

CHANGEMENTS DES PROPRIETES DE RETRAIT, DE GONFLEMENT ET DE RETENTION D'UN MATERIAU LIMONEUX SOU MIS A UN COMPACTAGE DYNAMIQUE

Michel GRIMALDI ⁽¹⁾ et Daniel TESSIER ⁽²⁾

RESUME

Un matériau limoneux, ayant ou non subi un compactage dynamique (Proctor), est soumis à une alternance de dessiccation-réhumectation afin d'étudier l'évolution de sa structure.

Il apparaît que les modifications de structure consécutives au compactage ne sont pas réversibles sous l'effet d'une histoire hydrique simple. Au contraire, on note des changements de propriétés de retrait et de gonflement du matériau entraînant une aggravation des tassements les plus intenses. Ce sont les modifications de l'assemblage des constituants, mises en évidence par la porosimétrie au mercure, qui sont responsables des différences de retrait. Le mode d'assemblage des agrégats, plus ou moins serré, aurait quant à lui une influence sur leur gonflement. Des changements importants de propriétés de rétention d'eau sont également observés. Ils ont pu être reliés aux modifications de structure provoquées par les contraintes mécaniques.

INTRODUCTION

Dans un précédent travail (GRIMALDI, 1986), nous avons cherché à caractériser les effets immédiats d'un compactage dynamique sur la structure d'un matériau limoneux en prenant en compte ses différents niveaux d'organisation. Nous allons à présent étudier la dynamique de la structure du matériau, compacté ou non, au cours d'une alternance de dessiccation-humectation. Nous verrons ainsi dans quelle mesure les modifications structurales provoquées par le compactage sont **réversibles** sous l'action d'une histoire hydrique simple.

Il convient en effet de ne pas négliger le rôle des facteurs climatiques, mais aussi biologiques, sur l'évolution de la structure des sols, surtout lorsque l'on envisage la réduction des opérations de travail du sol. Parmi les facteurs climatiques, les variations hydriques sont souvent de grande ampleur dans les horizons superficiels des sols affectés par les compactages; elles peuvent entraîner des modifications structurales importantes, y compris aux niveaux d'organisation les plus fins.

Nous chercherons également à préciser l'influence de la structure du matériau, aux différents niveaux d'organisation, sur son comportement au retrait et au gonflement et sur ses propriétés de rétention d'eau.

Les effets du compactage seront alors caractérisés par des changements relatifs à l'organisation du matériau et à certains aspects de son fonctionnement.

(1) O.R.S.T.O.M., B.P. 165, 97323 CAYENNE CEDEX (Guyane Française).

(2) I.N.R.A., Station de Science du Sol, 78000 VERSAILLES.

I. MATERIAU ET METHODES

a) Le matériel expérimental comprend trois types d'échantillons :

— un matériau « non compacté » constitué d'agrégats de taille comprise entre 2 et 5 mm et de texture limono-argileuse ;

— deux types de mottes d'une dizaine de cm³, obtenues en compactant le matériau précédent avec la technique Proctor ; à deux teneurs en eau massiques notées W_1 ($\approx 12\%$) et W_2 ($\approx 17\%$, teneur en eau du maximum Proctor). Ces échantillons sont appelés « motte compactée à W_1 » et « motte compactée à W_2 ».

L'origine et la constitution du matériau, l'obtention au laboratoire et la structure des divers échantillons ont été précisées précédemment (GRIMALDI, 1986).

b) Au cours de l'expérimentation, les deux types de mottes ont été soumis aux mêmes histoires hydriques correspondant à une dessiccation d'intensité déterminée suivie d'une réhumectation.

Les étapes successives de la dessiccation, définies par le pF à l'équilibre, sont : pF 3 éventuellement (selon l'état hydrique initial de la motte) ; pF 4,2 ; pF 4,85 ; pF 6 et enfin pF 6,6 correspondant au séchage à l'étuve à 105°C.

Les réhumectations à partir de ces différents états de dessiccation ont été effectuées en deux étapes seulement : pF 3 puis pF 1,5.

Le matériau non compacté a subi la même dessiccation progressive, à partir de W_2 , mais n'a été réhumecté qu'à partir de pF 6.

Les techniques utilisées pour obtenir les différents états d'équilibre hydrique reposent sur le contrôle de l'activité de l'eau par une solution saline saturée à température constante (pF 4,85 et pF 6), ou bien mettent en œuvre une pression pneumatique avec l'appareil de RICHARDS pour la dessiccation jusqu'à pF 3 puis pF 4,2, et le dispositif proposé par TESSIER et BERRIER (1979) pour les réhumectations jusqu'à pF 3 puis pF 1,5.

c) A chacune des étapes hydriques, les deux types de mottes et les agrégats non compactés ont été caractérisés par des observations en microscopie optique et des mesures physiques : teneur en eau massique et masse volumique sèche d'agrégats non compactés, de mottes et d'agglomérats obtenus en fragmentant les mottes. Les agglomérats de taille comprise entre 2 et 3 mm, permettent d'analyser l'état physique des mottes à l'échelle des agrégats qui les constituent. Ces mesures physiques permettent d'étudier le comportement du matériau au retrait et au gonflement, à l'échelle de la motte et à celle de l'agrégat.

Pour certaines étapes hydriques déterminées, on a mesuré, à l'aide de la porosimétrie au mercure, la distribution du volume poral des deux types de mottes en fonction de la taille des pores, ou « spectre de porosité ». Des observations en microscopie électronique à balayage ont été aussi effectuées.

L'ensemble des techniques d'observations et de mesures utilisées ont été présentées précédemment (GRIMALDI, 1986), ainsi que les préparations des échantillons qu'elles ont nécessitées (déshydratation par lyophilisation notamment).

II. EVOLUTION STRUCTURALE DU MATERIAU AU COURS DE LA DESSICCATION

A) Influence du compactage sur le retrait

1) Le retrait à l'échelle des agrégats

Le volume poral interagrégats des deux types de mottes (noté $v_{v,ac}$) et du matériau non compacté (noté $v_{v,a}$) diminue significativement au cours de la dessiccation (figure 1). Il s'agit d'un **retrait « résiduel »** (HAINES, 1923), la diminution du volume poral étant toujours inférieure à la diminution volumique de l'eau, atteignant néan-

moins 60 % de celle-ci pour les deux types de mottes, entre 12 et 9 % de teneur en eau. L'essentiel, voire la totalité du retrait se produit pour des valeurs de pF inférieures à 4,2, c'est-à-dire avant un pF couramment atteint dans les horizons superficiels des sols.

Il apparaît enfin que le retrait à l'échelle des agrégats est plus fort lorsque le matériau a été préalablement compacté, et ce d'autant plus que le compactage a été effectué à une teneur en eau plus élevée.

2) Le retrait à l'échelle de la motte : conséquences sur la structure

L'écart entre le volume poral des deux types de mottes (noté v_v^m) s'accroît au cours de la dessiccation (figure 1). En effet :

— Pour la motte compactée à W_2 , le retrait est semblable aux deux échelles considérées : agrégats et motte (figure 1). Les observations microscopiques montrent que ce type de motte conserve sa structure massive au cours de la dessiccation. La tendance lamellaire de la structure, notée à l'issue du compactage, dans la partie supérieure de la motte, ne s'accroît pas.

