

ROLE DE L'ETAT ENERGETIQUE DE L'EAU DANS LE TASSEMENT ET MODELISATION DE LA RETENTION DE L'EAU DES MATERIAUX ARGILEUX NON SATURES

Georges-Henri SALA*

INTRODUCTION.

De nombreux travaux ont montré que les matériaux deviennent sensibles au tassement au-delà d'un seuil de teneur en eau caractéristique de chacun [1], mais peu font cependant 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 ; par ailleurs, des tentatives ont été faites pour prévoir la rétention d'eau de matériaux argileux [2], mais les modèles proposés ne sont pas suffisamment généraux pour prévoir leurs propriétés avec certitude : les argiles peuvent avoir différents comportements physiques selon leur environnement géochimique ou leur histoire énergétique [3]. L'objectif de cet exposé est de montrer d'une part l'importance de l'état énergétique de l'eau sur le mécanisme du tassement et l'existence d'un seuil, d'autre part sur quelles bases la rétention de l'eau par un matériau argileux quelconque peut être interprétée en vue de l'élaboration d'un modèle de prévision.

1.- MATERIAUX ET METHODES.

Une étude expérimentale a été réalisée sur des mottes de l'horizon Bt d'un sol lessivé limoneux de Versailles constitué à 85% d'un mélange d'argiles, et sur la kaolinite du gisement de St Austell en Grande Bretagne

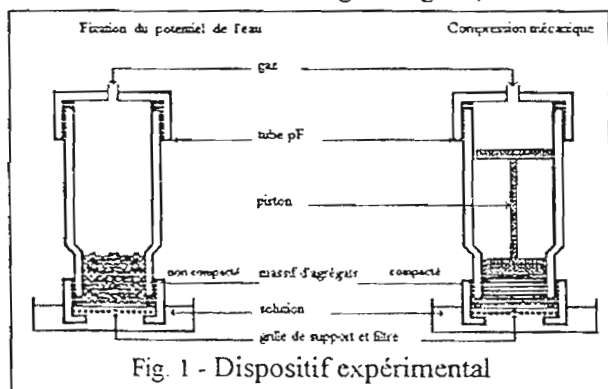


Fig. 1 - Dispositif expérimental

préparée sous forme de pâte. Les deux matériaux ont été séchés à l'air ou à l'étuve à 105°C, puis fragmentés, et des massifs d'agrégats de 0,1-0,5 et 0,1-2 mm ont été préparés par tamisage. Ceux-ci ont été humectés par capillarité puis portés à des pressions de succion de 0 à 200 kPa dans un dispositif (fig. 1) dans lequel la pression de gaz est d'abord appliquée directement sur le matériau, permettant de fixer le potentiel de l'eau [3] ; puis une pression mécanique unidimensionnelle variant de 0 à 1600 kPa lui a été appliquée. La cellule fonctionne alors comme un oedomètre dans lequel l'état hydrique initial de l'échantillon puis la compression

mécanique sont fixés. Volume apparent et contenu en eau des échantillons sont rapportés à la masse sèche (105°C).

Pour l'étude de la rétention de l'eau, 41 séries expérimentales de différents matériaux ont été exploitées : argiles 2:1 [smectites de basse (Montmorillonite du Wyoming MW et Grecque MG) et de haute (Smectite de Béthonvilliers SB) charge foliaire, interstratifiées (Argiles du Bt du sol de Versailles Arg BV) et illites (Illite du Puy IP)] ; argiles 1:1 (Halloysite de Guadeloupe HG, Kaolinite de Saint-Austell KSA et Kaolinite de Provins KP) ; sols argileux (horizon BV, horizons A et B d'un latosol du Brésil LAT). Certains échantillons ont été préparés sous forme de pâte (p) avec différents cations saturant la solution (Na, K, Ca, Mg ; 10⁻³M) ; d'autres, préalablement séchés à l'air ou à l'étuve, ont été tamisés en massifs d'agrégats (0,1-0,5mm : 1 ; 0,1-2mm : 2 ; 2-3mm : 3) ; un est une motte naturelle centimétrique (m). Tous ont été préparés à des potentiels de l'eau variés entre 0 et 1000 kPa et leur volume massique d'eau à 105°C (cm³ / g solide) systématiquement mesuré.

