

# MODIFICATIONS STRUCTURALES D'UN MATERIAU LIMONEUX SOU MIS A UN COMPACTAGE DYNAMIQUE

M. GRIMALDI <sup>(1)</sup>

## RESUME

*Les modifications de la structure d'un matériau limoneux sous l'action d'un compactage dynamique (Proctor) sont analysées par des mesures et des observations en microscopies optique et électronique à balayage, permettant d'appréhender simultanément les différents niveaux d'organisation du matériau. Celui-ci est constitué initialement d'agrégats de taille déterminée (2-5 mm).*

*Il est montré que le compactage se traduit, en fonction de la teneur en eau à laquelle il est effectué, par une diminution plus ou moins importante du volume poral interagrégats, voire par l'annulation de celui-ci. Par contre, le volume poral intraagrégats ne varie pas globalement. Cependant, les résultats obtenus en porosimétrie au mercure montrent que la distribution de la taille des pores intraagrégats est sensiblement modifiée. Cette modification résulte de la déformation des agrégats sous l'action de la contrainte mécanique. Elle concerne vraisemblablement la morphologie des pores de quelques micromètres de large, visibles en microscopie électronique à balayage, ménagés par l'assemblage des particules de limon enrobées d'argile.*

## INTRODUCTION

Cette étude a été réalisée en vue de mieux connaître les conséquences sur les sols des compactages d'origine culturale.

En conditions naturelles, les facteurs qui déterminent le comportement des sols au compactage sont multiples et difficilement maîtrisables simultanément : intensité et mode d'application de la contrainte, constitution et état physique du matériau au moment où la contrainte est appliquée. Les techniques de compactage en laboratoire éliminent de nombreux aléas et permettent de contrôler les facteurs principaux. La modélisation obtenue est cependant trop éloignée de la réalité pour que le comportement au compactage des sols in situ puisse être directement expliqué à partir des seuls résultats acquis en laboratoire (GUERIF, 1982). Mais les caractéristiques des sols, comme celles contraintes, à prendre en compte dans des expérimentations de terrain peuvent être mieux définies et les mécanismes mis en jeu mieux connus.

La plupart des travaux réalisés en laboratoire se rapportent au comportement mécanique des matériaux. FAURE (1978) met ainsi en évidence l'existence, pour tout matériau, de deux limites hydriques de comportement mécanique, relatives à l'énergie (ou la pression) mise en jeu et à la constitution du matériau : un seuil hydrique de sensibilité au compactage et une teneur en eau pour laquelle le matériau atteint un maximum de compacité, correspondant respectivement aux limites de plasticité et de liquidité du matériau (définies à un même niveau d'énergie). Dans ces travaux,

(1) ORSTOM - BP 165 - 97323 Cayenne Cedex, (Guyane Française).

l'effet d'un compactage est apprécié par la variation de la compacité (ou de la porosité totale) en fonction de la teneur en eau du matériau au moment du compactage.

Or, c'est la localisation et la nature des pores concernés par la diminution de porosité qui déterminent les conséquences du compactage sur les propriétés du sol (aération, transferts et rétention d'eau, résistance à la croissance des racines) et donc sur les cultures.

Aussi cet article sera-t-il consacré à la caractérisation détaillée des effets d'un compactage, réalisé à deux humidités différentes, sur la structure et l'espace poral d'un matériau limoneux, choisi en raison de sa sensibilité au tassement. Nous montrerons la complémentarité des observations et mesures effectuées à différentes échelles (microscopies optique et électronique à balayage, analyse de systèmes de porosité et du spectre de porosité par la porosimétrie au mercure).

Dans un second article, nous aborderons le problème de la réversibilité des modifications structurales provoquées par le compactage, sous l'action de variations hydriques. On étudiera par là-même l'influence de la structure du matériau sur ses propriétés de rétention d'eau, de retrait et de gonflement.

## I. MATERIAU ET METHODES

### A) Choix du matériau

Le matériau provient d'une parcelle expérimentale du Centre INRA du Rheu (proximité de Rennes) sur les rotations céréalières intensives. L'observation de nombreux profils culturaux sur cette parcelle a mis en évidence la gravité de certains tassements occasionnés par des interventions de matériels en conditions trop humides (PLET et TANGUY, 1975).

Le matériau a été prélevé à une profondeur comprise entre 60 et 80 cm, dans l'horizon d'accumulation d'argile d'un sol brun faiblement lessivé, développé sur un matériau limoneux. Nous avons en effet préféré choisir un matériau n'ayant a priori pas subi de tassements liés à l'exploitation agricole.

Ce matériau a une texture de limon argileux (tableau I); sa teneur en argile (20,5 %) est légèrement supérieure à celle de l'horizon cultivé (16 %). Les constituants argileux sont essentiellement des illites et des chlorites. La teneur en matière organique est seulement de 0,6 %, au lieu de 1,5 à 2 % dans l'horizon cultivé. Etant donné le rôle protecteur de la matière organique vis-à-vis du compactage (GUERIF et FAURE, 1979), on se situe donc dans des conditions plus défavorables que celles de l'horizon cultivé étudié précédemment (GRIMALDI, 1977). Le taux de matière organique a toutefois tendance à diminuer avec la régression des prairies dans les assolements, ceci étant sans doute une cause importante de la dégradation de l'état structural des sols par tassement.

**Tableau I : Quelques caractéristiques physiques et physico-chimiques du matériau.**  
*Some physical and physico-chemical properties of the soil.*

Granulométrie (%)						pH eau	C.E.C. (meq/100 g)
Argile 0-2 µm	Limons 2-20 µm    20-50 µm		Sables 50-200 µm    200-2000 µm		M.O.		
20,5	24,1	47,1	5,1	2,6	0,6	7,2	8,1

### 3) Choix d'une technique de compactage en laboratoire

Les compactages ont été effectués avec le test Proctor, technique simple à mettre en œuvre, qui assure une bonne reproductibilité des résultats et pour laquelle on dispose de nombreuses références, en particulier avec les travaux de FAURE (1978).

Rapportée au volume du moule de compactage ( $V = 300 \text{ cm}^3$ ), l'énergie appliquée au matériau,  $E_c$ , est égale à  $590 \text{ kJ/cm}^3$  (le matériau est compacté en trois couches successives par une dame de compactage de masse 1 kg tombant 30 fois d'une hauteur de 20 cm). La valeur de  $E_c$  n'est donnée qu'à titre indicatif, car on ne peut considérer l'intensité de la contrainte indépendamment de ses conditions d'application très particulières, notamment son temps d'application, ou encore la rigidité du moule de dimensions réduites, qui empêche les déformations latérales du matériau.