— Le retrait de la motte compactée à W_1 semble plus faible que le retrait des agrégats qui la constituent ($|\Delta v_v^m| < |\Delta v_v^{ac}|$), de sorte que le volume poral inter-agrégats augmenterait légèrement au cours de la dessiccation (figure 1). Les observations en microscopie optique ne mettent toutefois pas en évidence une évolution très sensible de la structure fragmentaire de la motte compactée à W_1 . Localement, des pores à morphologie de fissure, de quelques dizaines de μm d'épaisseur, prolongent et parfois relient entre eux les « vides d'entassement » des agrégats, de forme polyconcave, diminuant ainsi les surfaces de contact entre agrégats.

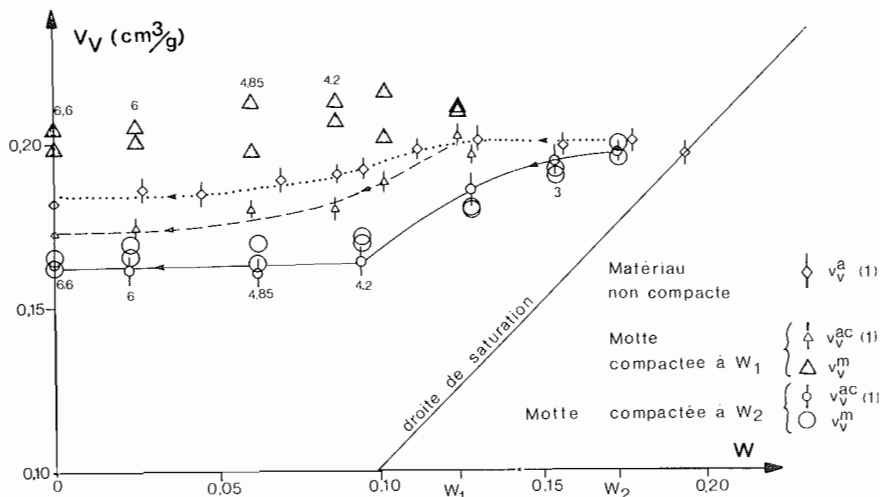


Figure 1 : Variation au cours de la dessiccation du volume poral intraagrégat et du volume poral de motte (éventuellement), pour les mottes compactées à W_1 ou à W_2 et pour le matériau non compacté. Les nombres à la verticale des symboles indiquent le pF correspondant.

(1) Moyenne de 3 mesures au moins et intervalle de confiance avec un risque de 1 %.

Figure 1 : Variation during the drying of clod (v_v^m) and intra-aggregate (v_v^{ac} or v_v^a) pore volumes for the material compacted at W_1 or W_2 and for the non-compacted material. Numbers above and below the symbols indicate corresponding pF values.

(1) Mean of at least three values and its confidence interval (confidence level of 99 %).

3) Effets de la dessiccation sur le tassement

Les différences de comportement au retrait observées ont pour conséquence une **aggravation, au cours de la dessiccation, des tassements provoqués par le compactage**. En effet, les deux types de mottes et le matériau non compacté ne se différencient plus seulement, comme à l'issue du compactage, par leur volume poral interagrégats ($v_v^m - v_v^{ac}$), mais aussi par leur volume poral intraagrégat : en deçà de la limite de retrait, la différence de volume poral intraagrégat entre le matériau non compacté et la motte compactée à W_2 est de $0,014 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$, soit une différence de 2,5 % de porosité d'agrégats, non négligeable à ce niveau d'organisation du matériau.

B) Evolution du spectre de porosité du matériau compacté au cours de la dessiccation

Les spectres de porosité des deux types de mottes ont été déterminés par la porosimétrie au mercure après dessiccation à 105°C . Ils se caractérisent par rapport à ceux obtenus après le compactage (sur des échantillons lyophilisés) par une diminution du volume des pores de taille équivalente (r_{eq}) inférieure à $0,56 \mu\text{m}$ (figure 2 a et b). Le volume des pores de $r_{eq} < 7,5 \text{ nm}$, auxquels le mercure ne peut accéder, reste de l'ordre de $0,01 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$.

Cette diminution de volume poral n'est que partiellement compensée par une augmentation du volume des pores de r_{eq} compris entre $0,56$ et $5,6 \mu\text{m}$ essentiellement. Ceci est en accord avec la mise en évidence d'un retrait. Rappelons (GRIMALDI, 1986) que $5,6 \mu\text{m}$ peut être considéré comme la limite entre les tailles équivalentes des pores inter et intraagrégat : les différences entre les deux types de mottes, de volume poral intraagrégat et de volume de pores de $r_{eq} < 5,6 \mu\text{m}$, sont égales.

Par ailleurs, le retrait plus important de la motte compactée à W_2 par rapport à la motte compactée à W_1 est associé (figure 2 a et b) :

- à une plus forte diminution du volume des pores de $r_{eq} < 0,56 \mu\text{m}$ ($0,041$ contre $0,033 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$), la différence étant due aux pores de r_{eq} compris entre $0,32$ et $0,56 \mu\text{m}$;
- à une moindre augmentation du volume des pores de $r_{eq} > 0,56 \mu\text{m}$ ($0,007$ contre $0,018 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$), et limitée d'ailleurs aux pores de $r_{eq} < 1 \mu\text{m}$.

Il en résulte que la différence de distribution de la taille des pores intraagrégat entre les deux types de mottes se situe en fin de dessiccation comme après le compactage (figure 2 c) dans la gamme de $r_{eq} > 0,32 \mu\text{m}$, cette différence s'étant toutefois accentuée au cours de la dessiccation.

En se référant aux observations effectuées en microscopie électronique à balayage sur les deux types de mottes, après le compactage et à l'issue de la dessiccation, nous pouvons proposer une interprétation de l'évolution de la distribution de la taille des pores sous l'action d'une dessiccation intense.

La diminution du volume des pores de $r_{eq} < 0,56 \mu\text{m}$ doit résulter de la contraction des pores les plus fins, mais aussi, compte tenu de l'augmentation du volume des pores de r_{eq} compris entre $0,56$ et $5,6 \mu\text{m}$, **de l'expansion d'autres pores**. Ces derniers pores sont certainement les cavités ménagées par l'assemblage des particules de limon enrobées d'argile, qui constituent l'essentiel de l'espace poral visible en microscopie électronique à balayage (GRIMALDI, 1986).

Dans les mottes à l'état sec, les particules de limon enrobées d'argile apparaissent en effet plus individualisées que dans les mottes après le compactage, sans doute à cause du retrait des domaines argileux autour des particules de limon (FIES, 1978) et, parallèlement, les cavités sont observées plus fréquemment. Les pores qui se contractent seraient alors ménagés par l'assemblage des particules d'argile au sein des domaines argileux, ces pores n'étant généralement pas visibles en microscopie électronique à balayage.