2.- TASSEMENT ET ETAT ENERGETIQUE DE L'EAU.

21.- Résultats et discussion. Les variations de volume des échantillons, fonction de la pression mécanique, sont présentées fig. 2 a, b. Chacune correspond à une succion allant de 0 à 200 kPa.

Quel que soit l'état hydrique initial, les courbes présentent le même aspect, l'essentiel du tassement étant obtenu entre 0 et 100 kPa environ. Les matériaux préparés à des potentiels de l'eau initiaux de -30 et -100 kPa sont ceux qui présentent, à toutes les pressions mécaniques, les plus faibles volumes apparents.

La fig. 3, qui représente la variation des volumes apparents en fonction de la teneur en eau initiale, montre que les minimums de volume apparents sont obtenus pour une gamme de teneur en eau initiale, propre à chaque matériau, centrée respectivement sur 0,5 (kaolinite) et 0,25 cm³/g (horizon B), valeurs qui correspondent en fait à des potentiels de l'eau initiaux très similaires : -30 kPa à -100 kPa.

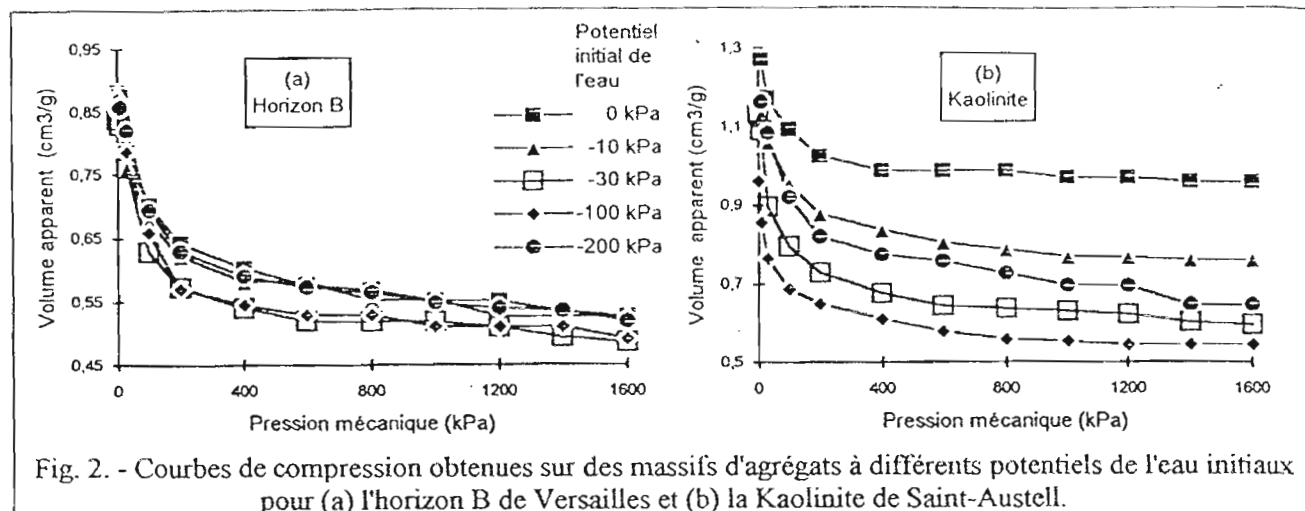


Fig. 2. - Courbes de compression obtenues sur des massifs d'agrégats à différents potentiels de l'eau initiaux pour (a) l'horizon B de Versailles et (b) la Kaolinite de Saint-Austell.

