolyse sulfurique et colorimétrie à l'anthrone (GUCKERT, 1973).

La détermination des taux d'agréats stables à l'eau a été réalisée avec les différents pré-traitements des tests d'instabilité structurale préconisés par HENIN et MONNIER (1956). Nous avons ainsi mesurée : les agréats sans prétraitement, après prétraitement à l'alcool, après prétraitement au benzène et le taux de fractions fines (argiles et limons) dispersées lors de ce dernier. Nous avons également mesuré l'humidité au point de flétrissement.

Les 14 mesures physiques et chimiques sur chaque échantillon de nos trois expériences seront notées comme suit :

AGA : taux d'agréats après prétraitement à l'alcool ;

AGB : taux d'agréats après prétraitement au benzène ;

AGE : taux d'agréats sans prétraitement ;

AL : taux de fractions fines argile et limon ;

pF4 : humidité au point de flétrissement (pF4,2) ;

CT : carbone total ;

AFL : acides fulviques libres extraits par H₃PO₄ ;

MOL : matières organiques légères (densité<1,2) ;

AFP : acides fulviques des extraits au pyrophosphate ;

AHP : acides humiques des extraits au pyrophosphate ;

AFS : acides fulviques des extraits à la soude 0,1N ;

AHS : acides humiques des extraits à la soude 0,1N ;

CHT : carbone du culot d'humine ;

PLS : polysaccharides hydrolysables.

C) LE TRAITEMENT DES DONNÉES

Pour chaque expérience, nous disposons d'un tableau constitué de 14 colonnes de mesures physico-chimiques appliquées à chacun des 18 prélèvements.

Seule une technique d'analyse discriminante pouvait permettre de regrouper les échantillons de propriétés physiques et de statuts organiques voisins (MASSART et KAUFMAN, 1983). Il était au préalable impératif de s'affranchir des facteurs d'échelle résultant de la dispersion plus ou moins importante des résultats selon les techniques analytiques et nous avons substitué aux tableaux de mesures initiales, les tableaux de mesures centrées réduites puis nous avons effectué une classification ascendante hiérarchique sur ces nouveaux tableaux.

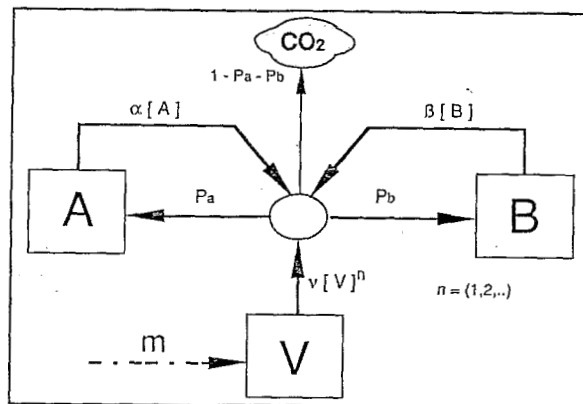
Afin d'apprécier l'effet des traitements expérimentaux, nous n'avons pas utilisé la représentation classique des dendrogrammes. Pour chaque expérience, les résultats ont été reportés dans un tableau (Fig. 2) dont les colonnes représentent l'apport de carbone par la paille et les lignes correspondent aux temps d'incubation. Les classes sont séparées par des traits et identifiées par un système d'indice avec les chiffres 1 et 2. La hiérarchie de la classification est indiquée par l'épaisseur décroissante des traits et par la grosseur et la position du chiffre dans l'indice. Le trait le plus épais correspond à la classification la plus

significative (qui contribue le plus à l'inertie) donnant les classes 1 et 2 indiquées par le chiffre le plus à gauche de l'indice. Le trait le plus fin et le chiffre le plus à droite indiquent la classe la moins significative.

L'analyse discriminante nous renseigne sur les variables qui contribuent le plus à la formation des classes. L'analyse factorielle est pourtant plus performante pour identifier ces variables. Nous avons donc effectué, pour chaque expérience, une analyse en composantes principales afin de sélectionner les types de mesures à étudier plus précisément en fonction des conditions expérimentales.

Enfin, nous avons comparé l'évolution de l'agrégation avec celle de compartiments organiques simulés par le modèle de la figure 1 que nous avons proposé précédemment pour décrire la cinétique d'humification et de minéralisation de cette expérience (PANSU et SIDI, 1987 ; PANSU, 1988).

Fig. 1 : Diagramme des flux du modèle descriptif de la dynamique des matières organiques dans les sols: A = matières organiques labiles, B = matières organiques humifiées stables, V = matière végétale non décomposée, m = apport organique, v - α et β = taux de décroissance respectifs des compartiments V - A et B, P_a et P_b = fractions de renouvellement dans les compartiments A et B, n = ordre de la cinétique de décroissance du compartiment V.



Flow diagram for the dynamics of soil organic matter: A = labile organic matter, B = stable humified organic matter, V = plant materials, m = organic amendment, v , α et β = rate of decrease respectively of compartments V - A and B, P_a et P_b = turnover proportion in A and B compartments, n = order of the kinetic of decrease of V compartment.

Les analyses de données ont été effectuées à l'aide du logiciel NDMS (NOIROT *et al.*, 1989), la simulation numérique du modèle à l'aide de la bibliothèque scientifique Turbo Pascal toolbox.

II. RESULTATS ET DISCUSSION

A) EFFET GLOBAL DES TRAITEMENTS EXPERIMENTAUX

1. Sol peu évolué d'apport à tendance verticale (VE Fig. 2)

Nous remarquons que l'apport organique a une influence nette sur la répartition des classes. L'analyse discriminante fournit deux classes principales d'échantillons (29% de contribution à l'inertie) déterminées en priorité par des différences entre taux d'agrégats stables: les échantillons non amendés (classe 1) et les échantillons ayant reçu un apport organique (classe 2).