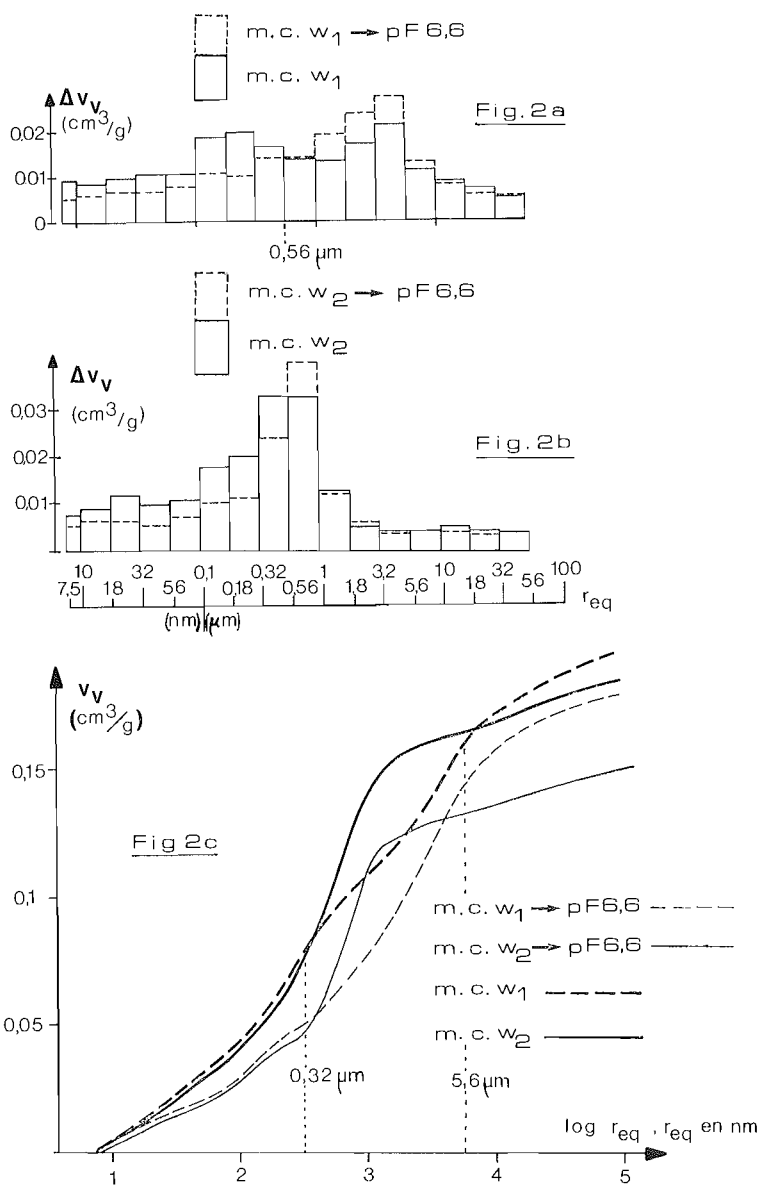


Figure 2 : Influence de la dessiccation (séchage à 105°C = pF 6,6) sur le spectre de porosité de la motte compactée à W_1 (fig. 2 a) ou à W_2 (fig. 2 b). Comparaison des courbes cumulées d'injection de mercure correspondantes (fig. 2 c).

Figure 2 : The effect of oven-drying at 105°C (pF 6.6) on the pore size distribution of the material compacted at W_1 (Fig. 2 a) or W_2 (Fig. 2 b). Comparison of the corresponding cumulative pore size distribution graphs (Fig. 2 c).

III. EVOLUTION STRUCTURALE DU MATERIAU AU COURS DES REHUMECTATIONS

A) Influence du compactage sur le gonflement du matériau

L'intensité de la dessiccation préalable à la réhumectation ayant peu d'effet sur le comportement au gonflement du matériau (GRIMALDI, 1981), nous présenterons essentiellement les résultats obtenus au cours de la réhumectation à partir de pF6 (figure 3). Cette réhumectation a été choisie, car c'est la seule pour laquelle on dispose de mesures sur le matériau non compacté.

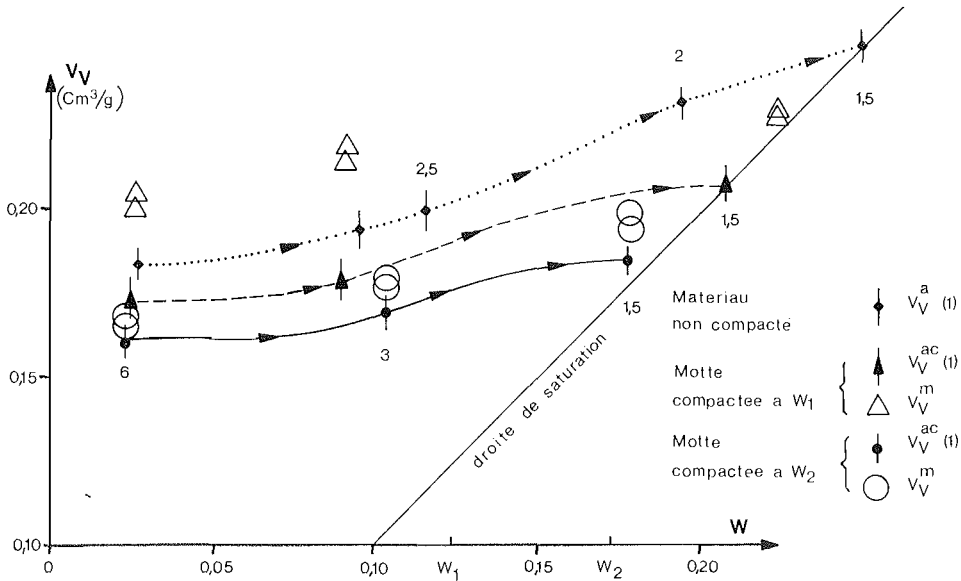


Figure 3 : Variation au cours de la réhumectation à partir de pF6 du volume poral intraagrégat et du volume poral de motte (éventuellement) pour les mottes compactées à W₁ ou à W₂ et pour le matériau non compacté. Les nombres à la verticale des symboles indiquent le pF correspondant. (1) Idem figure 1.

Figure 3 : Variations during the rewetting from 1000 bar (pF6) of clod ($v_{v,m}$) and intra-aggregate ($v_{v,ac}$ or $v_{v,a}$) pore volumes for the material compacted at W₁ or W₂ and for the non-compacted material. Numbers above and below the symbols indicate corresponding pF values. (1) See Fig. 1.

1) Le gonflement à l'échelle des agrégats

A pF3, les écarts entre les valeurs de volume poral intraagrégat des deux types de mottes et du matériau non compacté sont comparables à ceux obtenus à l'issue de la dessiccation. Les agrégats ne commencent à gonfler significativement qu'entre pF3 et pF1,5. A cause de l'hystérésis de la relation entre la teneur en eau et le pF, la teneur en eau n'est au plus que de 1% plus élevée en réhumectation à pF3 qu'en dessiccation à pF4,2.

A pF1,5, les agrégats sont saturés en eau, ou proches de la saturation pour la motte compactée à W₂. Il apparaît que **les agrégats gonflent moins lorsque le matériau a été compacté et d'autant moins que le compactage a été effectué à une**

teneur en eau plus élevée. D'où un accroissement des différences de volume poral intraagrégat entre les divers échantillons.

Enfin, le volume poral intraagrégat de la motte compactée à W_2 est plus faible à l'issue de l'alternance de dessiccation-réhumectation qu'après le compactage. **La réhumectation ne permet donc pas de récupérer le tassement des agrégats provoqué par l'action conjointe du compactage et de la dessiccation.**

Elle aurait même tendance à l'aggraver si l'on compare le volume poral intraagrégat de la motte compactée à W_2 et du matériau non compacté, la différence étant de $0,065 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$, soit 7 % de porosité d'agrégats.

2) Le gonflement à l'échelle de la motte : conséquences sur la structure

L'écart entre le volume poral des deux types de mottes (v_v^m) ne s'accroît pas au cours des différentes réhumectations. En effet, le gonflement de la motte compactée à W_1 , dans son ensemble, est plus faible que celui des agrégats qui la constituent, de sorte que le volume poral interagrégats diminue entre pF 3 et pF 1,5 (figure 3). Au contraire, dans la motte compactée à W_2 , lorsque la dessiccation a été intense (\geq pF 5), le volume poral interagrégats augmente légèrement.