### C) Préparation du matériau -

#### Choix de deux teneurs en eau particulières

Avant le compactage, le matériau est constitué d'agrégats de taille déterminée, comprise entre 2 et 5 mm. Ces agrégats sont obtenus par fragmentation et tamisage ménagés des éléments structuraux prélevés sur le terrain et maintenus à la teneur en eau du prélèvement (de l'ordre de 16 % massique). Des échantillons d'agrégats sont ensuite amenés à diverses teneurs en eau, soit pas dessèchement à l'air ( $W < 16\%$ ), soit par nébulisation ( $W > 16\%$ ). Le compactage est effectué après un délai d'une semaine au moins pour permettre l'homogénéisation de la teneur en eau dans chaque échantillon.

Deux teneurs en eau particulières, notées  $W_1$  et  $W_2$ , ont été choisies à partir de la courbe Proctor (figure 1) pour étudier les modifications structurales provoquées par le compactage.  $W_1$  ( $\approx 12\%$ ) est intermédiaire entre le seuil hydrique de sensibilité  $W_C$  et la teneur en eau du maximum de compacité  $W_M$ ,  $W_2$  ( $\approx 17\%$ ) est approximativement égale à  $W_M$ .

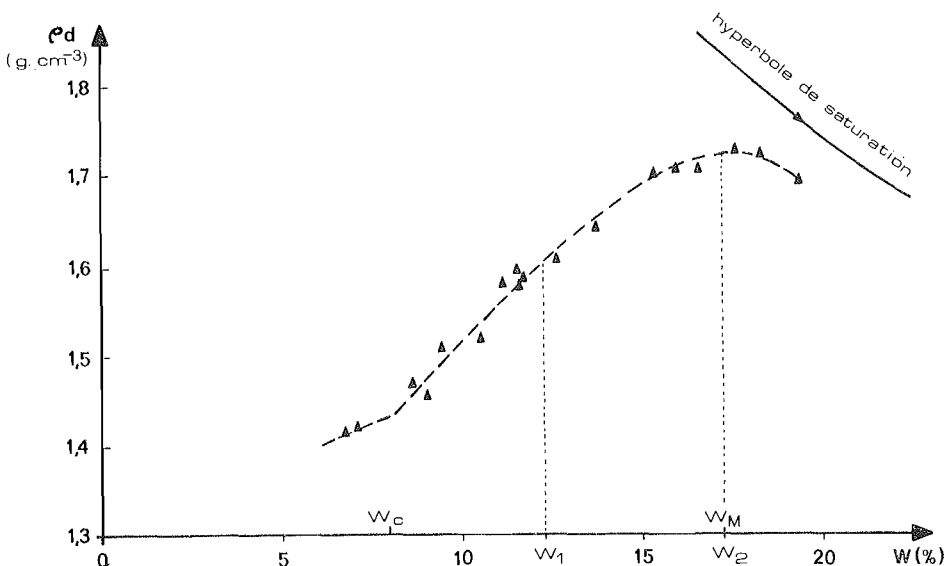


Figure 1 : Courbe Proctor du matériau limoneux : variation de la masse volumique sèche du matériau — après le compactage — en fonction de la teneur en eau au moment du compactage.

*Proctor curve of the selected silty material : bulk density after compaction as a function of water content at the time of compaction.*

## D) Prélèvement de mottes dans les échantillons Proctor

Les mesures et observations envisagées pour analyser les effets du compactage étant destructives, il était nécessaire de disposer d'un nombre important d'échantillons (une centaine environ) ayant subi, dans les mêmes conditions, la même contrainte mécanique et, par la suite, des alternances de dessiccation-humectation.

Des mottes ont donc été prélevées dans les échantillons Proctor compactés à  $W_1$  et à  $W_2$  (figure 2) : une tranche de 1 cm d'épaisseur est découpée au centre de chaque couche, puis divisée en quatre quarts dont la partie périphérique est arasée sur quelques millimètres. On a pris soin en particulier de compacter le matériau en trois couches d'égale épaisseur pour diminuer l'hétérogénéité entre les mottes.

Ces mottes — appelées par la suite « **Motte compactée à  $W_1$**  » et « **Motte compactée à  $W_2$**  » — ont des dimensions suffisamment grandes par rapport à celles des agrégats pour que les modifications structurales provoquées par le compactage puissent être analysées à deux niveaux d'organisation du matériau :

- celui des agrégats,
- celui des constituants élémentaires au sein des agrégats.

Ces deux niveaux d'organisation sont accessibles par l'observation, respectivement en microscopie optique et en microscopie électronique à balayage.

Ils définissent en outre deux « systèmes de porosité » (MONNIER et al., 1973 ; STENGEL, 1979) : interagrégats et intraagrégats — respectivement appelés, par ces auteurs, structurale et texturale — dont nous avons étudié l'évolution sous l'action du compactage à  $W_1$  et à  $W_2$ . L'espace poral intraagrégats a ensuite été caractérisé de manière moins globale (distribution de la porosité en fonction de la taille des pores) à l'aide de la porosimétrie au mercure.

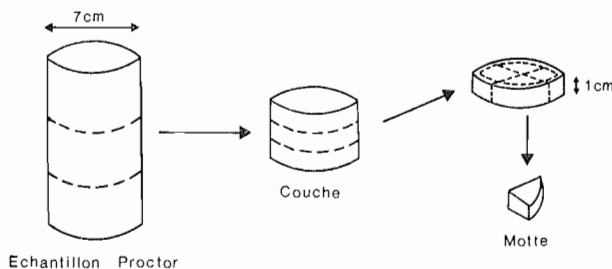


Figure 2 : Prélèvement des mottes dans les échantillons Proctor.

*Clod sampling procedure.*

## E) Techniques de mesures et d'observations

### 1. Mesures de masse volumique

Les mesures de masse volumique sèche de mottes et d'agrégats, nécessaires à l'analyse des porosités inter et intraagrégats, ont été effectuées par la technique au pétrole (MONNIER et al., 1973).

Après le compactage, la coalescence des agrégats pose un problème particulier. Les mesures ont donc été effectuées sur des « agglomérats » de taille comprise entre 2 et 3 mm obtenus en fragmentant les mottes et en tamisant. En procédant ainsi, on considère que les plans de rupture des mottes correspondent aux discontinuités les plus macroscopiques, c'est-à-dire aux pores interagrégats s'ils n'ont pas disparu sous l'action du compactage ; la taille maximale des agglomérats (3 mm) a été choisie inférieure à celle des agrégats (5 mm) pour que la porosité interagrégats soit plus sûrement négligeable dans les agglomérats.

Les résultats sont exprimés en volume massique de vides ( $v_v$  en  $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$ ) appelé plus brièvement **volume poral**.

$$v_v = \frac{1}{\rho_d} - \frac{1}{\rho_s}$$

dù  $\rho_d$  et  $\rho_s$  désignent respectivement la masse volumique sèche et la masse volumique de solide (déterminée au pycnomètre à eau  $\rho_s = 2,67 \text{ g cm}^{-3}$ ).

