

Importance de l'état énergétique de l'eau sur l'aptitude au tassement de matériaux argileux non saturés

Georges-Henri SALA et Daniel TESSIER

Résumé — Il existe un domaine de potentiel de l'eau (~ -30 à ~ -100 kPa) où les forces capillaires contribuent au rapprochement des agrégats de sols et provoquent ainsi le compactage des matériaux. L'application d'une contrainte mécanique supplémentaire ne fait qu'amplifier le tassement préalablement induit par les forces d'hydratation.

Importance of the energy state of water on compaction of unsaturated clayey soil materials

Abstract — Over the range of -30 to -100 kPa, capillary forces acting between soil aggregates provoke an increase of the material's compactness. Mechanical stress just amplifies compaction previously induced by hydration forces.

Abridged English Version — Soil materials are mainly characterized by the presence of large pore spectra capable of retaining water available to plants and permitting gravitational water movement in the soil. Consequently, the soil is generally unsaturated, and the water pressure is lower than the atmospheric pressure [1]. In general, as the pore space of a soil is reduced, a degradation of the physical properties occurs as well as a decrease of fertility in numerous soils of temperate climate and tropical areas ([2], [3]). Many studies have been conducted on the compaction due to the heavy equipment used for tillage or deforestation, and its detrimental effect on soil. The water content at which any soil material is particularly subject to compaction has been determined [4]. Few works, however, have taken into account the energy state of water and its associated hydration forces in soil pore space. This Note deals with the effects of the energy state of water on soil compaction mechanism, as an attempt to better understand and predict the behaviour of soil as it occurs in nature.

MATERIALS AND METHODS. — Two clay materials were studied. The first was collected from the B horizon of a clayey-loamy soil from the Versailles area (France) and the second was a kaolinitic material from St-Austell (Great Britain). Crumbs of the B horizon were oven dried at 105°C . A paste of St-Austell kaolinite was prepared and subsequently dried in the same conditions. Aggregate beds were prepared by fragmenting and sieving the materials. After full wetting, aggregate beds were put at various water potentials by applying a gas pressure in an apparatus especially designed for the experiments [5] (Fig. 1a). At each water potential, a one-dimensional mechanical pressure was subsequently exerted by applying a gas pressure above the piston. The apparatus thus works as an oedometer (Fig. 1b).

RESULTS AND DISCUSSION. — The volume changes produced by the application of a one dimensional pressure are illustrated in Figure 2a and b. The curves were obtained at water potentials between 0 and -200 kPa. The compression curves show that the major compacting effect was obtained between 0 and 200 kPa. Furthermore, the materials prepared at water potentials of -30 to -100 kPa were those presenting lower apparent volumes. The volume change curves also indicate that the material compressibility is maximum over a very short range of water content values, namely 0.5 and 0.2 cm^3/g for kaolinite and B horizon,

Note présentée par Georges PÉDRO.

respectively, and corresponding to similar water potential values (-30 to -100 kPa). Thus, in unsaturated clayey materials, it can be concluded that the compression behaviour of soils is above all dependent upon the energy state of water rather than the water content. In addition, as similar volume changes were observed when no mechanical pressure was applied, mechanical pressure only amplifies an effect due to hydration forces.

The question is now what real influence a mechanical pressure can play on sample organization of unsaturated soil materials. The aggregate beds under study roughly define two types of porosity. The first one is due to clay particle arrangement inside aggregates, the second results from the assemblage of aggregates. In the range of the water potentials studied, *i.e.* above -200 kPa, the pores of the clay matrix are necessarily saturated with water [6]. On the basis of Jurin-Laplace equation we can calculate the curvature radius and the associated pore sizes which are filled with water according to water potential. Between -30 and -100 kPa, pore sizes range from 10 to 1 μm , approximately. We can conclude for water potentials lower than -100 kPa, (pores < 1 μm), that the inter-aggregate space is empty and that capillary forces *cannot* act in compacting the system. For water potentials higher than -30 kPa (pores $> \sim 10$ μm), the pore space can be largely filled with water and it appears that curvature radii of menisci are too large to collapse the system. Finally, only intermediate menisci (1 to 10 μm), can contribute significantly to increase material compactness.