Les observations microscopiques mettent en outre en évidence, à pF 1,5, **le développement de fissures** à partir, semble-t-il, des petits pores interagrégats qui subsistent dans la motte compactée à W_2 . Ces discontinuités, de quelques dizaines de μm de large, sont vraisemblablement remplies d'eau à pF 1,5 (la taille équivalente des pores remplis d'eau est de $50 \mu\text{m}$ d'après la loi de JURIN pour un modèle de pores planaires) et elles fragmentent ou réindividualisent partiellement les agrégats initiaux.

La structure de la motte compactée à W_2 apparaît en conséquence moins massive à l'issue de l'alternance de dessiccation-humectation (photo 1), avec une sous-structure polyédrique fine. Malgré ce début de fragmentation, la motte compactée

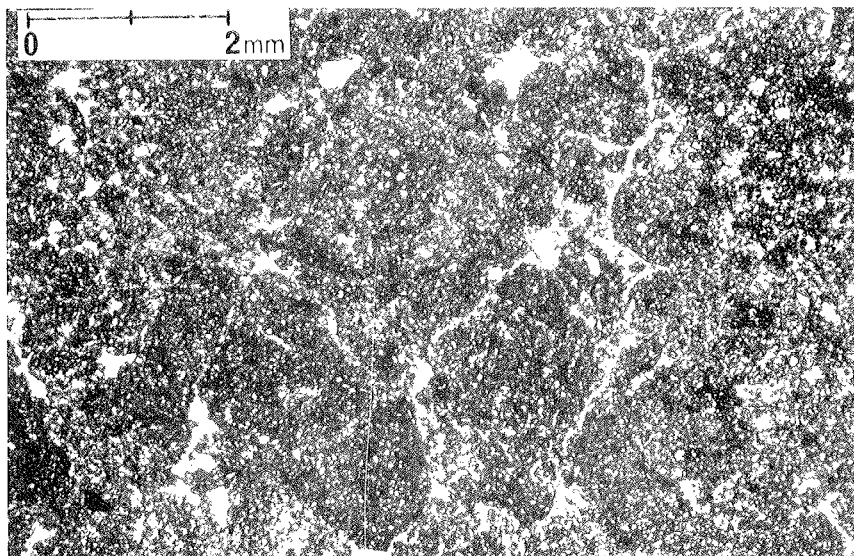


Photo 1 : Motte compactée à W_2 , réhumectée jusqu'à pF 1,5, après une dessiccation jusqu'à pF 6.

Photo 1 : Thin section of silty material following compaction at W_2 , drying to 1000 bar (pF 6) and rewetting to 0.032 bar (pF 1.5). Visible voids are a few ten μm wide.

à W_2 se distingue encore nettement de la motte compactée à W_1 où l'on observe des discontinuités semblables, mais plus nombreuses et qui réindividualisent totalement les agrégats initiaux (photo 2).

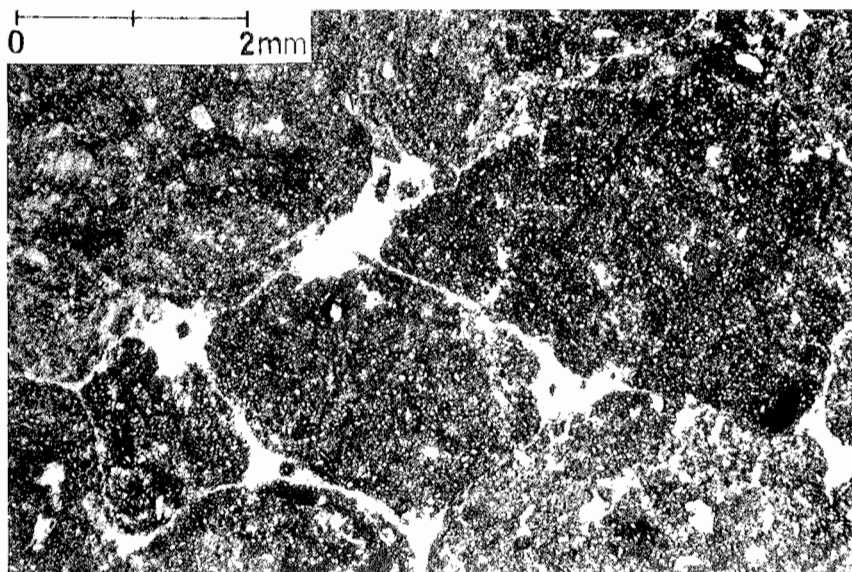


Photo 2 : Motte compactée à W_1 , réhumectée jusqu'à pF 1,5 après une dessiccation jusqu'à pF 6.

Photo 2 : Thin section of silty material following compaction at W_1 , drying to 1 000 bar (pF 6) and rewetting to 0.032 bar (pF 1.5). Voids a few ten μm wide binding packing voids and separating the initial aggregates.

B) Evolution du spectre de porosité du matériau compacté au cours des réhumectations

1) Influence de la dessiccation initiale

Lorsque les deux types de mottes sont réhumectés après une dessiccation intense (pF 6 ou séchage à 105°C : deux seules histoires hydriques pour lesquelles des caractérisations en porosimétrie au mercure ont été effectuées), leur volume de pores de $r_{\text{eq}} < 0,1 \mu\text{m}$ ne varie pas de manière notable. Le gonflement apparaît lié

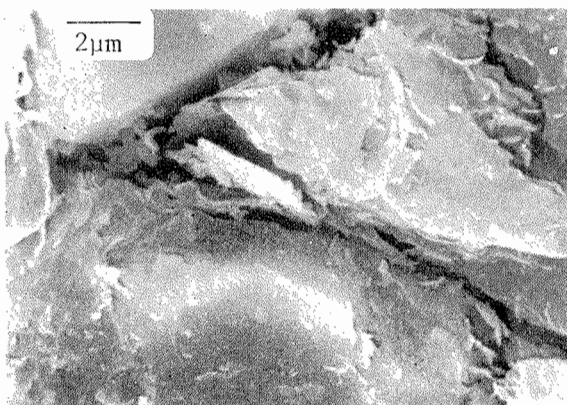


Photo 3 :

Scanning electron microscope photograph of the silty material following compaction at W_2 , drying to 1 000 bar (pF 6) and rewetting to 0.032 bar (pF 1.5). Planes a few μm in size within the clay fraction.

Photo 3 :

Photographie en microscopie électronique à balayage d'une motte compactée à W_2 réhumectée à pF 1,5 après une dessiccation jusqu'à pF 6. Discontinuités de l'ordre du μm au sein de la fraction argileuse.