Le volume des vides est ainsi rapporté à l'unité de masse de l'échantillon séché à l'étuve à  $105^\circ\text{C}$ , grandeur indépendante du volume des vides et donc identique pour tous les échantillons étudiés et niveaux d'organisation considérés.

## 2. Porosimétrie au mercure

A cause de son caractère non mouillant, le mercure ne pénètre dans un échantillon poreux que sous pression. Chaque pression ( $P$ ) peut être reliée à une taille de pore équivalente ( $r_{eq}$ ), par la loi de JURIN, si l'on assimile l'espace poral à un ensemble de capillaires de forme simple et régulière, par exemple cylindrique ou planaire.

$$P = \frac{2 \gamma \cos\theta}{r_{eq}}$$

dù  $\gamma$  : tension superficielle du mercure dans le vide

$\theta$  : angle de contact du mercure sur les constituants solides

$r_{eq}$  : rayon de capillaire cylindrique ou distance entre deux plans parallèles avec  $\gamma = 0,481 \text{ N m}^{-1}$  et  $\theta = 141^\circ$  [LAWRENCE, 1978]

$$P = \frac{7\,500}{r_{eq}} \text{ avec } r_{eq} \text{ en nm et } P \text{ en bars}$$

Lorsque des pores sont reliés entre eux par des étranglements (par exemple, les pores ménagés par un assemblage serré de constituants plus ou moins sphériques), le mercure n'accède à ces pores qu'à partir d'une pression qui dépend de la taille des étranglements. On détermine donc plutôt une distribution du volume poral en fonction de la taille équivalente des seuils des pores [VACHIER et al., 1979; DELAGE, 1979].

L'échantillon doit être au préalable déshydraté et dégazé. La déshydratation reste une opération délicate. Elle doit en effet être effectuée de manière à modifier le moins possible la structure de l'échantillon, afin de la caractériser dans un état hydrique bien déterminé. Dans ce travail, les échantillons (fragments de mottes de  $1 \text{ cm}^3$  ou environ  $1 \text{ g}$  d'agrégats) ont été déshydratés par lyophilisation (congélation dans du fréon refroidi par l'azote liquide).

D'après les travaux de LAWRENCE et al. (1979), et de MURRAY et QUIRK (1980), la lyophilisation provoque des artefacts, liés à une migration de l'eau, au cours de la congélation, des pores les plus fins vers les plus grossiers où elle se solidifie, cela se traduisant notamment par un développement de pores de l'ordre du  $\mu\text{m}$ .

Ce point, qui demeure controversé à la lecture d'autres travaux (TESSIER et BERRIER, 1978; TESSIER, 1984), semble dépendre notamment de la constitution des matériaux.

Nous avons utilisé un porosimètre CARLO-ERBA 65 A avec des modalités particulières d'emploi décrites par VACHIER et al. (1979), et CAMBIER et PROST (1981). La pression appliquée au mercure varie de 0,07 à 1000 bars, ce qui permet de prendre en compte des pores de taille équivalente comprise entre  $100 \mu\text{m}$  et  $7,5 \text{ nm}$ .

Une seule caractérisation a pu être effectuée sur chaque type de motte, deux pour les agrégats non compactés à  $W_1$  et à  $W_2$ . La reproductibilité des résultats est ainsi apparue satisfaisante et comparable à celle obtenue par LAWRENCE et al. (1979) sur des matériaux plus argileux.

### 3. Microscopie optique

Deux lames minces au moins ont été réalisées sur chaque type de mottes : l'une perpendiculaire, l'autre parallèle à l'axe de chute de la dame de compactage. Les mottes ont été au préalable déshydratées par lyophilisation. Nous n'avons pas observé au microscope optique la fissuration des échantillons qui caractérise une congélation trop lente (JONGERIUS et HEINTZBERGER, 1975), ce qui ne prouve pas cependant l'absence totale d'artefact.

### 4. Microscopie électronique à balayage

Les observations ont été effectuées avec un appareil Jeol JSM5 équipé du dispositif « Cryoscan » (TESSIER et BERRIER, 1979) : l'échantillon est congelé dans du fréon refroidi par l'azote liquide, puis fracturé dans le sas du microscope à l'aide d'un scalpel. La surface ainsi obtenue ne correspond pas nécessairement aux discontinuités les plus macroscopiques et recoupe en conséquence tous les niveaux d'organisation du matériau. Cette surface de l'échantillon est métallisée après sublimation de la glace.

## II. MODIFICATION DE L'ASSEMBLAGE DES AGREGATS

### A) Analyse des systèmes de porosité (figure 3)

a) Le volume poral intraagrégats n'est pas significativement différent avant et après le compactage ( $v_{v,ac} = v_{v,a}$ ) à  $W_1$  comme à  $W_2$ .  $W_2$  étant la teneur en eau du maximum de compacité, on peut en déduire que la contrainte mécanique appliquée au matériau n'a pu diminuer le volume poral intraagrégats du matériau, quelle que soit sa teneur en eau.

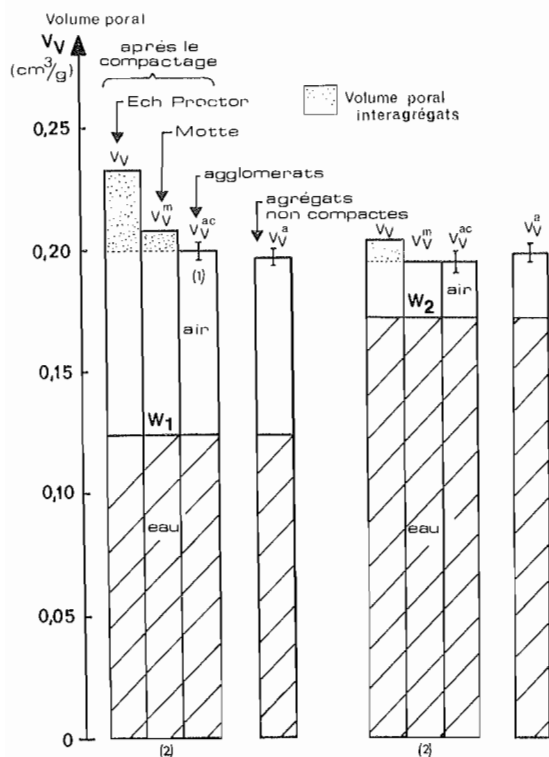


Figure 3 : Aux deux teneurs en eau au moment du compactage ( $W_1$  et  $W_2$ ), volume poral ( $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$ ) :

— dans les agrégats non compactés ( $v_{v,a}$ );

— dans les échantillons Proctor ( $v_v$ ), dans les mottes ( $v_{v,m}$ ) et dans les agglomérats issus de ces mottes ( $v_{v,ac}$ ).