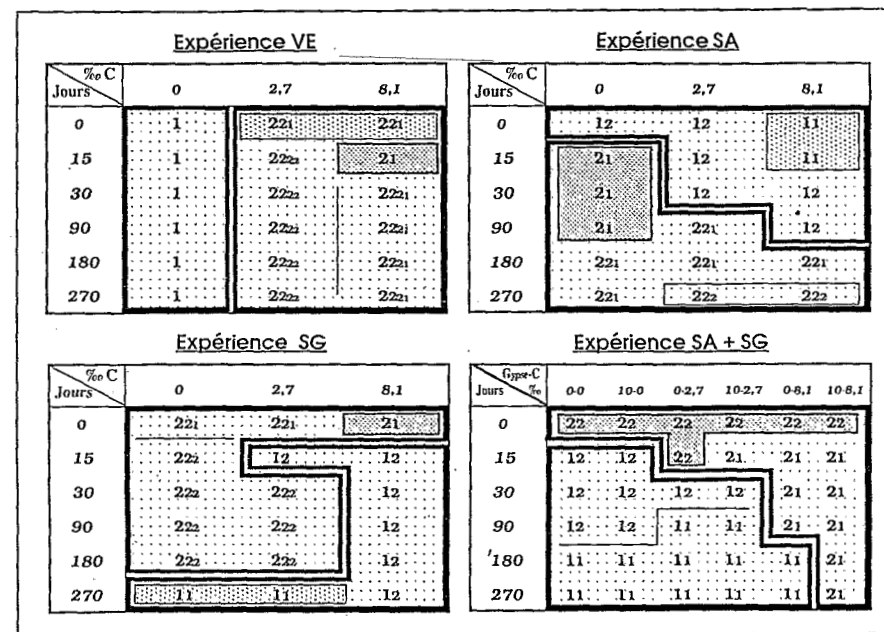


Fig. 2 : Classification hiérarchique des échantillons selon leurs propriétés physico-chimiques pour chacune des expériences VE, SA, SG et avec le regroupement des deux dernières (SA+SG). Hierarchical clustering of samples according to their physico-chemical properties, for each of the three experiments VE, SA, SG and for the last two together (SA+SG).

Dans la classe 2, on distingue assez nettement (18%) l'échantillon ayant reçu la plus forte dose de matière organique, au bout de 15 jours d'incubation. C'est le taux d'agrégats stables après prétraitement au benzène qui contribue le plus à la séparation de cette classe.

La stabilisation de la structure par des matières organiques de formation récente semble la propriété la plus caractéristique des échantillons de la classe 2. L'analyse décèle également une différenciation de l'échantillon faiblement amendé à 15 jours d'incubation mais vers le niveau inférieur de la hiérarchie (8%).

En conclusion, l'apport organique, quelle que soit la dose, semble influencer les propriétés de ce sol plus que le temps d'incubation. L'évolution des échantillons non amendés n'est pas perceptible par l'analyse au cours du temps. Une modification importante des propriétés des sols amendés est enregistrée après un bref délai d'incubation, en particulier pour les forts amendements organiques. Par contre on ne voit pas d'évolution après un mois d'incubation, quelle que soit la dose de paille apportée.

2. Sol salé carbonaté non amendé en gypse (SA Fig. 2)

La limite en diagonale des deux grandes classes (25%) est le signe d'une interaction entre quantité de matière végétale apportée et temps d'incubation.

Ce sont surtout les matières peu humifiées qui contribuent à la formation de la classe 1 (matières organiques légères, acides fulviques libres, humine et polysaccharides) et les matières humifiées à celle de la classe 2.

Cette classe 2 se différencie ensuite (18 %) en deux sous-classes. La sous-classe 21 est caractérisée principalement par de faibles taux d'agrégats stables pendant les trois premiers mois sans apport organique. Les échantillons de la sous-classe 22 comprennent des taux d'agrégats stables plus élevés sous l'influence prépondérante des acides humiques extractibles par le pyrophosphate de sodium.

3. Sol salé carbonaté amendé en gypse (SG Fig. 2)

Les taux d'agrégats stables sont les premiers responsables de la différenciation (25 %) des deux classes principales.

Les échantillons de la classe 1, qui possèdent les plus forts taux d'agrégats correspondent à l'apport organique maximum et/ou aux incubations de neuf mois. La présence dans cette classe de l'échantillon d'amendement organique plus faible à 15 jours d'incubation semble témoigner de deux mécanismes de stabilisation de la structure: sous l'effet de matières organiques de formation récente ou bien sous l'effet de matières bien humifiées.

4. Sol salé carbonaté avec et sans gypse (SA + SG Fig. 2)

Afin de mieux croiser l'effet du gypse et de l'apport de matière organique, une nouvelle classification ascendante hiérarchique a été effectuée sur l'ensemble des 36 incubations du sol salé carbonaté des expériences SA et SG.

On observe deux grandes classes (19 % de contribution à l'inertie) contenant un nombre à peu près égal d'échantillons parmi lesquels environ la moitié a reçu du gypse.

L'apport de gypse accélère les processus d'humification et de minéralisation (PANSU et SIDI, 1987). Il induit une différenciation plus nette des échantillons à fort amendement organique et presque indépendamment du temps d'incubation alors qu'il existe une forte interaction entre le taux d'apport organique et le temps d'incubation en l'absence de gypse. Ce n'est apparemment pas le gypse en lui-même qui exerce une influence prépondérante sur les propriétés physiques et chimiques mesurées mais plutôt son interaction avec la matière organique.

B) EFFET COMPARATIF DES DIFFÉRENTES VARIABLES MESURÉES

La figure 3 représente les plans factoriels déterminés par les deux premiers axes de l'analyse en composantes principales pour les trois expériences VE, SA, SG.

L'axe 1 représente 22% de contribution à l'inertie pour l'expérience VE, 32% pour SA et 33 % pour SG. Dans les trois expériences, il traduit essentiellement une différenciation par les variables physiques avec une opposition entre fractions agrégées d'une part, fractions fines et humidité au point de flétrissement d'autre part. La même observation est notée par BARTOLI *et al.* (1988) qui font intervenir pourtant d'autres types de mesures.

Les corrélations des taux d'agrégats stables avec les variables chimiques et la contribution de ces dernières à la formation de l'axe 1 n'apparaissent pas comme évidentes. Dans les deux premières expériences, nous percevons une contribution des acides humiques, surtout ceux extraits au pyrophosphate et pour l'expérience VE des «acides fulviques pyrophosphate» côté agrégats. Cette observation concorde avec l'influence signalée par ailleurs (CHANEY et SWIFT, 1986 II ; WALLACE *et al.*, 1986) des matières humifiées sur la stabilité structurale.

L'apport de gypse rend cette observation encore moins perceptible puisqu'il renforce le rôle de la stabilité structurale dans la formation de l'axe 1 et pratiquement toutes les fractions organiques apparaissent cette fois côté agrégats.