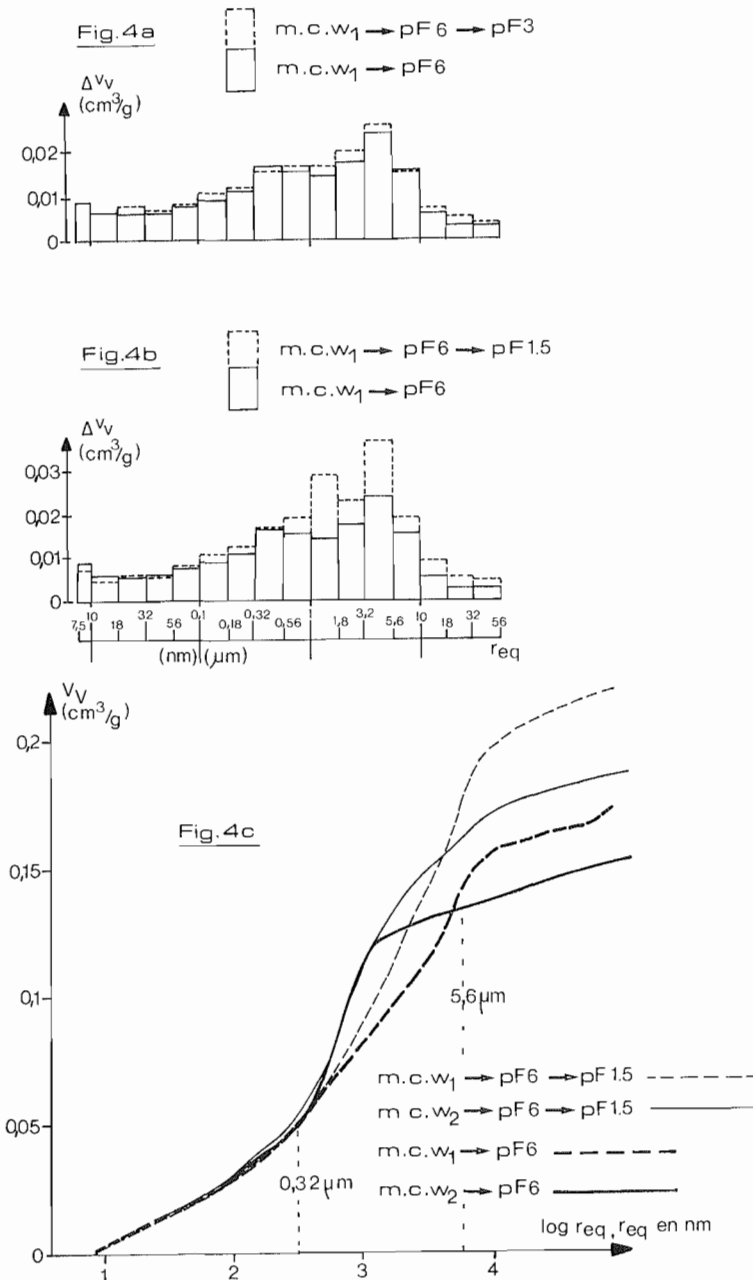


Figure 4 : Influence de la réhumectation jusqu'à pF 3 (fig. 4 a) puis pF 1,5 (fig. 4 b) sur le spectre de porosité de la motte compactée à W₁. Comparaison des courbes cumulées d'injection de mercure des deux types de mottes à l'issue de la dessiccation à pF 6 et après la réhumectation jusqu'à pF 1,5 (fig. 4 c).

Figure 4 : The effect of rewetting to 1 bar (pF 3, Fig. 4 a) and to 0,032 bar (pF 1,5, Fig. 4 b) on the pore size distribution of material compacted at W₁ and dried to 1000 bar (pF 6). Comparison of the cumulative pore size distribution graph of the material compacted at W₁ or W₂ dried to 1000 bar (pF 6) and rewetted to 0.032 bar (pF 1,5, Fig. 4 c).

seulement à un accroissement du volume des pores de $r_{eq} > 0,1 \mu\text{m}$ (figure 4 a et 4 b). Parallèlement, on observe en microscopie électronique à balayage des discontinuités au sein de la fraction argileuse, dont la largeur est de l'ordre du μm (photo 3).

Ces résultats amènent à s'interroger à nouveau sur les risques d'artéfacts liés à la lyophilisation des échantillons préalable à la porosimétrie au mercure comme aux observations microscopiques. La constance du volume des pores de $r_{eq} < 0,1 \mu\text{m}$ pourrait en effet s'expliquer par une contraction des pores les plus fins provoquée par une migration de l'eau au cours de la congélation, ce phénomène étant également à l'origine du développement de pores de l'ordre du μm (LAWRENCE et al., 1979; MURRAY et QUIRK, 1980). Cependant, on observe pour les deux types de mottes que le volume des pores de $r_{eq} < 0,1 \mu\text{m}$ est plus élevé après le compactage qu'à l'issue de la dessiccation ou des réhumectations (figure 2 c et 4 c). Or, les deux types de mottes seulement compactés ont été aussi lyophilisés et leurs spectres de porosité se distinguent nettement de ceux obtenus en réhumectation ; ceci reste valable dans toute la gamme de variation de r_{eq} , même lorsque les teneurs en eau sont comparables (motte compactée à W_2 , figure 4 c).

Aussi, sans nier les risques d'artéfacts, nous pensons que l'évolution de l'espace poral — et donc de la structure — du matériau, provoquée par la dessiccation, n'est pas totalement réversible au cours des réhumectations ultérieures. La constance du volume des pores de $r_{eq} < 0,1 \mu\text{m}$ peut d'ailleurs être attribuée à une agrégation, au cours de la dessiccation, des particules d'argile ; cette agrégation reste largement irréversible au cours des réhumectations ultérieures. Ce phénomène a été décrit par TESSIER et al. (1980) et TESSIER (1984) sur des argiles pures, illite et montmorillonite calciques. Ces auteurs ont également observé des discontinuités qui individualisent des ensembles ou « **domaines** » de particules argileuses dans des échantillons déshydratés par lyophilisation ou par la technique du point critique.

2) Influence du compactage

Les modifications structurales provoquées par le compactage au sein même des agrégats (GRIMALDI, 1986) ne sont pas non plus réversibles au cours des deux réhumectations étudiées. En effet, les distributions de la taille des pores des deux types de mottes se distinguent toujours nettement dans la gamme de r_{eq} comprise entre 0,32 et 5,6 μm (figure 4 c).

Les différences observées entre les deux types de mottes sont compatibles avec les propriétés de rétention d'eau analysées plus loin. Auparavant, nous essaierons de préciser l'influence de la structure du matériau sur son comportement au retrait et au gonflement.

IV. INFLUENCE DE LA STRUCTURE DU MATERIAU SUR SON COMPORTEMENT AU RETRAIT ET AU GONFLEMENT

La structure étant la seule caractéristique qui distingue les trois échantillons (mottes et matériau non compacté) soumis aux alternances de dessiccation-réhumectation, on peut s'interroger sur le niveau d'organisation qui détermine les différences de retrait et de gonflement observées.

Est-ce le mode d'assemblage des agrégats, plus ou moins serré, qui est en cause ? Et/ou les modifications par le compactage de la structure des agrégats eux-mêmes, qui sont partiellement irréversibles avec les variations hydriques ?

a) En ce qui concerne le **retrait**, nous avons comparé à l'état sec (séchage à 105°C) le volume poral intraagrégat du matériau compacté à W_2 , les agrégats étant :

- soit coalescents, constituant des mottes à structure massive (cas normal) ;
- soit réindividualisés, avant la dessiccation, par fragmentation des mottes en agglomérats (comparables à ceux sur lesquels on mesure le volume poral intra-agrégat des mottes) : on élimine ainsi l'influence possible du mode d'assemblage des agrégats sur leur retrait.

Les valeurs obtenues n'étant pas significativement différentes (tableau I), l'intensité du retrait à l'échelle des agrégats est donc indépendante de leur mode d'assemblage.

Comme l'essentiel, sinon la totalité du retrait, se produit entre pF3 et pF4,2, on peut émettre l'hypothèse que le retrait plus intense de la motte compactée à W_2 , par rapport aux agrégats de la motte compactée à W_1 , est lié à la présence d'un volume plus important de pores (de r_{eq} compris entre 1,5 et 0,1 μm) susceptibles de se désaturer entre ces deux potentiels hydriques, mais aussi de se contracter pour qu'il y ait retrait.

Tableau I : Après séchage à l'étuve à 105°C, volume poral intraagregat :

- du matériau non compacté ;
- du matériau compacté à W_2 dont les agrégats sont ou non réindividualisés avant la dessiccation.

Table I : After oven-drying at 105°C, intra-aggregate pore volume of :

- the non-compacted material (v_v^a) ;
- the material compacted at W_2 , aggregates separated or not separated before oven-drying (v_v^{ac}).