(1) Moyenne de trois mesures au moins et intervalle de confiance avec un risque de 1 %.

(2) Moyenne de deux mesures.

Pore volume  $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$ , for the two selected water contents,  $W_1$  and  $W_2$  (see Fig. 1) :

— in the non compacted aggregates (2.5 mm diameter ;  $v_{v,a}$ );

— in the Proctor sample ( $v_v$ ), in the clods ( $v_{v,m}$ ) and in the agglomerates (2.3 mm diameter ;  $v_{v,ac}$ ) taken from these clods.

b) Seul le volume poral interagrégats diminue :

— Le volume poral interagrégats ( $v_v^m - v_v^{ac}$ ) de la motte compactée à  $W_1$  n'est plus que de l'ordre de  $0,01 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$ , soit une porosité interagrégats de 1,5 % au lieu de 45 % avant le compactage.

— Après le compactage à  $W_2$ , la motte et les agrégats ont le même volume poral ( $v_v^m = v_v^{ac}$ ). Le tassement se définit ainsi par la disparition du volume poral interagrégats.

c) L'échantillon Proctor apparaît plus homogène à  $W_2$  qu'à  $W_1$ , si l'on considère la différence  $v_v - v_v^m$ , inférieure à  $0,01 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$  à  $W_2$  et près de  $0,03 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$  à  $W_1$ , soit une différence de porosité totale entre l'échantillon Proctor et la motte qui en est issue de 1,7 % à  $W_2$  et 5,6 % à  $W_1$ .

Ce dernier résultat, vérifié par d'autres essais (GRIMALDI, 1977, 1981) montre que lorsque la teneur en eau augmente, l'efficacité du compactage se traduit par une diminution de la variabilité spatiale de la porosité. Ainsi, le matériau est d'autant plus homogène en compacité qu'il est plus tassé.

## B) Apport des observations en microscopie optique

Les observations microscopiques mettent en évidence une évolution très nette de la structure du matériau sous l'action du compactage, conforme à la forte diminution (à  $W_1$ ) ou à la disparition (à  $W_2$ ) du volume poral interagrégats.

— Après le compactage à  $W_1$  (photo 1), les agrégats ne sont plus que partiellement individualisés ; leur assemblage ménage des pores interagrégats de forme irrégulière, parfois polyconcave, isolés dans le plan de la lame mince et dont la taille est le plus souvent comprise entre  $300 \mu\text{m}$  et  $1 \text{ mm}$ .

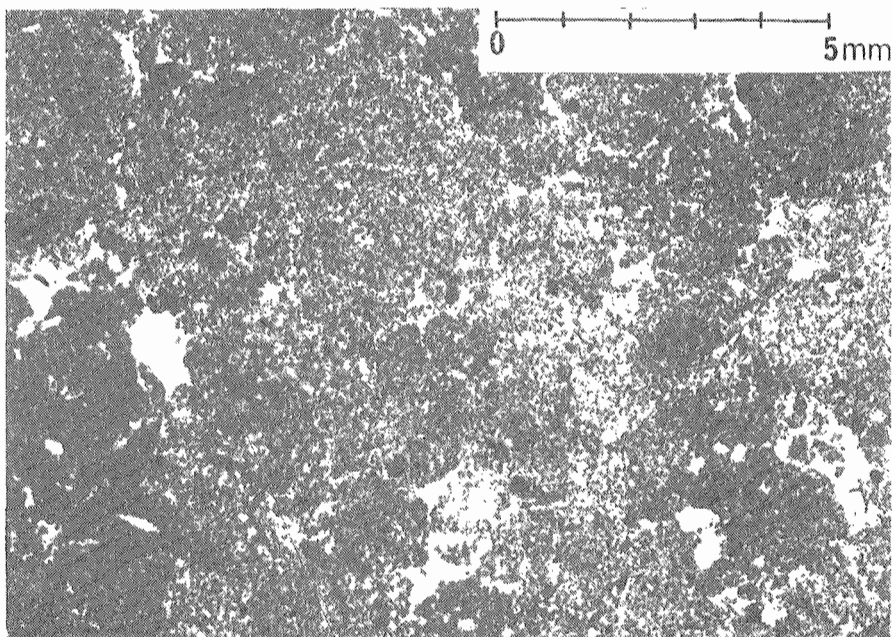


Photo 1 : Motte compactée à  $W_1$  (lame « horizontale » : perpendiculaire à l'axe de chute de la dame de compactage). Les pores visibles — compte tenu du grossissement et de l'épaisseur de la lame mince — apparaissent en blanc.  
*Silty material compacted at  $W_1$  (« horizontal » thin section : perpendicular to the direction of compaction). Voids visible considering magnitude and thickness of the thin section appear white.*

— Après le compactage à  $W_2$  (photo 2), la coalescence des agrégats est presque totale. On observe encore localement quelques pores interagrégats de forme souvent allongée et dont les dimensions sont au plus de quelques centaines de  $\mu\text{m}$ . Dans la partie supérieure de la motte, il apparaît également des pores à morphologie de fissures dont l'orientation est grossièrement perpendiculaire à la direction d'application de la contrainte mécanique. Ces pores ont une épaisseur de 30 à 200  $\mu\text{m}$ , une longueur variable et sont distants de quelques centaines de  $\mu\text{m}$ .

La structure de la motte compactée à  $W_2$  apparaît massive, à tendance lamellaire, alors que la structure de la motte compactée à  $W_1$  est encore de type fragmentaire.

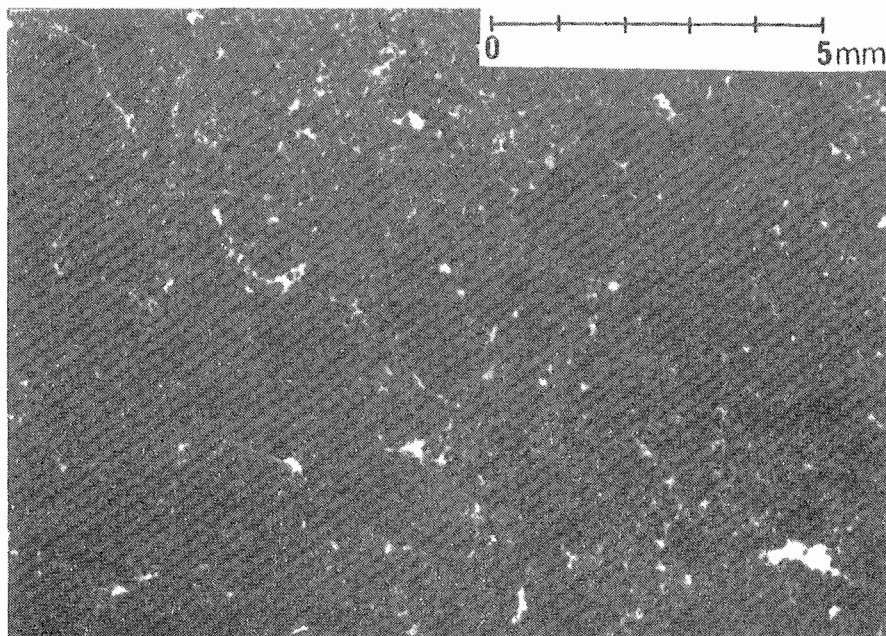


Photo 2 : Motte compactée à  $W_2$  (lame « horizontale »).