CONCLUSIONS. — Water potential plays a major role in the reorganization of unsaturated soil materials. Capillary forces largely govern both volume change and water retention in the range of high water potentials. As opposed to highly saturated and very dry materials, materials with water potentials of -30 to -100 kPa ($pF=2.5-3.0$) are very easily compacted. These results need to be confirmed but, from a practical point of view, it appears that soils at field capacity (water pressure ~ -5 kPa, [7]) are not really sensitive to compaction. Conversely, soils at water potentials of -30 to -100 kPa seem to be more questionable as far as soil degradation is concerned.

1. INTRODUCTION. — Les matériaux pédologiques sont caractérisés avant tout par la présence d'un spectre poral relativement macroscopique susceptible de retenir l'eau utilisable par les plantes et de permettre par ailleurs l'écoulement de l'eau par gravité. De ce fait, le sol est généralement un milieu *non* saturé, au sein duquel la pression de l'eau est alors inférieure à la pression atmosphérique [1]. Aussi toute réduction du spectre macro-poral est presque toujours à l'origine d'une dégradation des propriétés physiques. Il est admis aujourd'hui que cette réduction est l'une des causes actuelles de la baisse de fertilité de nombreux sols, et ce, sous climat tempéré comme dans les régions tropicales ([2], [3]). Parmi les facteurs de dégradation, la mécanisation des travaux agricoles et sa conséquence *le tassement* a fait l'objet de nombreux travaux. Ceux-ci ont montré que pour un matériau donné, il existe un seuil de teneur en eau à partir duquel un matériau devient sensible au tassement [4]. Les travaux de recherche antérieurs font cependant peu référence à l'état énergétique de l'eau et au rôle des forces d'hydratation dans le comportement et l'évolution du spectre poral des sols. L'objectif de cette Note est de montrer l'importance de l'état énergétique de l'eau sur le mécanisme du tassement, de façon à mieux comprendre et ainsi à prévoir le comportement des sols.

2. MATÉRIAUX ET MÉTHODES. — L'étude a porté sur deux matériaux argileux, le premier est représentatif des argiles des plateaux du nord de la France et provient de l'horizon Bt du sol lessivé limoneux de Versailles; il est constitué d'un mélange de 25 % de kaolinite, 25 % d'argile micacée (illite) et 35 % d'argiles 2:1 à caractère expansible (2/3 de smectite et 1/3 de vermiculite). Le second matériau est formé par une kaolinite très pure provenant du gisement de St-Austell en Grand-Bretagne. Des mottes de l'horizon B de Versailles ont été séchées à l'air puis à l'étuve à 105°C. Pour les besoins de l'étude, la kaolinite de St-Austell a d'abord été préparée sous la forme de pâte. Elle a par la suite été amenée à dessiccation par séchage à l'étuve à 105°C. Les matériaux ont ensuite été fragmentés dans un mortier et des massifs d'agrégats de 0,1-0,5 mm et 0,1-2 mm ont été préparés par tamisage. Les massifs d'agrégats ont été par la suite humectés par capillarité pendant la nuit, puis portés à des potentiels de l'eau définis, depuis -10 jusqu'à -200 kPa dans un dispositif spécialement mis au point (fig. 1 a). A cet effet, en maintenant le piston en position haute, la pression de gaz a d'abord été appliquée directement sur le matériau, permettant de fixer le potentiel de l'eau [5]. Dans une seconde phase, le piston a été abaissé isolant ainsi, du fait du joint d'étanchéité, les chambres haute et basse du dispositif. La pression de gaz exercée sur le piston transmet une pression mécanique