Plus que la teneur en eau, c'est donc l'état énergétique de l'eau qui doit être considéré comme une variable essentielle du comportement dans les matériaux non saturés. Par ailleurs, à pression mécanique nulle, le

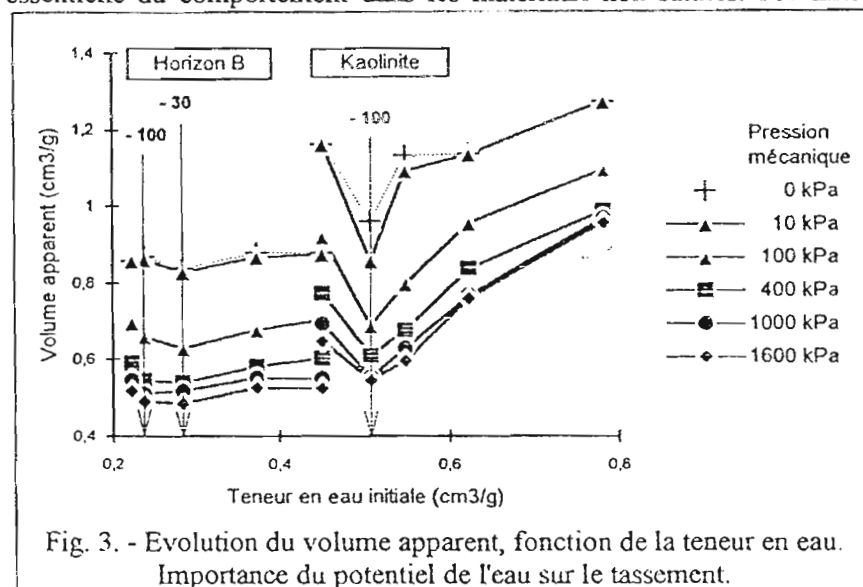


Fig. 3. - Evolution du volume apparent, fonction de la teneur en eau. Importance du potentiel de l'eau sur le tassement.

volume massique apparent des matériaux est aussi minimal pour des potentiels de l'eau de -30 à -100 kPa (fig. 3).

La compression mécanique influe donc peu sur la forme de la variation de volume des échantillons et ne fait qu'amplifier le tassement préalablement induit par les forces d'hydratation. La question est de savoir quelle part jouent respectivement les contraintes hydriques et mécaniques dans la réorganisation des matériaux non saturés d'eau.

Les massifs d'agrégats présentent deux types de porosité: la

première, résultant de l'arrangement des particules argileuses, est la porosité intra-agrégat qui, dans le domaine de potentiel de l'eau étudié ($\sim > -200$ kPa), est saturée d'eau [4]; la seconde, délimitée par l'empilement des agrégats, est la porosité inter-agrégats.

* Entre -30 et -100 kPa, les rayons de courbure des ménisques capillaires, compris (d'après la loi de Jurin-Laplace) entre 10 et $1,5 \mu\text{m}$ environ, suffisamment petits pour assurer la continuité du film d'eau entre les agrégats, sont susceptibles d'exercer une forte traction sur les parois des agrégats et les forces capillaires de provoquer leur rapprochement et une réduction du volume apparent.

* Pour les potentiels de l'eau < -100 kPa, le rayon de courbure des ménisques est $< \sim 1,5 \mu\text{m}$. L'espace inter-agrégat est alors vide d'eau et les forces capillaires, qui n'interviennent plus dans le rapprochement des agrégats, leur assurent cependant une forte cohésion.

* Aux potentiels de l'eau > -30 kPa, la taille des pores est $> \sim 10 \mu\text{m}$. L'eau occupe alors une grande partie de l'espace inter-agrégat. Le rayon de courbure des ménisques est alors trop grand pour que les forces capillaires puissent 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 incompactables [1].