*Silty material compacted at  $W_2$  (« horizontal » thin section).*

## C) Conclusion

Le tassement, dont l'intensité croît avec la teneur en eau au moment du compactage, se définit par une diminution importante du volume poral interagrégats ; cette composante de l'espace poral devient négligeable pour le maximum de compacité atteint avec le test Proctor. Parallèlement, la structure fragmentaire initiale du matériau se transforme en une structure massive ou continue fréquemment observée dans les sols du Massif Armoricain, au niveau des semelles de labour ou des zones affectées par le passage en conditions humides de matériels exerçant au sol de fortes pressions. A cette échelle d'observations et de mesures, les effets du compactage Proctor sur la structure du matériau sont donc comparables à ceux produits par les contraintes auxquelles les sols sont soumis *in situ*.



### III. MODIFICATIONS DE L'ORGANISATION DES CONSTITUANTS ELEMENTAIRES AU SEIN DES AGREGATS

#### A) Analyse du spectre de porosité en porosimétrie au mercure

##### 1. Résultats

Nous avons adopté deux modes de représentation des résultats :

— la courbe de volume poral cumulé en fonction du  $\log r_{eq}$  des plus petits pores jusqu'aux plus grands.

— La distribution de ce volume poral en différentes classes de tailles de pores (appelée « spectre de porosité ») définies chacune par un accroissement constant de  $\log r_{eq} = 0,25$ .

L'essentiel du volume poral intraagrégats et une partie du volume poral interagrégats — dans la mesure où celui-ci n'est pas nul — sont pris en compte :

— Le volume des pores auquel le mercure ne peut accéder (pores intraagrégats de  $r_{eq} < 7,5$  nm) est faible : seulement 5 % du volume poral de la motte compactée à  $W_2$  pour laquelle il peut être évalué — par la différence entre le volume poral total de la motte ( $v_v^m$ ) et le volume cumulé de mercure introduit — (soit environ  $0,01 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$ ).

— Le volume poral interagrégats pris en compte dans la motte compactée à  $W_1$  et le matériau non compacté correspond aux plus petits pores interagrégats ( $r_{eq} < 100 \mu\text{m}$ ) ou, plus généralement, aux pores « en coin » au niveau des zones de contacts entre agrégats. La limite entre les tailles équivalentes des pores inter et interagrégats peut être considérée égale à  $5,6 \mu\text{m}$ . En effet, la différence de volume poral cumulé jusqu'à  $5,6 \mu\text{m}$  entre les deux types de mottes est nulle, comme la

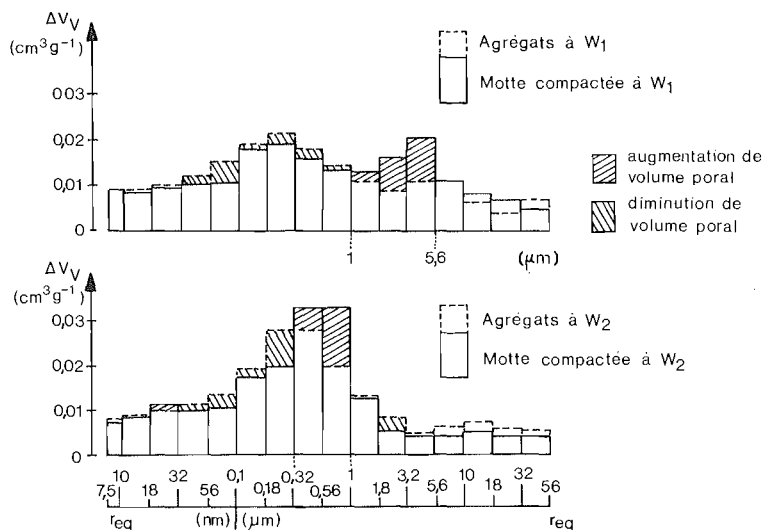


Figure 4 : Influence du compactage à  $W_1$  et à  $W_2$  sur le spectre de porosité.

*The effect of compaction at two selected water contents  $W_1$  and  $W_2$ , on the pore size distribution of silty material (samples freeze-dried before mercury injection).*

différence de volume poral intraagrégats entre ces mêmes échantillons. On vérifie également la similitude de ces deux différences sur les mottes à l'état sec. Cette limite n'a toutefois pas un sens strict, car les gammes de  $r_{eq}$  des deux types de pores se recouvrent partiellement à cause notamment de l'existence des pores interagrégats « en coin ».

La figure 4 met en évidence d'une part les intervalles de  $r_{eq}$  pour lesquels le compactage entraîne une augmentation ou une diminution de volume poral, et d'autre part l'intensité de ces variations. On observe ainsi une redistribution du volume poral sous l'action du compactage, au profit des pores interagrégats de  $r_{eq}$  compris entre 1 et 5,6  $\mu\text{m}$  pour la motte compactée à  $W_1$  et entre 0,32 et 1  $\mu\text{m}$  pour la motte compactée à  $W_2$ .

Les spectres de porosité obtenus pour les deux types de mottes apparaissent en conséquence nettement distincts dans l'intervalle de  $r_{eq}$  compris entre 0,32 et 5,6  $\mu\text{m}$  (figure 5a). Dans la motte compactée à  $W_2$ , les pores de  $r_{eq}$  compris entre 0,32 et 1  $\mu\text{m}$  dominent au détriment des pores de  $r_{eq}$  supérieur à 1,8  $\mu\text{m}$ . La distribution de la taille des pores de la motte compactée à  $W_1$  est plus étalée. Notons qu'une différence de distribution du volume poral, de moindre ampleur mais concernant à peu près le même intervalle de  $r_{eq}$  existe entre les agrégats à  $W_1$  et à  $W_2$  (figure 5b). Le compactage a eu pour effet d'accentuer cette différence.