	Matériau non compacté v_v^a (cm ³ /g)	Motte compactée à W_2	
		agrégats réindividualisés v_v^{ac} (cm ³ /g)	agrégats coalescents v_v^{ac} (cm ³ /g)
Moyenne	0,1785	0,1576	0,1584
Nombre de mesures	3	4	4
Ecart-type	$4,4 \times 10^{-3}$	5×10^{-4}	4×10^{-3}

A l'échelle de la motte, le retrait est partiellement fonction de l'importance des surfaces de contact entre agrégats et du maintien de ces contacts au cours de la dessiccation, assurant la répercussion du retrait des agrégats à la motte dans son ensemble (cf. III § A 2).

b) En ce qui concerne le gonflement, nous n'avons pas effectué d'expérience comparable. Nous pensons toutefois, en nous référant aux travaux de CHANG et al. (1980) et de ALVAREZ-MARQUES (1974), que le mode d'assemblage des agrégats détermine, au moins partiellement, l'intensité du gonflement des agrégats. Ces auteurs ont en effet montré que les agrégats de sols argileux gonflent moins in situ que lorsqu'ils sont extraits du sol, c'est-à-dire libérés des contraintes mécaniques qu'ils exercent les uns sur les autres lorsqu'ils sont en contact étroit.

Réciproquement, la transmission du gonflement des agrégats à une échelle supérieure est fonction de l'importance des surfaces de contact entre agrégats. A la limite, si ces contacts sont inexistantes, l'augmentation de volume des agrégats s'accompagne d'une diminution équivalente de volume poral interagrégats. Cependant, on a observé en fin de réhumectation (cf. § III A 2) des fissures qui réindividualisent, partiellement ou totalement, les agrégats initiaux dans les deux types de mottes. L'apparition de ces fissures se traduit par un gonflement à l'échelle de la motte, lequel témoigne d'une certaine indépendance entre les gonflements aux deux échelles considérées.

V. CONSEQUENCES DES MODIFICATIONS STRUCTURALES DU MATERIAU SUR SES PROPRIETES DE RETENTION D'EAU

La teneur en eau du matériau, compacté ou non, étant mesurée à chacune des étapes hydriques, en dessiccation et en humectation, il est enfin possible de relier les modifications de structure provoquées par le compactage et les variations hydriques à des changements de propriétés de rétention d'eau du matériau.

A) Résultats

A cause de l'hystérésis de la relation entre le potentiel hydrique et la teneur en eau, qui se manifeste nettement à pF 3 (figure 5), les courbes de rétention d'eau du matériau, avant et après le compactage, ne peuvent être comparées que pour une même histoire hydrique.

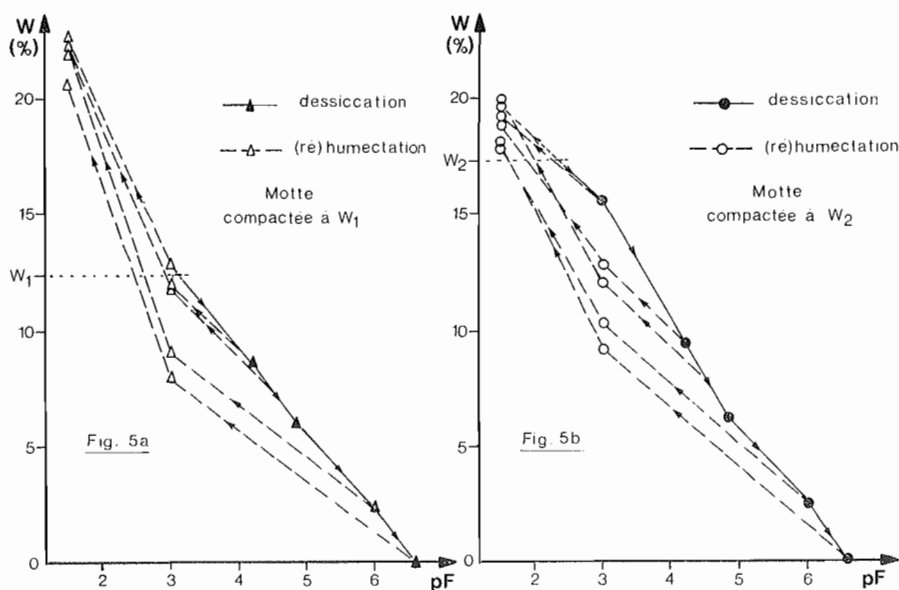


Figure 5 : Courbes de rétention d'eau de la motte compactée à W_1 (fig. 5 a) et de la motte compactée à W_2 (fig. 5 b).

Figure 5 : Water retention graphs of the material compacted at W_1 (Fig. 5 a) or W_2 (Fig. 5 b).

Pour cette raison, et pour ne pas surcharger le graphique, on a reporté sur la figure 6 les valeurs obtenues :

- d'une part, en dessiccation ou humectation, directement après le compactage pour les mottes et à partir de W_2 pour le matériau non compacté ;
- d'autre part, en réhumectation à partir de pF 6 uniquement.

L'influence du compactage s'étend sur une large gamme de pF, comprise entre pF 1,5 et pF 4,2 au moins.

Plus précisément, la masse d'eau retenue à pF 1,5 est d'autant plus élevée que le matériau est moins compact. Au contraire, à pF 3 et pF 4,2, c'est la motte compactée à W_2 qui est la plus humide et la motte compactée à W_1 qui est la moins humide, le matériau non compacté ayant une teneur en eau intermédiaire.

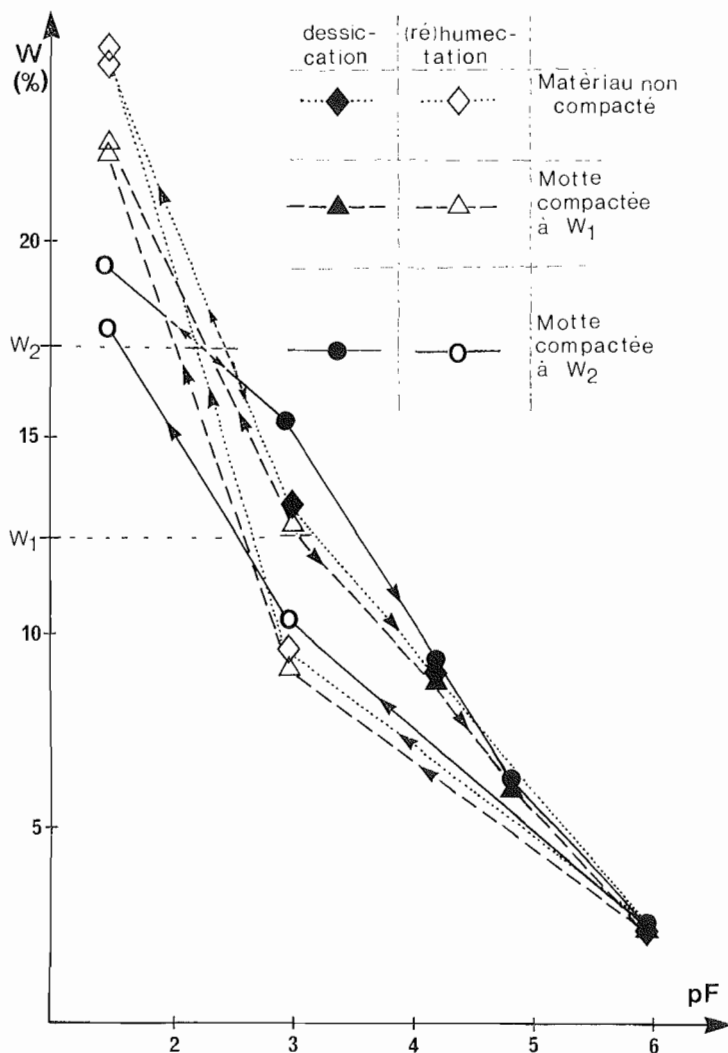


Figure 6 : Comparaison des courbes de rétention d'eau des deux types de mottes et des agrégats non compactés, pour quelques histoires hydriques (dessiccation et humectation à partir de la teneur en eau initiale : W_1 ou W_2 ; réhumectation à partir de pF 6).