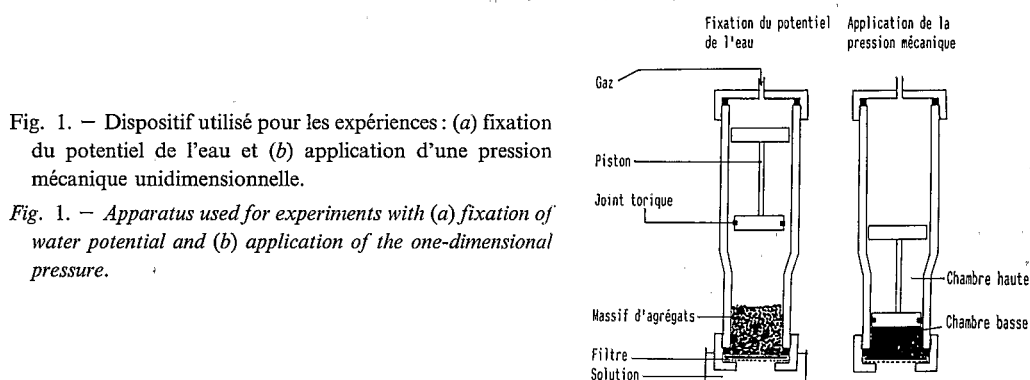


Fig. 1. — Dispositif utilisé pour les expériences: (a) fixation du potentiel de l'eau et (b) application d'une pression mécanique unidimensionnelle.

Fig. 1. — Apparatus used for experiments with (a) fixation of water potential and (b) application of the one-dimensional pressure.

unidimensionnelle sur l'échantillon (fig. 1 b). La cellule fonctionne alors comme un œdomètre qui présente cependant l'avantage d'avoir pu fixer l'état hydrique de départ de l'échantillon, puis la compression mécanique jusqu'à 1 600 kPa. Notons que dans les expériences réalisées chaque point de mesure correspond au moins à trois répétitions et que le volume apparent et la teneur en eau des échantillons ont été rapportés à leur masse sèche (référence 105°C).

3. RÉSULTATS. — Les courbes de changement de volume des échantillons en fonction de la pression mécanique unidimensionnelle sont présentées figure 2 a et b. Chaque courbe correspond à un état hydrique initial allant de 0 à -200 kPa. Quel que soit cet état hydrique initial, les courbes de compression mécanique présentent le même aspect, l'essentiel du tassement étant obtenu entre 0 et 200 kPa environ. Les matériaux préparés au départ à des potentiels de l'eau de -30 et -100 kPa sont aussi ceux qui présentent ensuite, à toutes les pressions mécaniques, les plus faibles volumes apparents.

4. DISCUSSION. — Elle portera sur le rôle du potentiel de l'eau, et en conséquence des forces d'hydratation, sur le tassement de matériaux à organisation hétérogène.

— L'étude de l'évolution du volume massique en fonction du contenu en eau initial et des pressions mécaniques appliquées indique que les matériaux présentent des valeurs

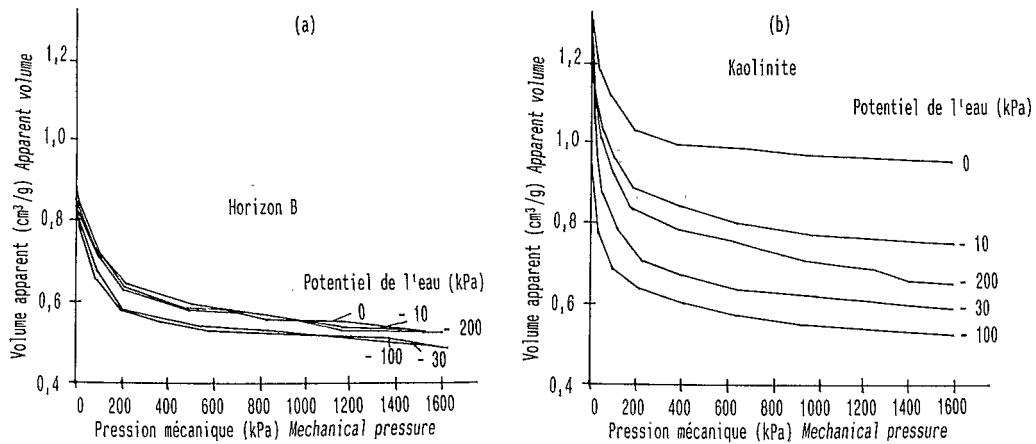


Fig. 2. — Courbes de compression obtenues sur des massifs d'agrégats pour l'horizon B de Versailles (a) et la Kaolinite de St-Austell (b).