22.- Conclusion. Le potentiel de l'eau initial joue donc un rôle décisif dans la réorganisation de matériaux non saturés de sols, soumis à des contraintes mécaniques qui n'entraînent qu'une réorganisation supplémentaire. Les forces capillaires gouvernent à la fois les variations de volume et la rétention de l'eau. Ces premiers résultats tendent à montrer que la teneur en eau des sols à hauts potentiels (< -5 kPa) [5], 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, soit $pF = 2.5$ à 3), les conditions apparaissent réunies pour que le sol devienne très sensible au tassement.

3.- RETENTION DE L'EAU.

31.- Etablissement d'une loi de comportement.- On sait que les pores ne contiennent plus d'eau au-delà d'une pression de succion >100 kPa environ (potentiel de l'eau < -100 kPa). Cette pression S_0 peut être considérée comme un point singulier de la courbe de rétention d'eau, délimitant les deux types d'espaces poreux.

La figure 4 montre les variations de contenu en eau de différents matériaux argileux en fonction de la pression de succion S , rapportée à S_0 . L'ajustement d'un modèle mathématique aux différentes courbes donne

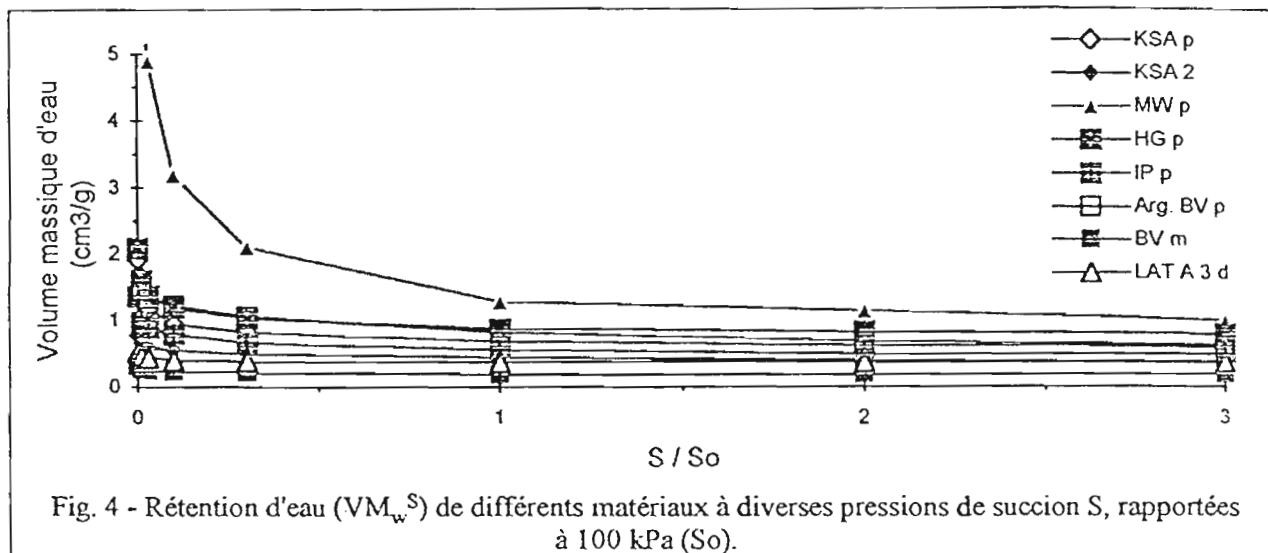


Fig. 4 - Rétention d'eau (VM_w^S) de différents matériaux à diverses pressions de succion S , rapportées à 100 kPa (S_0).

l'équation : $VM_w^S = A - a \text{Log} (S/S_0)$ (1) dans laquelle la constante (A) est caractéristique de l'échantillon, le coefficient de corrélation toujours >0,9 et dont le coefficient (a) sera discuté ci-après.

Il y a par ailleurs une relation forte entre $VM_w^{S_0}$ et (A) : $A = 1,24 VM_w^{S_0}$ ($r^2=0,98$, $n=41$).

(1) devient : $VM_w^S = 1,24 VM_w^{S_0} - a \text{Log} (S/S_0)$ (2).