Figure 6 : Water retention graphs of the two kinds of compacted clods and of the non-compacted material starting from different initial conditions : drying and wetting from the initial water content, W_1 or W_2 , and rewetting from 1 000 bar (pF 6).

B) Influence des modifications structurales liées au compactage

Les différences de rétention d'eau observées sont la conséquence des modifications structurales provoquées par le compactage et aussi la conséquence de l'évolution différente des mottes et du matériau non compacté au cours des variations hydriques.

a) Ainsi, à **pF 1,5**, ce sont d'abord les différences de gonflement des agrégats dans les trois types d'échantillons qui sont en cause (figure 3). Les agrégats étant saturés en eau, les différences de volume poral interagrégats, dont le remplissage n'est que partiel à ce pF, interviennent également, mais dans une moindre mesure. On a d'ailleurs vu qu'il ne s'agit pas d'un simple remplissage puisque des discontinuités susceptibles d'être remplies d'eau se développent en fin de réhumectation.

b) A **pF 3**, ce sont les modifications par le compactage de l'espace poral intra-agrégat qui expliquent les différences de teneur en eau entre les deux types de mottes et le matériau non compacté. Les porosimétries au mercure effectuées sur ces échantillons permettent de le démontrer :

La taille maximale des pores remplis d'eau à pF 3, évaluée par la loi de JURIN, est de l'ordre de $1,5 \mu\text{m}$. Cette taille peut être nettement sous-estimée en dessiccation à cause des éventuels phénomènes de « **bouteille d'encre** » (1), l'une des causes possibles de l'hystérésis de la relation entre le potentiel hydrique et la teneur en eau. Les phénomènes agissent cependant de la même manière sur la désorption de l'eau et sur la pénétration du mercure (où le vide résiduel joue le rôle de fluide mouillant).

Aussi le volume massique d'eau (noté v_w) d'un échantillon amené en dessiccation à un pF donné doit-il coïncider avec le volume poral susceptible d'être rempli d'eau à ce pF (noté $v_{v,w}$), évalué à partir de la courbe d'injection de mercure (la taille limite des pores pris en compte étant donnée par la loi de JURIN pour l'eau).

Le tableau II permet de comparer :

— d'une part, les valeurs de v_w des deux types de mottes ;

— d'autre part, les volumes de pores de r_{eq} compris entre $7,5 \text{ nm}$ et $1,53 \mu\text{m}$, évalués à partir des porosimétries au mercure des deux types de mottes seulement

Tableau II : Comparaison, pour chaque type d'échantillon compacté ou non, du volume massique d'eau (v_w) à pF 3 et du volume poral susceptible d'être rempli d'eau à pF 3 ($v_{v,w}$) évalué à partir des courbes d'injection de mercure.

Table II : For the three kinds of samples, compacted or otherwise, a comparison of the water volume (v_w) at 1 bar suction (pF 3) and the pore volume likely to be water-filled ($v_{v,w}$) at 1 bar, inferred from the mercury injection graphs.

Echantillons	pF approximatif	v_v (cm^3/g) $7,5 \text{ nm} < r_{eq} < 1,53 \mu\text{m}$ $\approx v_{v,w}$ à pF 3	v_w (cm^3/g) à pF 3
Motte compactée à W_2	2,3	0,154	0,154
Motte compactée à W_1	3,1	0,119	0,128
Agrégats non compactés à W_1	3,3	0,135	0,136

(1) En humectation, l'eau occupe des pores de plus en plus grands au fur et à mesure que la succion diminue. Au contraire, en dessiccation, lorsque des pores présentent des étranglements, c'est la taille de ces derniers qui détermine la succion de vidange de l'ensemble : phénomène dit de « **bouteille d'encre** ».

compactés et du matériau non compacté à W_1 . On voit qu'il ne s'agit que d'une approximation de v_v^w puisque le volume des pores de $r_{eq} < 7,5$ nm, non connu précisément, n'est pas pris en compte ($0,01 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ environ). De plus, ces échantillons ne sont pas en équilibre à pF3 ; leur pF, déterminé par interpolation linéaire entre les deux couples (pF, W) les plus proches, figure dans le tableau II.

Malgré ces sources d'imprécision, on constate un bon accord entre les deux types de mesures. Si l'on considère, par exemple, la motte compactée à W_1 , la plus proche de pF3, l'écart entre v_v^w et v_w est du même ordre que le volume des pores plus petits que 7,5 nm non pris en compte dans V_v^w .

Les différences de rétention en eau observées à pF3 entre les échantillons compactés et non compactés sont donc liées aux différences de distribution de la taille des pores intraagrégats.

Réciproquement, la validité des courbes d'injection de mercure est également vérifiée pour le point particulier d'abscisse $1,53 \mu\text{m}$. Ceci est un élément supplémentaire pour penser que ces résultats ne sont pas totalement faussés par des artefacts liés à la lyophilisation.

CONCLUSION

Une alternance de dessiccation-humectation, quelle que soit l'intensité de la dessiccation, ne parvient pas à effacer les effets du compactage sur la structure du matériau limoneux étudié. Ils ne sont donc pas réversibles dans les limites de notre expérimentation.

Au contraire, les modifications structurales provoquées par le compactage ont une influence sur le comportement au retrait et au gonflement du matériau, dont il résulte une aggravation du tassement au cours des variations hydriques.

Les modifications structurales provoquées par le compactage déterminent donc au sein des agrégats persistents, plus ou moins accentuées, au cours de l'alternance de dessiccation-humectation. Ce sont d'ailleurs ces modifications qui sont responsables des différences de retrait entre les échantillons compactés et non compactés, à l'échelle de l'agrégat. Le mode d'assemblage des agrégats, plus ou moins serré, déterminerait quant à lui, au moins en partie, l'intensité du gonflement des agrégats.

Les modifications structurales provoquées par le compactage déterminent donc en partie l'évolution structurale ultérieure du matériau. Ces modifications ont également pu être reliées à des changements importants de propriétés de rétention d'eau du matériau.

Ces résultats, obtenus en laboratoire, illustrent néanmoins le phénomène de dégradation de la structure des matériaux pédologiques sous l'action conjointe de contraintes mécaniques et hydriques. Les modifications structurales au niveau le plus fin de l'organisation du matériau contribuent fortement à cette dégradation. S'il apparaît nécessaire de préciser leur nature et leurs conditions d'apparition et de réversibilité, il importe aussi de savoir si elles se produisent in situ, en mettant en œuvre des méthodes d'analyses permettant d'accéder à tous les niveaux d'organisation des matériaux. A cet égard, les études de comportement (rétention d'eau, retrait-gonflement) nous paraissent intéressantes car elles apportent à la fois des éléments de caractérisation de la structure et du fonctionnement des sols.