Fig. 2. — Compression curves obtained on aggregate beds prepared at various water potentials with (a) Versailles B horizon and (b) St-Austell kaolinite.

minimales de volume massique pour une gamme de teneur en eau initiale très resserrée, propre à chaque matériau. Elle est centrée respectivement sur 0,5 et 0,2 cm³/g pour la

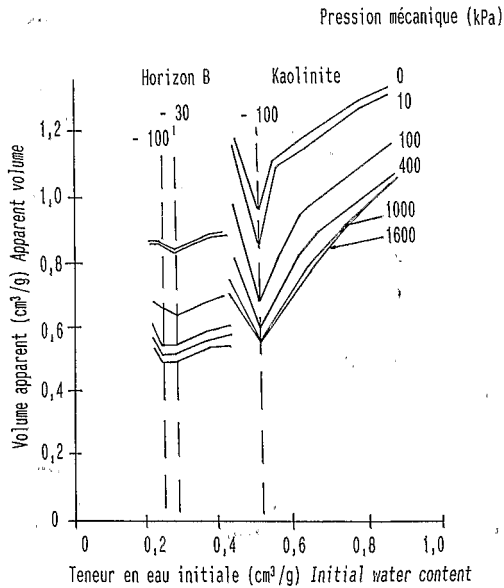


Fig. 3. — Évolution du volume apparent en fonction de la teneur en eau et importance du potentiel de l'eau sur le tassement.

Fig. 3. — Apparent volume change as a function of water content and size of the water potential on compaction.

kaolinite et pour l'horizon B (fig. 3). En rapportant les résultats du tassement au potentiel de l'eau dans les échantillons (fig 3), il apparaît que ces valeurs minimales de volume massique sont obtenues pour des valeurs de potentiels de l'eau initiaux très similaires: -30 à -100 kPa. Beaucoup plus que la teneur en eau, c'est donc l'état énergétique de l'eau qui doit être considéré, dans les matériaux non saturés, comme une variable essentielle du comportement rhéologique.

Par ailleurs, il apparaît qu'à pression mécanique nulle le volume massique apparent des matériaux est aussi minimal pour des potentiels de l'eau de -30 à -100 kPa. La

compression mécanique influe donc peu sur la forme de la courbe de variation de volume des échantillons et ne fait qu'amplifier le tassement préalablement induit par les forces d'hydratation.

— La question est alors de savoir quelle part jouent respectivement les contraintes hydriques et mécaniques dans la réorganisation des matériaux *non* saturés d'eau. Les massifs d'agrégats étudiés présentent l'avantage de pouvoir définir deux types de porosité très tranchée. La première résulte de l'arrangement des particules argileuses, il s'agit de la porosité intra-agrégat. Dans le domaine de potentiel de l'eau étudié ($\sim > -200$ kPa), les pores concernés, c'est-à-dire les pores de la matrice argileuse, sont largement ou complètement saturés d'eau [6]. La seconde est délimitée par l'empilement des agrégats. Connaissant le potentiel de l'eau, la loi de Jurin-Laplace permet d'approcher l'ordre de grandeur des rayons de courbure des ménisques capillaires à l'interface solide-liquide-gaz, qui est d'ailleurs du même ordre de grandeur que la taille des pores concernés.

Entre -30 et -100 kPa, la taille de pores est comprise entre 10 et $1 \mu\text{m}$ environ, elle est donc de taille suffisante pour assurer une certaine continuité du film d'eau entre les agrégats. Les rayons de courbure des ménisques étant en outre relativement petits, ces derniers sont susceptibles d'exercer une forte traction sur les parois des agrégats. Les conditions sont alors réunies pour que les forces capillaires provoquent le rapprochement des agrégats et induisent au total une réduction du volume macroscopique.

Pour les potentiels de l'eau inférieurs à -100 kPa, en revanche, le rayon de courbure des ménisques est $< \sim 1 \mu\text{m}$. De ce fait, l'espace inter-agrégat est nécessairement vide d'eau et les forces capillaires n'interviennent plus dans le rapprochement des agrégats. Elles assurent cependant une forte cohésion aux agrégats.