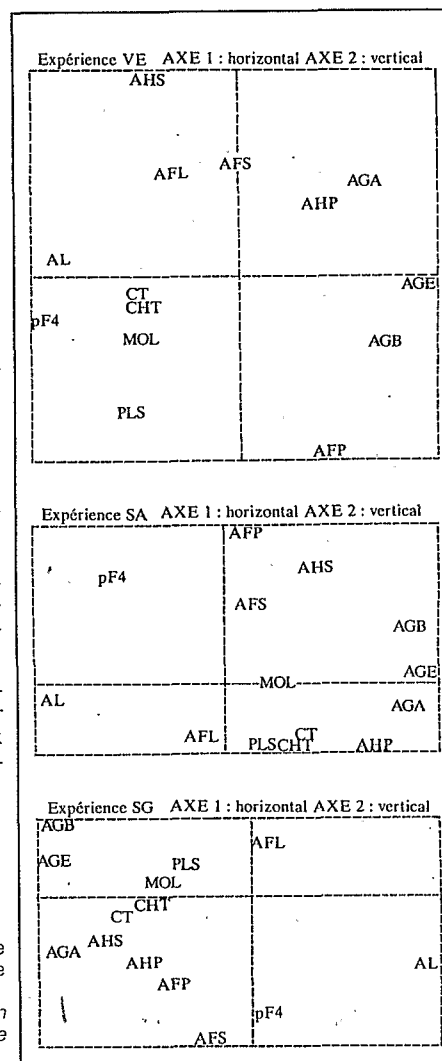
L'axe 2 représente 17% de contribution à l'inertie pour VE, 15% pour SA et seulement 13% pour SG. Il indique des différenciations peu évidentes provenant probablement des processus d'humification avec une opposition soit entre produits de formation récente (PLS, MOL, AFL) et fractions humiques plus évoluées, soit selon le degré de polycondensation entre acides humiques et fulviques.

On décèle également, pour les expériences VE et SG, une opposition entre «agrégats alcool (AGA)» côté produits humifiés et «agrégats benzène (AGB)» côté produits peu évolués. L'opposition n'apparaît que sur l'axe 3 dans l'expérience SA.

Ceci confirme les observations de MONNIER (1965). Le prétraitement à l'alcool, en remplaçant l'air des micropores, provoque une protection contre l'action de l'eau. Le prétraitement au benzène, au contraire, diminue la stabilité sur des terres pauvres en matières organiques alors que sur des terres organiques, la formation d'une couche hydrophobe apporte une protection aux agrégats.

Nos résultats précisent que ce prétraitement au benzène semble surtout l'indicateur le plus sensible de l'agrégation liée aux produits humiques jeunes en début d'incubation.

Fig. 3 : Représentation des variables mesurées dans le premier plan factoriel de l'analyse en composantes principales, pour chacune des 3 expériences VE, SA, SG.
Representation of measured variables in the first factorial plane for each of the three experiments VE, SA and SG.



C) ÉVOLUTION DE LA STABILITÉ DES AGRÉGATS

1. Taux d'agrégats stables

En raison des résultats ci-dessus de l'analyse en composantes principales (bonne corrélation sur l'axe 1 entre les trois types d'agrégats, pas d'influence sur l'axe 2 des agrégats sans prétraitement mais opposition entre les deux autres types), nous avons jugé plausible de ne considérer ci-dessous que les taux d'«agrégats benzène AGB» et ceux d'«agrégats alcool AGA». La figure 4 représente l'ensemble de leurs résultats en relation avec l'amendement organique et le temps d'incubation.

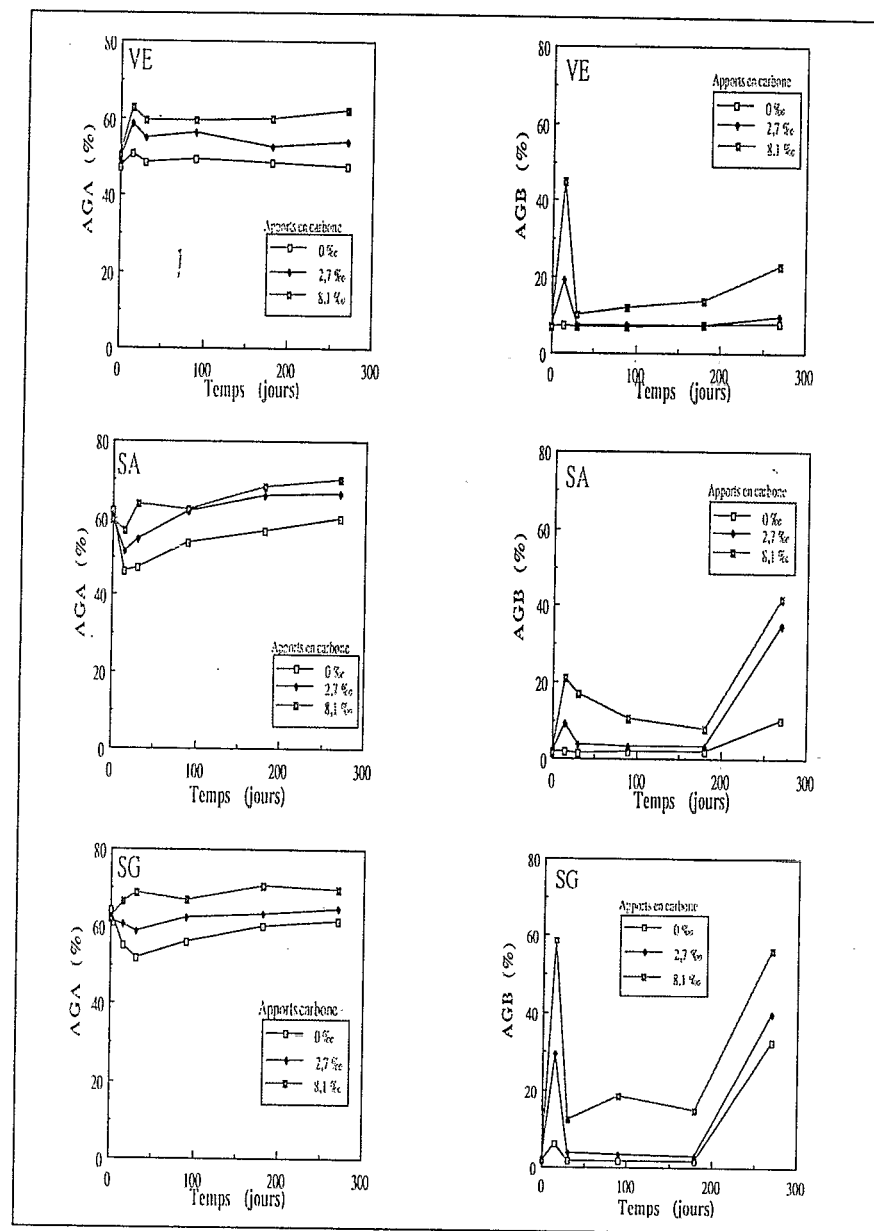


Fig.4 : Evolutions comparatives, en fonction du temps et pour chaque apport de paille, des taux d'agrégats stables avec prétraitement à l'alcool (AGA) et au benzène (AGB) pour chacune des expériences VE, SA, SG.
Comparative evolutions with time, for each straw amendment, of stable aggregate rates with alcohol (AGA) and benzene treatment (AGB) for each of the three experiments VE, SA and SG.