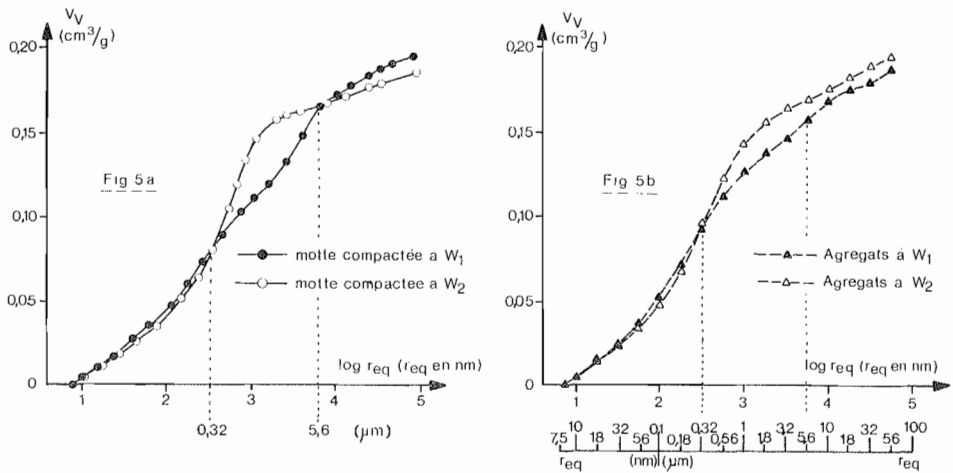


Figure 5 : Comparaison des courbes de volume poral cumulé de la motte compactée à  $W_1$  et de la motte compactée à  $W_2$  (fig. 5a) et des agrégats (non compactés) à  $W_1$  et à  $W_2$  (fig. 5b).

*Comparison of mercury injection curves for silty material compacted at  $W_1$  or  $W_2$  (Fig. 5a) and the original (uncompacted) aggregates at  $W_1$  or  $W_2$  (Fig. 5b).*

## 2. Discussion

Le compactage modifierait donc sensiblement la distribution du volume poral intraagrégats sur presque toute la gamme de  $r_{eq}$  analysée (pores de  $r_{eq} < 32$  nm exceptés) et de manière différente à  $W_1$  et à  $W_2$ .

Or, la présence dans les échantillons à  $W_2$  (agrégats non compactés ou motte) d'un volume de pores de  $r_{eq}$  compris entre 0,18 et 1  $\mu\text{m}$  plus important que dans les échantillons à  $W_1$  est compatible avec le développement, au cours de la congélation, de pores de l'ordre du  $\mu\text{m}$ , d'autant plus important que l'échantillon est initialement plus humide (LAWRENCE et al., 1979 ; QUIRK et MURRAY, 1980).

Pourtant, la différence de spectre de porosité entre les deux types de mottes, dans l'intervalle de  $r_{eq}$  compris entre 0,32 et 5,6  $\mu\text{m}$ , persiste, plus ou moins accentuée :

— Après un séchage à l'étuve à 105°C, les mottes n'étant alors pas lyophilisées avant l'injection de mercure (figure 6a).

— A l'issue d'une alternance de dessiccation-humectation (figure 6b), les mottes étant lyophilisées, mais la motte compactée à  $W_1$  est cette fois plus humide ( $W = 22,2\%$ ) que la motte compactée à  $W_2$  ( $W = 17,8\%$ ).

Il est donc permis de penser que la contrainte mécanique appliquée au matériau modifie effectivement son espace poral intraagrégat, sans nier pour autant l'existence d'artefacts provoqués par la lyophilisation.

Une évolution de l'espace poral intraagrégat n'est d'ailleurs pas étonnante, même si elle ne se traduit pas par une variation du volume poral intraagrégat. En effet, un arrangement des agrégats aussi serré que celui observé à l'issue du compactage à  $W_2$  comme à  $W_1$  n'est possible que par une déformation importante des agrégats, grâce à leur comportement plastique à  $W_1$  ou liquide à  $W_2$  (FAURE, 1978). Or, cette déformation suppose des modifications de l'organisation des constituants au sein des agrégats et donc de la morphologie de l'espace poral intraagrégats.

La nature des pores intraagrégats affectés par le compactage n'est toutefois pas précisée par l'analyse des spectres de porosité. Les quelques observations effectuées avec le microscope électronique à balayage (M.E.B.) permettent de formuler une hypothèse à cet égard.

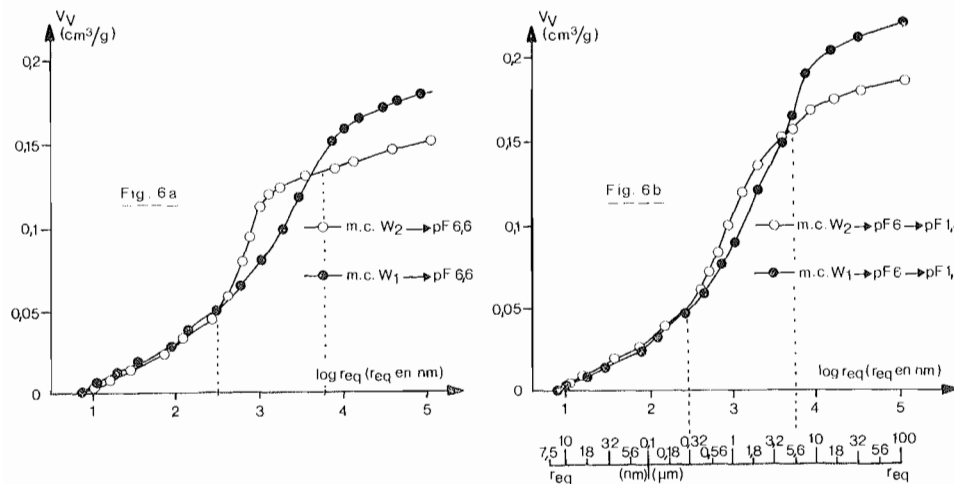


Figure 6: Comparaison des courbes de volume poral cumulé des deux types de mottes :

- séchées à 105°C (fig. 6a) ;
- réhumectées à pF 1,5 à partir de pF 6 (fig. 6b) .

Comparison of mercury injection curves for silty material compacted at  $W_1$  or  $W_2$  :

- oven-dried at 105°C : Fig 6a ;
- rewetted at 0,032 bar (pF 1.5) from 1000 bar (pF 6) : Fig. 6b.

## B) Apport des observations au M.E.B.

Ces observations n'ont pas permis de distinguer les deux types de mottes étudiées, ni par la morphologie des pores visibles, ni par le mode d'assemblage des constituants. La comparaison s'est avérée délicate à cause de l'existence de plages plus ou moins riches en argile au sein du matériau, également notée en microscopie optique.