Reçu pour publication : Janvier 1986
 Accepté pour publication : Juin 1986

EFFECTS OF DYNAMIC COMPACTION ON A SILTY SOIL MATERIAL CHANGES IN SHRINKAGE, SWELLING AND WATER RETENTION PROPERTIES

The structural changes in a silty soil material submitted to drying and wetting procedures were measured (bulk density, mercury porosimetry) and observed by both optical and scanning electron microscopy. This material was initially made up of
 Association Française pour l'Etude du Sol - www.afes.fr - 2010

aggregates 2-5 mm in size, and compacted at two different water contents (GRIMALDI, 1986).

It is shown that the structural changes produced by compaction are not reversible under the effect of hydric variations; rather they become accentuated :

— At the macroscopic level, the structure of compacted samples changes insignificantly; only slight fragmentation of the initially massive samples occurs at the end of rewetting and when the previous drying has been thorough (photos 1 and 2);

— However, the more the compaction carried out at a higher water content, the more the aggregates shrink during drying and the less they swell during rewetting. Consequently, the compacted and non-compacted samples remain different, not only in their inter-aggregate pore volume (as after compaction), but also by their intra-aggregate pore volume (Fig. 1 and 3).

— Finally, the alteration of the intra-aggregate pore size distribution is more or less accentuated, depending on maximal drying suction (Fig. 2 and 4). This alteration, concerning the elementary particles' organization is responsible for the differences in shrinkage obtained between the various samples, compacted or otherwise (Table I). On the other hand, the swelling of the aggregates depends on their more or less tight assemblage.

The structural changes of this soil material, produced by compaction, therefore partly determine its future structural evolution. It is also shown that these structural changes have an influence on the water retention properties of the material (Figures 5 and 6) :

— For the lower suctions (0.032 bars or pF 1.5), water retention depends on inter-aggregate porosity, which is influenced by swelling of the water saturated aggregates ;

— For higher suctions (≤ 12 bars, pF 3 or pF 4.2), water retention is linked to intra-aggregate pore size distribution (Table II).

BIBLIOGRAPHIE

- ALVAREZ-MARQUES J.L., CONCARET J., GUYOT J. et JACQUIN M. (1974). — Etude en laboratoire de la percolation de l'eau à travers des sols soumis à diverses contraintes. C.R. Acad. Agric. France, pp. 693-701.
- CHANG R.K. et WARKENTIN B.P. (1968). — Volume change of compacted clay soil aggregates. Soil Sci., 105, pp. 106-111.
- FIES J.C. (1978). — Porosité du sol, étude de son origine texturale. Thèse Doct. ès Sci. U.L.P. Strasbourg, 145 p.
- GRIMALDI M. (1981). — Contribution à l'étude du tassement des sols : Evolution 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. (1986). — Effets d'un compactage dynamique sur un matériau limoneux. Modifications de sa structure. Sci. sol 24, pp. 269-284.
- HAINES W.B. (1928). — The volume changes associated with variation of water content in soil. J. Agricul. Sci., 18, pp. 296-310.
- LAWRENCE G.P., PAYNE D. et GREENLAND D.J. (1979). — Pore size distribution in critical point and freeze-dried aggregates from clay subsoils. J. of Soil Sci., 30, pp. 499-516.
- 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.
- TESSIER D. et BERRIER J. (1979). — Utilisation de la microscopie électronique à balayage dans l'étude des sols. Observations de sols humides soumis à différents pF. Sci. Sol, 1, 67-82.
- TESSIER D., PEDRO G. et CAMARA L. (1980). — Sur le comportement hydrique et l'évolution de l'organisation des argiles (kaolinites et smectites) au cours de la dessiccation et de la réhumectation. C.R. Acad. Sci., Paris, t. 290, série D, 1169-1172.
- 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.

Annexe 1 : Evolution du volume poral (v_v , $\text{cm}^3/100 \text{ g}$) au cours de la dessiccation et de la réhumectation à partir de pF6. Valeurs correspondant aux figures 1 et 3.

Appendix 1 : Variation during the drying and rewetting from 1000 bar (pF6) of pore volume. Values corresponding to figures 1 and 3.

Motte compactée à W_1			Motte compactée à W_2			agrégats non compactés		
pF	W (%)	$\frac{\bar{v}_v^c}{v_v}$	v_v^m	W (%)	$\frac{\bar{v}_v^c}{v_v}$	v_v^m	W (%)	$\frac{\bar{v}_v^a}{v_v}$
?	$W_1 = 12,4$		20,91	$W_2 = 17,3$		19,81	13	
		20,03			19,52			19,87
			20,81			19,36		
4,2	8,6		21,15	9,4		16,25	9,4	
		17,92			16,30			19,07
			20,51			16,92		
4,85	6,0		21,15	6,2		16,25		
		17,87			16,03			
			19,68			16,92		
6	2,5		20,44	2,3		16,95	2,7	
		17,33			16,16			18,54
			20,01			16,57		
6,6	0		19,84	0		16,22		
		17,31			16,41		0	18,22
			20,44			16,59		
pF 6 → 3	9,0		21,95	10,3		17,70		
		17,86			16,84		9,5	19,48
			21,50			17,91		
pF 6 → 1,5	22,2		23,21	17,8		19,45		
		20,77			18,49		26,4	25,02
			23,25			19,88		

Annexe 2 : Porosimétrie au mercure : valeurs de v_v correspondant aux figures 2 a et b, et 4 a et b.

Appendix 2 : Mercury porosimetry : v_v values corresponding to figures 2 a and b, and 4 a and b.

		Δv_v (cm ³ /100 g)								
r_{eq}	$\log r_{eq}$	Motte	Motte	Motte	Motte	Motte	Motte	Motte	Motte	
(en mm)	(r_{eq} en nm)	:C. à W ₁	:C à W ₁	:C. à W ₁	:C. à W ₂	:C. à W ₁	:C à W ₂	:C. à W ₁	:C. à W ₂	
		→ pF 6	→ pF 6	→ pF 6	→ pF 6	→ pF 6,6	→ pF 6,6	→ pF 6,6	→ pF 2,66	
			→ pF 3	→ pF 1,5	→ pF 1,5			→ pF 1,5	→ pF 1,5	
7,5	0,875		0,88	0,89	0,73	0,50	0,80	0,52	0,55	0,77
10	10		0,60	0,63	0,49	0,68	0,59	0,64	0,57	0,52
18	1,25		0,59	0,78	0,63	0,65	0,65	0,61	0,69	0,57
32	1,5		0,60	0,66	0,57	0,64	0,66	0,54	0,74	0,58
56	1,75		0,77	0,84	0,79	0,82	0,74	0,71	0,45	0,80
100	2,0		0,92	1,09	1,08	0,99	1,03	1,02	1,52	1,32
180	2,25		1,13	1,22	1,26	1,35	0,98	1,09	1,31	1,35
320	2,5		1,69	1,58	1,71	2,28	1,34	2,39	2,14	2,63
560	2,75		1,56	1,67	1,94	3,15	1,39	3,99	2,40	4,58
1 (µm)	3,0		1,46	1,66	2,91	2,52	1,85	1,17	2,07	2,15
1,78	3,25		1,78	2,00	2,34	1,44	2,30	0,57	2,22	0,89
3,16	3,5		2,42	2,58	3,71	1,39	2,65	0,36	1,98	0,69
5,62	3,75		1,58	1,53	1,94	0,83	1,24	0,41	1,37	0,48
10	4,0		0,59	0,71	0,95	0,68	0,78	0,39	0,93	0,28
17,8	4,25		0,31	0,51	0,59	0,38	0,55	0,32	0,61	0,37
31,6	4,5		0,29	0,38	0,52	0,32	0,52	0,36	0,46	0,36
56,6	4,75									
100	5,0						0,31	0,24		