Ces résultats confirment les observations de l'analyse en composantes principales.

Conformément aux essais du même type, les taux d'«agrégats alcool» sont toujours plus élevés que ceux d'«agrégats benzène» et ils évoluent relativement moins avec le temps si ce n'est par une augmentation assez régulière avec des anomalies positives ou négatives en début d'incubation.

Les taux d'«agrégats benzène» sont au contraire en priorité influencés par le temps d'incubation donc par la qualité des matières organiques présentes plutôt que par leur quantité. Sur l'axe 2 des analyses en composantes principales ils étaient situés à côté des produits peu humifiés.

Dans le but d'observer des relations avec les fractions organiques, nous retiendrons donc surtout l'évolution de la stabilité des agrégats à travers le prétraitement au benzène. Ce choix peut être sujet à caution : BOIFFIN(1974), tout en reconnaissant la validité des tests de HENIN et MONNIER pour la caractérisation et la comparaison des matériaux, leur reproche de donner un poids excessif aux phénomènes d'éclatement masquant ainsi d'autres effets qu'il désire observer. Dans cette optique, il propose de ne pas retenir le test avec prétraitement au benzène où la destruction des agrégats est maximum. Notre objet d'étude n'est pas le même et ce test paraît ici le mieux adapté pour mettre en évidence les forces de stabilisation les plus importantes provenant de la matière organique.

Nous notons, à partir de l'examen des trois graphiques «AGB», quatre grandes phases qui se distinguent très nettement :

- une première phase, où l'on observe une stabilisation de la structure rapide mais éphémère (entre le temps 0 et une quinzaine de jours d'incubation) ;
- une deuxième phase, où l'on note une déstabilisation rapide (entre le quinzième jour et environ un mois d'incubation) ;
- une troisième phase à faible variation (entre un mois et six mois d'incubation) ;
- une quatrième phase d'amélioration secondaire de la stabilité (entre six mois et neuf mois d'incubation).

SIDI (1987) avait également noté la présence de ces quatre phases sur les courbes d'agrégats sans prétraitement dont l'allure est toujours intermédiaire entre les deux autres séries conformément aux résultats de l'analyse en composantes principales.

2. Action du gypse

Sur la figure 4, la comparaison des graphiques «SA» et «SG» montre que l'apport de gypse a surtout un effet sur la stabilisation de la structure des échantillons enrichis en matière organique.

Le phénomène est observé tant en début qu'en fin d'incubation. Il s'avère cependant particulièrement important en début d'incubation où les taux d'agrégats stables après prétraitement au benzène ont presque triplé. Nous pouvons pourtant regretter le nombre de mesures trop limité de nos expériences en début d'incubation, pour repérer précisément la position exacte d'un maximum très localisé.

Une des causes de cette stabilisation pourrait provenir des liaisons calcium-polysaccharides en début d'incubation puis calcium-polymères humifiés en fin d'incubation (BARTOLI *et al.*, 1988).

On peut aussi penser à un effet indirect du gypse qui favoriserait l'activité microbienne et donc une agrégation soit directement liée à la microflore soit aux substances qu'elle libère : polysaccharides puis matières humifiées. Cette hypothèse concorde bien avec les différences importantes entre cinétiques d'humification et de minéralisation des deux expériences SA et SG (PANSU et SIDI, 1987).

D) STABILITÉ STRUCTURALE ET FRACTIONS ORGANIQUES

Les analyses en composantes principales ont permis d'identifier les fractions humiques susceptibles d'exercer une influence sur l'agrégation. Elles peuvent se classer en deux groupes:

- matières peu humifiées : matières organiques légères (MOL), acides fulviques libres (AFL) et polysaccharides (PLS). L'évolution des matières organiques légères a pu être modélisée en fonction du temps (PANSU et SIDI, 1987) et, comme dans le cas des acides fulviques libres, elle ne semble guère en relation avec celle de l'agrégation (SIDI, 1987). Nous n'examinerons donc ici que l'évolution des polysaccharides;

- matières humifiées: nous ne prendrons en considération que les acides fulviques et humiques extraits au pyrophosphate (AFP et AHP).

1. Influence des polysaccharides

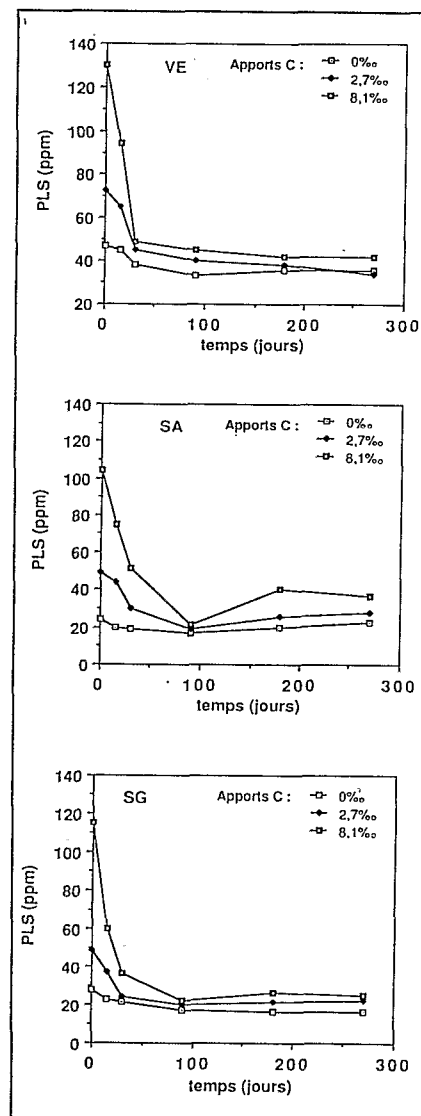
La comparaison de l'évolution des polysaccharides (Fig. 5) et des taux d'agrégats stables après prétraitement au benzène (Fig. 4) montre un certain décalage entre les deux processus. Les teneurs maximum de polysaccharides sont observées au temps 0 (début d'incubation), alors que le maximum d'agrégats stables est noté à une quinzaine de jours d'incubation.