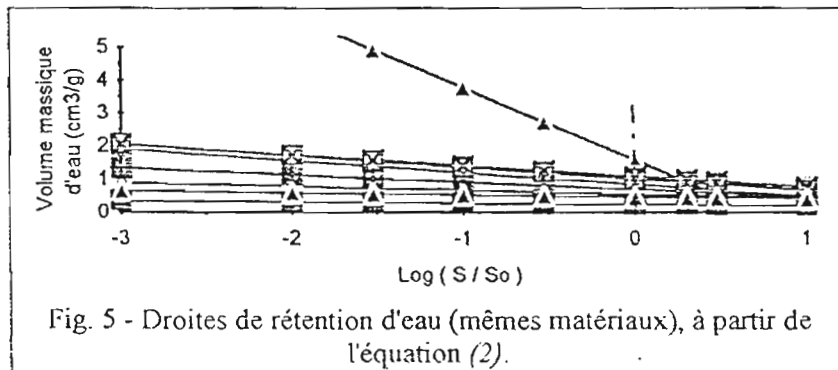


Fig. 5 - Droites de rétention d'eau (mêmes matériaux), à partir de l'équation (2).

La figure 5 présente les droites obtenues à partir de (2) pour des pressions de succion < ou =1MPa. Les valeurs calculées et expérimentales VM_w^S sont étroitement corrélées par la relation : $y = 0,193 + 0,908 x$ ($r=0,99$; $n=117$).

Ainsi l'équation (2) paraît valable pour toutes les séries étudiées et nous pouvons conclure que la rétention de l'eau par différents matériaux argileux

obéit à la même loi de comportement.

32.- Influence de certains facteurs sur la rétention en eau. Variation du coefficient a . La figure 6 montre les variations de (a) en fonction de la charge foliaire de pâtes d'argile et de la nature des cations de la solution

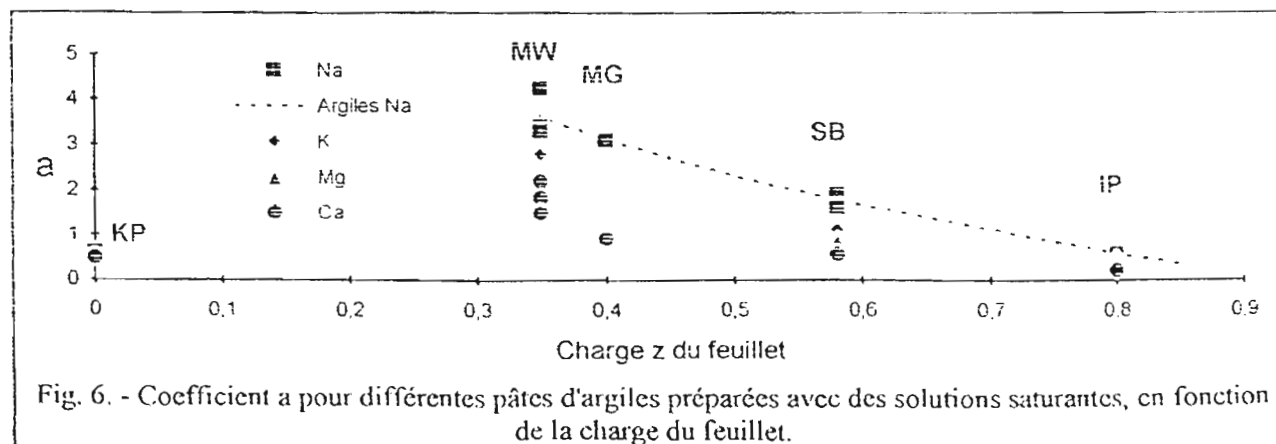
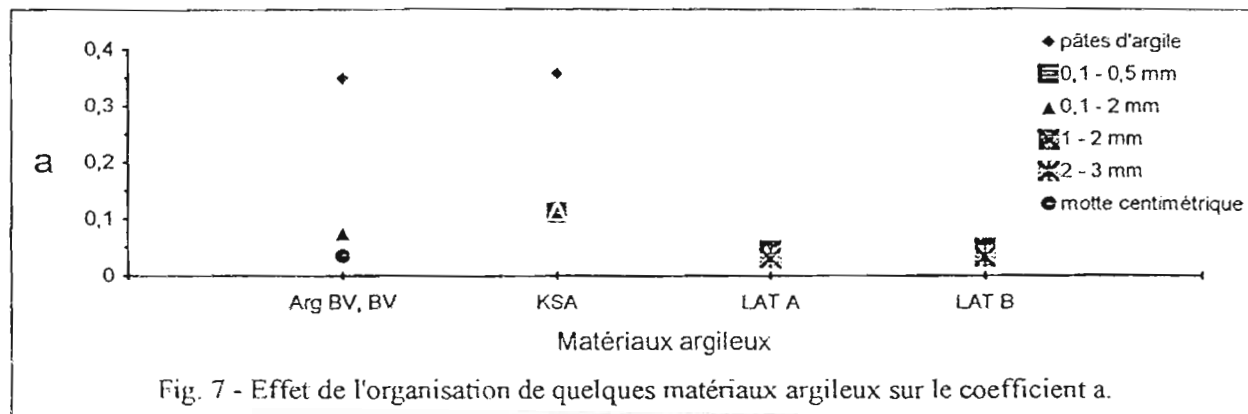