Néanmoins, l'espace poral visible est constitué de cavités ménagées par l'assemblage de particules de limons enrobées de « paquets » ou domaines de particules argileuses (photo 3). Les dimensions apparentes de ces cavités, variant de 1 à plusieurs  $\mu\text{m}$ , appartiennent aux intervalles de  $r_{\text{eq}}$  pour lesquels des différences de spectre de porosité ont été notées précédemment entre les deux types de mottes ou entre le matériau avant et après le compactage.

Aussi est-il vraisemblable que les modifications de la morphologie de l'espace poral intraagrégats provoquées par le compactage concernent partiellement au moins la morphologie de ces cavités. Dans la mesure où le volume poral intraagrégats ne varie pas globalement, on peut penser que le compactage modifie moins les dimensions des cavités que la taille des seuils des cavités déterminant leur accessibilité au mercure. La taille des seuils des cavités aurait ainsi tendance à augmenter sous l'influence du compactage à  $W_1$  comme à  $W_2$  (figure 4). Ces seuils seraient aussi plus étroits et plus homogènes dans la motte compactée à  $W_2$  que dans la motte compactée à  $W_1$  (figure 5a).

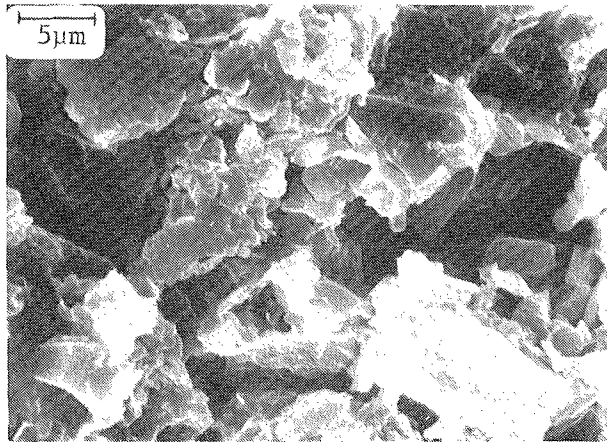


Photo 3 :

Photographie prise en microscopie électronique à balayage d'une motte compactée à  $W_1$ . Cavités de quelques  $\mu\text{m}$  ménagées par l'assemblage des particules de limon enrobées d'argile.

*Scanning electron microscope photograph of soil compacted at  $W_1$  : vughs of a few  $\mu\text{m}$  in size, which result from packing of clay coated silt particles, are apparent.*

## CONCLUSION

Les modifications structurales consécutives au compactage affectent toutes les organisations, y compris celles internes à l'agrégat.

Ces modifications ont été appréhendées quantitativement, de manière indirecte, par des analyses relatives à l'espace poral du matériau.

Le matériau étant constitué initialement de petits agrégats (2 à 5 mm), la mesure des composantes interagrégats et intraagrégats de l'espace poral montre que le compactage se traduit par une diminution importante du volume poral interagrégats. Au maximum de compacité atteint avec le test Proctor, les pores interagrégats ont pratiquement disparu, de sorte que le matériau acquiert une structure massive.

Par contre, quelle que soit la teneur en eau du matériau au moment du compactage, il n'y a pas de diminution du volume poral intraagrégats, autrement dit pas de tassement à l'échelle de l'agrégat dont l'espace poral est constitué uniquement de pores ménagés par l'assemblage des constituants élémentaires.

Les effets du compactage sur la structure du matériau ne se limitent pourtant pas à des modifications de l'assemblage des agrégats. L'organisation des constituants élémentaires au sein des agrégats est également affectée.

En effet, si le volume poral intraagrégats ne varie pas globalement, sa distribution en fonction de la taille des pores, déterminée par la porosimétrie au mercure, est sensiblement modifiée, et de manière variable, selon la teneur en eau à laquelle le matériau est compacté. Ces modifications résultent de la déformation des agrégats sous l'action de la contrainte mécanique, le matériau se situant, aux teneurs en eau choisies pour cette étude, dans le domaine de comportement plastique ou à la limite de liquidité.

Les observations en microscopie électronique à balayage n'ont pas permis de définir avec certitude la nature des changements d'organisation internes aux agrégats, mais il est vraisemblable qu'ils concernent la morphologie des cavités, de quelques  $\mu\text{m}$  de large, ménagées par l'assemblage des particules de limons enrobées d'argile.

La porosimétrie au mercure nous a permis d'appréhender les effets du compactage sur la structure du matériau de manière plus complète que par la seule analyse, semi-globale, des volumes relatifs de pores intra et interagrégats.

En étudiant (GRIMALDI et TESSIER, 1986) les changements de certaines propriétés physiques du matériau, provoqués par le compactage, nous verrons qu'il convient de ne pas négliger, pour comprendre ces changements, le niveau le plus fin de l'organisation du matériau.

Reçu pour publication : décembre 1985

Accepté pour publication : mars 1986

#### REMERCIEMENTS

J'exprime ma reconnaissance à Alain RUELLAN, Daniel TESSIER et Alain FAURE qui ont encadré ce travail, fruit d'une collaboration entre les Stations de Science du Sol de l'I.N.R.A. de Rennes, Versailles et Avignon. Ce travail a bénéficié d'un soutien de la D.G.R.S.T. et de l'O.N.I.C. (Action concertée I.N.R.A. - I.T.C.F. - O.N.I.C. « Etude des rotations céréalières intensives dans la moitié nord de la France »).

Je tiens également à remercier, à Versailles, Jeannine BERRIER, Philippe CAMBIER, René PROST et Jean DRIARD qui m'ont fait bénéficier de leurs compétences en microscopie électronique à balayage et porosimétrie au mercure.

#### EFFECTS OF DYNAMIC COMPACTION ON A SILTY SOIL MATERIAL

*The structural changes in a silty soil material (Table 1) in response to dynamic compaction (Proctor) were measured (bulk density, mercury porosimetry) and observed both by optical and scanning electron microscopy. These procedures allowed simultaneous consideration of various levels of microstructure. The material was initially made up of aggregates 2-5 mm in size. All characterisations of the compacted material were carried out on clods taken from the Proctor samples (Fig. 2).*

*Depending on water content at the time of compaction, compaction was found to induce a significant decrease or even the total disappearance of the inter-aggregate pore volume, without any overall variation, however, of the intra-aggregate pore volume (Fig. 3). In the same way, the soil structure observed by optical microscopy becomes massive (Photos 1 and 2).*

*On the other hand, data obtained by mercury porosimetry indicate a slight alteration in size distribution of the intra-aggregate pores as a result of mechanical stresses causing the aggregates to change shape (Fig. 4). It is shown that not all the differences obtained between the various samples result from the drying technique used (freeze-drying) before mercury injection (Fig. 5 and 6 comparison). The modification of the intra-aggregate pore size distribution in response to compaction is likely to affect the morphology of pores a few  $\mu\text{m}$  in size (Photo 3), detectable by the scanning electron microscope, which result from the packing of clay coated loam particles.*