Il faut cependant rappeler que la méthode de détermination utilisée (GUCKERT, 1973) fournit la totalité des hexoses libérés par l'hydrolyse sulfurique. Elle ne différencie pas les polysaccharides d'origine végétale ou microbienne (CHESHIRE et ANDERSON, 1975; CHESHIRE, 1979).

Dans ces conditions, la plus grande partie des polysaccharides disparaît au cours des première et deuxième phases de renforcement de la stabilité pour se stabiliser ensuite à une valeur quasi constante dépendant du type de sol et peu dépendante du volume de l'amendement organique.

Fig.5 : Evolutions comparatives, en fonction du temps et pour chaque apport de paille, des polysaccharides (en ppm du sol sec) pour chacune des expériences VE, SA, SG.

Comparative evolutions with time and for each straw amendment, of polysaccharide contents (ppm of dry soil) for each of the three experiments.



Les polysaccharides constituent le stock énergétique nécessaire à l'activité microbienne, laquelle produit des substances stabilisantes (mucus bactériens, filaments mycéliens), renforçant ainsi la résistance des agrégats à l'action de l'eau (CHENU, 1985).

On remarque également l'effet du gypse sur le comportement des polysaccharides avec une pente des courbes de décroissance plus forte en début d'incubation pour l'expérience «SG» que pour «SA». Nous avons là une confirmation de l'effet du gypse, signalé ci-dessus, concernant l'accélération des processus d'humification et de minéralisation.

Cependant, dans le sol vertique sans apport de gypse, la décroissance des polysaccharides est aussi rapide que dans le sol salé avec apport de gypse.

2. Influence des "acides fulviques pyrophosphate" (AFP)

Le comportement de ces matières humiques peu polycondensées varie selon les trois expériences (Fig. 6).

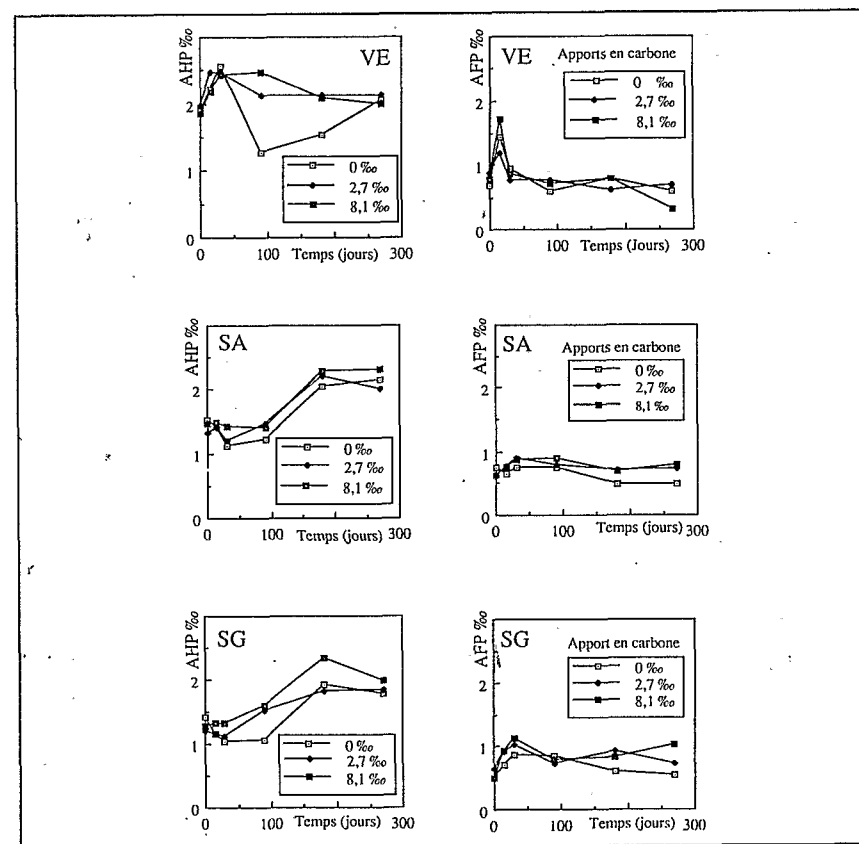


Fig.6 : Evolutions comparatives, en fonction du temps et pour chaque apport de paille, des acides humiques (AHP) et fulviques (AFP) extraits au pyrophosphate de sodium pour chacune des expériences VE, SA, SG.

Comparative evolutions with time and for each straw amendment, of humic (AHP) and fulvic (AFP) acids extracted with sodium pyrophosphate for each of the three experiments.

Dans le sol salé (SA), nous assistons à une faible augmentation de leur concentration au cours du premier mois d'incubation en même temps que décroissent les taux respectifs de polysaccharides. Leur niveau se stabilise ensuite pour décroître faiblement vers le sixième mois d'incubation en même temps qu'augmentent les «acides humiques pyrophosphate». Pour ce sol salé, on n'observe pas de corrélation entre les taux d'agrégats stables et les teneurs de cette fraction, quelle que soit la durée de l'incubation.

Le cas du sol vertique est très différent. Au cours du premier mois d'incubation, on observe une corrélation positive significative entre les taux d'«agrégats benzène» et d'«acides fulviques pyrophosphate». Cette observation avait déjà été notée sur l'axe 2 des analyses en composantes principales où ces acides se trouvaient, avec les polysaccharides et les «agrégats benzène», opposés aux produits humiques plus évolués.

3. Influence des "acides humiques pyrophosphate" (AHP),

L'évolution de ces matières humiques plus polymérisées est également variable selon les expériences (Fig. 6).

Dans le sol salé carbonaté (SA), on note peu de variations avec des valeurs peu dépendantes de l'apport organique jusqu'à trois mois d'incubation puis une augmentation significative vers une valeur qui semble se stabiliser après le sixième mois. En présence de gypse, cette formation d'acides humiques est accélérée et débute peu après un mois d'incubation.

Dans tous les cas, on observe une augmentation simultanée des taux d'«agrégats alcool» puis, plus tardivement, des taux d'«agrégats benzène».

Dans le sol vertique, on assiste à une légère mais rapide augmentation des taux de ces acides humiques au cours du premier mois d'incubation puis à une stabilisation, voire une décroissance ensuite avec une anomalie inexpliquée pour le témoin.