Enfin, aux potentiels de l'eau > -30 kPa, les rayons de courbure sont toujours $> \sim 10 \mu\text{m}$. L'eau occupe alors une grande partie de l'espace inter-agrégat. Dans ces conditions, le rayon de courbure des ménisques est trop grand pour que les forces capillaires soient susceptibles d'exercer une traction suffisante sur les parois des agrégats. En outre, comme les matériaux sont alors fortement saturés d'eau et la compression mécanique appliquée pendant un court laps de temps, ils sont largement incompressibles [4]. Le rapprochement des agrégats et, par voie de conséquence, le tassement ne se produit pas.

Il existe donc un domaine de potentiel de l'eau initial déterminé, entre -30 et -100 kPa, où les forces capillaires peuvent contribuer de façon significative au rapprochement des agrégats et ainsi provoquer un tassement ou à la prise en masse d'échantillons de sols non saturés d'eau. La compression mécanique entraîne une réorganisation supplémentaire, largement pré-orientée par le potentiel hydrique de départ. La connaissance du rôle du potentiel de l'eau, lors de l'application de la compression mécanique, reste cependant à déterminer dans la mesure où son contrôle n'a pas été possible.

5. CONCLUSION. — Il ressort de l'étude du tassement que le potentiel de l'eau initial joue un rôle décisif dans la réorganisation des matériaux de sols non saturés soumis à des contraintes mécaniques. Les forces capillaires gouvernent à la fois les variations de volume et la rétention de l'eau. Ce ne sont pas les matériaux saturés d'eau, ni les matériaux les plus secs qui sont les plus sensibles au tassement, mais bien ceux dans lesquels le potentiel de l'eau est de l'ordre de -30 à -100 kPa ($pF=2,5$ à 3). Ces premiers résultats obtenus, sur des massifs d'agrégats, devront être confirmés sur d'autres types d'échantillons, en particulier des matériaux naturels non remaniés. Ils ouvrent cependant de nouvelles perspectives dans la connaissance du tassement des sols. D'ores

et déjà, si l'on se place d'un point de vue pratique, il apparaît par exemple que la teneur en eau des sols à la capacité au champ, ([7], ~ -5 kPa, $pF = \sim 1,7$), ne correspond probablement pas à la zone d'humidité la plus sensible au tassement. En revanche, dès la première phase du dessèchement (-30 à -100 kPa), les conditions sont vraisemblablement réunies pour que le sol devienne très sensible au tassement.

Note remise le 22 juin 1992, acceptée après révision le 10 novembre 1992.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] W. R. JURY, W. R. GARDNER et W. H. GARDNER, *Soil Physics*, J. Wiley éd., 1991, 328 p.
- [2] M. GRIMALDI, Changement des propriétés de retrait, de gonflement et de rétention d'eau d'un matériau soumis à un compactage dynamique, *Science du sol*, 24, 1986, p. 269-284.
- [3] A. CHAUVEL, M. GRIMALDI et D. TESSIER, Changes in soil pore-space distribution following deforestation and revegetation: An example from Central Amazon Basin, Brazil, *Forest Ecology and Management*, 38, 1991, p. 259-271.
- [4] A. FAURE, Comportement des sols au compactage: rôle de l'argile et conséquences sur l'arrangement des grains, *Thèse*, Univ. Grenoble, 1978, 137 p.
- [5] D. TESSIER, Étude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux, *Thèse*, Univ. Paris-VII, I.N.R.A., Versailles éd., 361 p.
- [6] D. TESSIER, A. LAJUDIE et J. C. PETIT, Relation between the macroscopic behavior of clays and their microstructural properties, *Applied Geochemistry*, 1, 1992, p. 151-161.
- [7] D. G. M. HAAL, M. J. REEVE, A. J. THOMASSON et V. F. WRIGHT, Water retention porosity and density of field soils, *Soil Survey Tech. Monogr.*, n° 9, Rothamsted Experimental Station, Harpenden, Grande-Bretagne, 75 p.

G.-H. S.: ORSTOM, 2051, avenue du Val-de-Montferrand, 34032 Montpellier Cedex;

D. T.: I.N.R.A., Station de Science du Sol, 78026 Versailles.