## BIBLIOGRAPHIE

- CAMBIER P. et PROST R. (1981). — Etude des associations argile-oxyde : organisation des constituants d'un matériau ferrallitique. *Agronomie* 1 (9), pp. 713-722.
- DELAGE P. (1979). — Etude du milieu poreux et de la texture d'argiles sensibles du Québec. Thèse Univ. Paris VI et E.N.S.M. Paris, 126 p.
- FAURE A. (1978). — Comportement des sols au compactage : rôle de l'argile et conséquences sur l'arrangement des grains. Thèse Doct. ès Sci. Grenoble, 179 p.
- GRIMALDI M. (1977). — Etude en laboratoire du comportement au tassement du sol limoneux du Rheu (Ille-et-Vilaine). Observations micromorphologiques. Mémoire D.E.A. Rennes, 59 p.
- GRIMALDI M. (1981). — Contribution à l'étude du tassement des sols : évolution de la structure d'un matériau limoneux soumis à des contraintes mécaniques et hydriques. Thèse Doct. Ing. E.N.S.A. Rennes, 221 p.
- GRIMALDI M. et TESSIER D. (1986). — Changements des propriétés de retrait, de gonflement et de rétention d'eau d'un matériau limoneux après un compactage dynamique. *Sci. Sol*, à paraître.
- GUERIF J. et FAURE A. (1979). — Rôle de la matière organique sur le comportement des sols au compactage : I. Etude statistique. *Ann. Agron.*, 30 (5), pp. 387-399.
- GUERIF J. (1979). — Rôle de la matière organique sur le comportement des sols au compactage : II. Matières organiques libres et liées. *Ann. Agron.*, 30 (6), pp. 469-480.
- GUERIF J. (1982). — Compactage d'un massif d'agrégats : effet de la teneur en eau et de la pression appliquée. *Agronomie*, 2 (3), pp. 287-294.
- JONGERIUS A. et HEINTZBERGER G. (1975). — Methods in soil micromorphology. A technique for the preparation of large thin sections. *Soils Survey papers*, Wageningen, n° 10, 45 p.
- LAWRENCE G.P. (1978). — Stability of soil pores during mercury intrusion porosimetry. *J. Soil Sci.*, 29, pp. 299-304.
- LAWRENCE G.P., PAYNE D. et GREENLAND D.J. (1979). — Pore size distribution in critical-point and freeze-dried aggregates from clay subsoils. *J. Soil Sci.*, 29, pp. 499-516.
- MONNIER G., STENGEL P. et FIES J.-C. (1973). — Une méthode de mesure de la densité apparente de petits agglomérats terreux. Application à l'analyse des systèmes de porosité du sol. *Ann. Agron.*, 24 (5), pp. 533-545.
- MURRAY R.S. et QUIRK J.-P. (1980). — Freeze-Dried and Critical-Point-Dried Clay. A comparison. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44, pp. 232-234.
- PLET P. et TANGUY H. (1975). — Contribution à l'étude des relations entre l'évolution du profil cultural et le comportement des assolements céréaliers intensifs dans l'Ouest de la France. Mémoire DEA Rennes, 185 p.
- STENGEL P. (1979). — Utilisation de l'analyse des systèmes de porosité pour la caractérisation de l'état physique du sol in situ. *Ann. Agron.*, 30 (1), pp. 27-51.
- TESSIER D. et BERRIER J. (1978). — Observations d'argiles hydratées en microscopie électronique à balayage ; importance et choix de la technique de préparation. M. Delgado (Ed), Proc. Vth Int. Working Meeting Soil Micromorphology, Granada, pp. 117-135.
- TESSIER D. et BERRIER J. (1979). — Utilisation de la microscopie électronique à balayage dans l'étude des sols. Observation de sols humides soumis à différents pF. *Sci. Sol*, 1, pp. 67-82.
- TESSIER D. (1984). — Etude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux. Hydratation, gonflement et structuration au cours de la dessiccation et de la réhumectation. Thèse Doct. ès Sci., Univ. Paris VII, 361 p.
- VACHIER P., CAMBIER P. et PROST R. (1979). — Structure d'un milieu poreux : la craie. *Ann. Agron.*, 30 (3), pp. 247-253.

Annexe 1 : Valeurs de volume poral ( $v_v$ ,  $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$ ) correspondant à la figure 3 (avec  $n$  : nombre de mesures).

*Pore volume ( $v_v$ ,  $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$ ) values corresponding to figure 3.*

$W$ (%)	$v_v$	$v_v^m$	$\overline{v_v^a c}$ ( $\sigma$ ) $n$	$\overline{v_v^a}$ ( $\sigma$ ) $n$
$W_1 - 12,4$	0,248	0,209 0,208	0,200 (0,003) 5	0,199 (0,002) 9
$W_2 - 17,3$	0,245	0,198 0,194	0,197 (0,003) 6	0,198 (0,003) 9

Annexe 2 : Porosimétrie au mercure : valeurs de  $v_v$  correspondant à la figure 4.  
 Mercury porosimetry :  $v_v$  values corresponding to figure 4.

$\Delta v_v$ (cm <sup>3</sup> /100 g)						
$r_{eq}$ (en nm)	log $r_{eq}$ ( $r_{eq}$ en nm)	Agrégats		Motte		
		$\tilde{a}$ $W_1$	$\tilde{a}$ $W_2$	comp. $\tilde{a}$ $W_1$	comp. $\tilde{a}$ $W_2$	
7,5	0,875					
		0,91	0,82	0,91	0,73	
10	1,0					
		0,94	0,90	0,84	0,85	
18	1,25					
		1,02	0,99	0,95	1,15	
32	1,5					
		1,22	1,15	1,04	0,96	
56	1,75					
		1,58	1,37	1,06	1,04	
100	2,0					
		1,94	1,93	1,80	1,76	
180	2,25					
		2,19	2,77	1,92	1,97	
320	2,5					
		1,85	2,73	1,61	3,26	
560	2,75					
		1,46	1,98	1,37	3,23	
1 ( $\mu$ m)	3,0					
		1,12	1,33	1,32	1,25	
1,78	3,25					
		0,90	0,83	1,66	0,52	
3,16	3,5					
		1,10	0,49	2,06	0,41	
5,62	3,75					
		1,11	0,63	1,11	0,43	
10	4,0					
		0,64	0,72	0,85	0,51	
17,8	4,25					
		0,43	0,61	0,72	0,43	
31,6	4,5					
		0,74	0,56	0,49	0,40	
56,6	4,75					