Le même phénomène est observé, dans ce sol, pour les agrégats alcool et les agrégats benzène qui sont également stables après un mois d'incubation, excepté une légère augmentation pour l'apport organique le plus important.

Parmi les diverses fractions organiques mesurées, les «acides humiques pyrophosphate» paraissent les plus liés à l'amélioration secondaire de la stabilité structurale en fin d'incubation.

E) STABILITÉ STRUCTURALE ET CINÉTIQUE D'ÉVOLUTION DES COMPARTIMENTS ORGANIQUES

Les trois compartiments du modèle de la figure 1 représentent des ensembles organiques caractérisés par leur vitesse de décroissance (PANSU, 1989).

- Un compartiment végétal V servant d'aliment aux microorganismes. Son contenu en carbone décroît selon une cinétique hyperbolique (VE et SG) ou exponentielle (SA) à la fois par minéralisation et par répartition dans les deux autres compartiments. Nous avons estimé sa demi-vie respectivement à 7, 11 et 6 semaines pour les expériences VE, SA et SG (PANSU et SIDI, 1987). Il n'exerce pas d'influence directe sur la stabilité structurale.

- Un compartiment labile A dont le contenu carboné se trouve très rapidement renforcé en début d'incubation, en partie par solubilisation de carbone d'origine végétale mais surtout sous l'effet de la croissance des populations de microorganismes alimentées par les matières biodégradables de l'apport. Ce compartiment contient la plupart des substances bien connues pour leur effet sur la stabilisation des macro-agrégats: polysaccharides, filaments mycéliens, mucus bactériens. Sa demi-vie avait été trouvée moins importante que celle du

compartiment végétal (2,5 semaines pour VE, 2,2 pour SA et 1,5 pour SG), c'est à dire qu'il est capable de s'auto-consommer, avec un processus de renouvellement, avant que ne soient totalement décomposées les fractions résistantes des végétaux. Les taux de carbone de ce compartiment, à la fois microbiologique et chimique, sont estimés par simulation numérique.

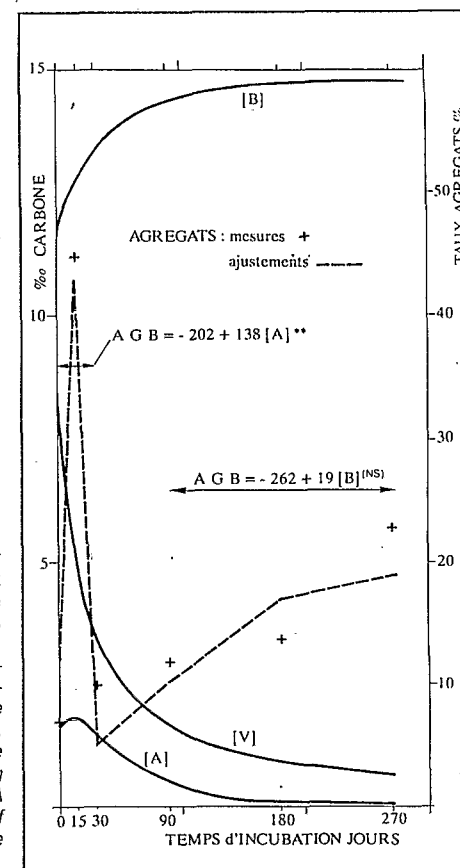
- Un compartiment stable B formé des matières organiques humifiées dont la demi-vie approximative a été estimée respectivement à 46, 90 et 9 ans pour les trois expériences VE, SA et SG. Son contenu carboné augmente lentement au cours de l'expérience pour se rapprocher de celui du carbone total en fin d'incubation. Si cette augmentation ressemble à celle des acides humiques, on ne peut pourtant pas assimiler cette fraction et ce compartiment. Ce dernier englobe sans doute en même temps certaines formes de l'humine. Les taux de carbone sont donc ici aussi probablement mieux estimés par simulation numérique que par fractionnement chimique. La croissance de ce compartiment pourrait être corrélée avec une stabilisation faible mais plus durable de la structure des sols.

Dans le cas du sol vertique, les simulations ont montré (Fig. 7) que le contenu du compartiment A passe par un maximum vers les 15 jours d'incubation. Ce maximum correspond à celui souvent observé de la biomasse microbienne en début d'incubation (JENKINSON et LADD, 1981; VAN VEEN et PAUL, 1981). Notons ici qu'il correspond également à celui des «acides fulviques pyrophosphate (AFP)».

Remarquons surtout qu'il correspond à celui des taux d'«agrégats benzène (AGB)». Sur la figure 7, nous avons indiqué les valeurs calculées des taux d'agrégats selon deux régressions linéaires en fonction : des valeurs simulées pour le compartiment A le premier mois d'incubation, des valeurs simulées pour le compartiment B en fin d'incubation. Le deuxième ajustement n'est pas significatif mais il serait instructif de poursuivre l'expérience sur des durées plus longues.

Fig. 7 : Simulations de l'évolution simultanée des trois compartiments du modèle pour l'expérience VE : V = matières végétales, A = matières organiques labiles, B = matières humifiées stables. Valeurs expérimentales des taux d'agrégats avec prétraitements au benzène (AGB) et valeurs calculées correspondantes par ajustements sur le compartiment A durant le premier mois d'incubation, sur le compartiment B à partir de trois mois d'incubation.

Simulated evolution of the three compartments of the model for VE experiment : V = plant materials, A = labile organic matter, B = stable humified matter. Measured values of stable benzene aggregates (AGB) and corresponding calculated values by adjustments on A compartment during the first month of incubation, on B compartment during the last six months.



Ces modèles semblent donc constituer une voie intéressante pour l'analyse comparée des caractéristiques organiques des sols et de leur stabilité structurale.

Par exemple, pour le sol à tendance vertique, la simulation d'apports organiques même faibles mais à pas de temps de quinze jours conduirait à une accumulation du compartiment A et donc à une forte augmentation des taux d'agrégats. Par contre, un apport annuel même très important ne procurerait pas une telle stabilisation de la structure. L'amélioration ne serait pas cumulative mais concernerait uniquement la quatrième phase de l'agrégation peut-être en corrélation avec la croissance lente du compartiment B. Ces hypothèses concordent avec les conclusions de la classification ascendante hiérarchique.

Nous n'étendons pas cette interprétation aux résultats des deux autres expériences. Dans ce cas, le maximum relatif au compartiment A semble se situer au temps 0 (PANSU et SIDI, 1987). Nous ne possédons pas assez de points de mesures en début d'incubation pour ajuster plus précisément le modèle. Il en est de même pour la position exacte du maximum mesuré pour les taux d'agrégats. Notons cependant que dans ces expériences, nous n'observons pas le maximum obtenu pour les «acides fulviques pyrophosphate (AFP)» dans l'expérience VE.

Ces observations doivent être validées par des expériences complémentaires de plus longue durée et avec plus de mesures en début d'incubation.

CONCLUSION

La classification ascendante hiérarchique permet de distinguer l'effet des traitements et l'influence du temps d'incubation.

Un apport organique, quelle qu'en soit la dose, modifiera nettement les propriétés du sol vertique avec une stabilisation de la structure dans les quinze premiers jours d'incubation puis une diminution de stabilité sans évolution ultérieure significative. Pour améliorer la stabilité structurale de ce sol, il faudrait, si cela s'avérait techniquement possible, lui apporter des amendements organiques même faibles mais fréquents.

L'influence de l'amendement organique est beaucoup moins nette et rapide dans le cas du sol salé carbonaté. L'apport organique n'agit qu'après de longues périodes d'incubation et plus cet apport est important, plus il faudra attendre pour déceler une amélioration significative des propriétés du sol.

L'apport de gypse modifie grandement ce phénomène. Les forts apports organiques améliorent alors plus nettement la stabilité de la structure du sol. Ce n'est apparemment pas l'apport de gypse en lui-même qui modifie significativement cette propriété physique mais l'interaction gypse-apport organique. Nous pensons que cet effet du gypse est lié à une augmentation de l'activité des microorganismes et des vitesses d'humification et de minéralisation, peut-être sous l'influence des liaisons calcium-matières organiques.

Pour améliorer la stabilité structurale du sol salé carbonaté, un apport de gypse couplé avec un fort apport de paille semblerait approprié. Il convient cependant, comme pour le sol à tendance vertique, de confirmer ces résultats par des expériences de terrain.

Les tests physiques sur la stabilité des agrégats fournissent les variables les plus discriminantes parmi les différentes mesures étudiées et on n'enregistre pas de corrélation très significative entre les résultats de ces tests et les dosages des fractions organiques.

Les taux de polysaccharides (PLS) décroissent beaucoup plus rapidement que la totalité des pailles enfouies pour se stabiliser après un mois d'incubation à un niveau semblant

dépendre principalement du type de sol. Des «acides fulviques pyrophosphate (AFP)» sont également synthétisés durant cette première période. Ces acides contiennent des précurseurs de l'humification et leur teneur décroît faiblement tandis qu'augmentent les «acides humiques pyrophosphate (AHP)» après trois mois d'incubation. Ces derniers apparaissent alors comme les plus liés à la stabilité de l'agrégation en fin d'incubation. L'évolution de ces trois fractions organiques est accélérée par l'apport de gypse dans le sol salé carbonaté.

Un modèle à trois compartiments, descriptif de la cinétique d'humification et de minéralisation des mélanges sols-résidus végétaux, permet d'analyser l'évolution de la stabilité structurale des sols sous l'effet d'amendements organiques. Dans le cas du sol vertique, ce modèle nous conduit aux mêmes conclusions que les fractionnements chimiques et la classification ascendante hiérarchique. Il traduit un processus que les seuls fractionnements chimiques ne peuvent pas montrer :

- croissance rapide, avec la consommation des résidus végétaux les plus biodégradables, d'un compartiment labile formé à la fois de microorganismes et de composés chimiques de faible durée de vie ;

- amélioration corrélative de la stabilité structurale sous l'effet de diverses substances de ce compartiment connues pour leur rôle de protection des agrégats : polysaccharides, mucus bactériens, filaments mycéliens ;

- décroissance du compartiment labile liée à une déstabilisation de la structure ;

- nouvelle stabilisation moins forte des agrégats avec le développement lent d'un compartiment formé de matières humifiées de longue durée de vie.

Il reste à valider ces observations avec des expériences plus orientées vers la modélisation et comportant des analyses structurales plus approfondies que les tests pratiqués ici.

Reçu pour publication : Juin 1989
Accepté pour publication : Juillet 1990

REMERCIEMENTS

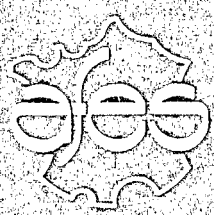
Nous remercions MM. B. DABIN et G. BELLIER qui sont à l'origine de l'expérimentation, Mmes E. GAVINELLI et M.J. POUGET pour la partie analytique, MM. R. CALVET (I.N.A.P.G.) et P. DE BOISSEZON (ORSTOM) pour leurs conseils et l'encadrement de ce travail.

BIBLIOGRAPHIE

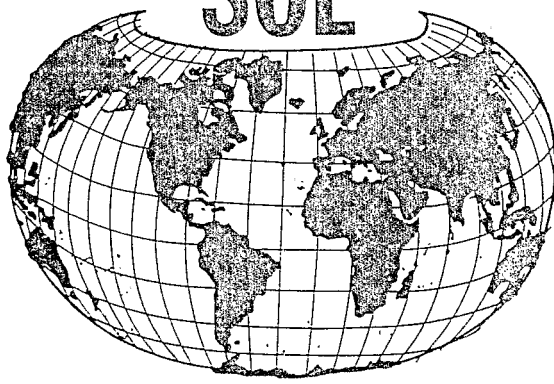
- BACHELIER G., 1966. — Les sucres dans les sols et leur dosage global. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, IV, 9-23.
- BARTOLI F., PHILIPPY R. & BURTING, 1988. — Aggregation in soils with small amounts of swelling clays. I. Aggregate stability, *J. Soil Sci.*, 39, 593-616.
- BOFFIN J., 1974. — *La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'effet des pluies*. Thèse Docteur Ingénieur, I.N.A. Paris-Grignon.
- CHANEY K. & SWIFT R.S., 1984. — The influence of organic matter on aggregate stability in some British soils. *J. Soil Sci.*, 35, 223-230.
- CHANEY K. & SWIFT R.S., 1986. — Studies on aggregate stability. I. Re-formation of soil aggregates. *J. Soil Sci.*, 37, 329-335.
- CHANEY K. & SWIFT R.S., 1986. — Studies on aggregate stability. II. The effect of humic substances on the stability of the re-formed soil aggregates. *J. Soil Sci.*, 37, 337-343.

- CHARTRES C.J., GREENE R.S., FORD G.W. & RENGASAMY P., 1985. - The effects of gypsum on macroporosity and crusting of two red duplex soils, *Aust. J. Soil Res.*, 23, 467-479.
- CHENU C. 1985. - *Étude expérimentale des interactions argiles-polysaccharides neutres. Contribution à la connaissance des phénomènes d'agrégation d'origine biologique dans les sols.* Thèse Doct. 3^e cycle, Univ. Paris VII.
- CHESHIRE M.V., 1979. - *Nature and origin of carbohydrates in soils.* Acad. Press London, 215 p.
- CHESHIRE M.V. & ANDERSON G., 1975. - Soil polysaccharides and carbohydrate phosphates. *Soil Sci.*, 119, 356-362.
- CHESHIRE M.V., SPARLIG G.P. & MUNDIE C.M., 1983. - Effect of periodate treatment of soil on carbohydrates constituents and soil aggregation. *J. Soil Sci.*, 34, 105-112.
- COMBEAU A., OLLAT C. & QUANTIN P., 1961. - Observations sur certaines caractéristiques des sols ferrallitiques. Relations entre les rendements et les résultats d'analyses des sols. *Fertilité* 13, 27-40.
- COMBEAU A. & QUANTIN P., 1964. - Observations sur les relations entre stabilité structurale et matière organique dans quelques sols d'Afrique Centrale. *Cah. ORSTOM sér. Pédol.* II, 3-11.
- DABIN B., 1976 - Méthode d'extraction et de fractionnement des matières humiques du sol. Application à quelques études pédologiques et agronomiques dans les sols tropicaux. *Cah. ORSTOM sér. Pédol.* 14, 287-297.
- DOMMERGUES Y. & MANGENOT F., 1970. - *Ecologie microbienne du sol.* Masson & C^e Paris, 796 p.
- DUCHAUFFOUR Ph., 1977. - *Pédogénèse et classification* T I. Masson Paris.
- EMERSON W.W. 1967. - A classification of soil aggregates based on their coherence in water. *Austr. J. of Soil Res.* 5, 47-57.
- GIOVANNINI G. & 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, *J. Soil Sci.*, 27, 147-157.
- GREENE R.S.B. & FORD G.W., 1985. - The effect of gypsum on cation exchange in two red duplex soils. *Austr. J. of Soil Res.* 23, 61-74.
- GUICKERT A., 1973 - *Contribution à l'étude des polysaccharides dans les sols et de leur rôle dans les mécanismes d'agrégation.* Thèse d'Etat, Univ. Nancy I.
- HAMBLIN A.P. & DAVIES D.B., 1977 - Influence of organic matter on the physical properties of some East Anglian soils of high silt content. *J. Soil Sci.* 28, 11-22.
- HAMBLIN A.P. & GREENLAND D.J., 1977 - Effect of organic constituents and complexed metal ions on aggregate stability of some East Anglian soils. *J. Soil Sci.* 28, 410-416.
- HENIN S., 1938. - *Etude physico-chimique de la stabilité structurale des terres.* Thèse d'Etat, Univ. Paris.
- HENIN S. & MONNIER G., 1956. - Evaluation de la stabilité de la structure du sol, *C.R. VI^e congrès AISS* - Paris vol. B, 49-52.
- JENKINSON D.S. & LADD J.N., 1981. - Microbial biomass in soil : measurement and turnover. In : *Soil Biochemistry*, Marcel Dekker, New-York, 5, 415-471.
- JAYAWARDANE N.S. & BLACKWELL J., 1985. - The effects of gypsum-enriched slots on moisture movement and aeration in an irrigated swelling clay, *Aust. J. Soil Res.* 23, 481-492.
- KEMPER W.D. ROSENAU R. & NELSON S., 1985. - Gas displacement and aggregate stability of soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49, 25-28.

- MASSART D.L. & KAUFMAN L., 1983 - Hierarchical clustering methods. In : *The interpretation of analytical chemical data by the use of cluster analysis*, J. Wiley & Sons, 75-99.
- MONNIER G. 1965. - Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols, Thèse Paris, *Ann. Agron.* 16, 327-400, 471-534.
- NOÏROT M., DEJARDIN J., MULLON C. & SAVY C., 1990 - Logiciel NDMS, ORSTOM, à paraître.
- OADES J.M., 1984. - Soil organic matter and structural stability : mechanisms and implications for management. *Plant and soil* 76, 319-337.
- PANSU M., 1988. - Proposition de modèles descriptifs de la dynamique des matières organiques des sols, C.R. journées de pédologie ORSTOM, sept. 1988, *Cah. ORSTOM sér. Pédol.* XXIV (4).
- PANSU M., 1989. - Cinétique chimique et modèles compartimentaux : application à l'étude de l'évolution du stock organique des sols. In : SEMINFOR 2 : La modélisation aspects pratiques et méthodologie, ORSTOM, sept. 1988, *ORSTOM coll. "colloques et séminaires"*.
- PANSU M. & SIDI H., 1987. - Cinétique d'humification et de minéralisation de mélanges sols-résidus végétaux. *Sci. du Sol* 25, 247-265.
- RUSSELL E.W., 1973. - *Soil conditions and plant growth.* Longman, London, 10th ed.
- SIDI H., 1987. - *Effet de l'apport de matière organique et de gypse sur la stabilité structurale de sols de région méditerranéenne (Mateur-Tunisie).* Thèse Doct. Ing., I.N.A. Paris Grignon.
- SO H.B., TAYLER D.W., YATES W.J. & Mc GARTY J.W., 1978. - Amélioration of structurally unstable grey and brown clays. In : *Modification of soil structure*, Emerson W.W. Ed., J. Wiley Chichester.
- STEVENSON F.J., 1982. - *Humus chemistry.* Wiley & Sons, 443 p.
- TURENNE J.F. & PLENECASSAGNE A., 1976. - Dynamique de la matière organique en sols cultivés. Effet d'une culture intercalaire de sorgho en vertisols irrigués. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.* XIV, 193.
- VAN VEEN J.A. & PAUL E.A. 1981. - Organic carbon dynamic in grassland soils. I Background information and computer simulation, *Can. J. Soil Sci.* 61, 185-201.
- WALLACE A., WALLACE G.A. & CHA J.W., 1986. - Mechanisms involved in soil conditioning by polymers. *Soil Sci.* 114, 381-386.



SCIENCE DU SOL



ORSTOM
Centre
Documentation
BONDY

TED-VOL 28-N° 3
JUILLET-AOÛT-SEPTEMBRE
1990

7 NOV. 1990
PB 191