Fig. 6. - Coefficient a pour différentes pâtes d'argiles préparées avec des solutions saturantes, en fonction de la charge du feuillet.

saturante. Pour les argiles 2:1, plus (z) est élevé, plus (a) est faible : ($MW > MG > SB > IP$) ; les interstratifiées

(Arg BV) et les argiles 1:1 (KP) sont dans une situation semblable à celle des argiles de haute charge comme IP. En même temps, (a) décroît avec la nature du cation saturant dans l'ordre $\text{Na} > \text{K} > \text{Mg}$ and Ca. Cependant, cette influence est plus faible que celle de la charge foliaire, surtout quand une grande part de l'espace interfoliaire est anhydre : c'est le cas lorsque la charge du feuillet est élevée, donc que la proportion de cations échangeables est faible (illites), ou encore quand la charge du feuillet est nulle (kaolinites). Dans ces conditions, l'hydratation des matériaux argileux semble peu affectée par la nature du cation échangeable. La figure 7 montre les variations de (a) quand l'organisation du matériau varie. Ainsi (a) augmente pour chaque niveau d'organisation, depuis la motte naturelle centimétrique jusqu'à la pâte d'argile, en passant par le



massif d'agrégats (BV et Arg BV, KSA). Cependant, on peut noter que la rétention de l'eau est peu affectée par la taille des agrégats dans les massifs (KSA, LAT). A l'inverse, la préparation initiale, en particulier l'agitation mécanique des matériaux dans l'eau pour fabriquer des pâtes, semble affecter (a) et VM_w^{So} (KSA).

Il apparaît donc que le modèle proposé, qui nécessite confirmation, peut être utilisé pour prévoir la rétention de l'eau dans des matériaux argileux à différentes pression de succion (ou potentiels de l'eau) avec le contenu en eau VM_w^{So} à 100 kPa et le coefficient (a).

Références bibliographiques.

- [1] Faure A., 1978, Comportement des sols au compactage: rôle de l'argile et conséquences sur l'arrangement des grains. *Thèse Univ. Grenoble*, 137p.
- [2] Bruand A., Tessier D. et Baize D., 1988, Contribution à l'étude des propriétés de rétention en eau des sols argileux : importance de la prise en compte de l'organisation de la phase argileuse, *C.R. Acad. Sci. Paris*, 307., Série II, p. 1937-1941
- [3] Tessier D., 1984, Etude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux, *Thèse*, Univ. Paris-VII, I.N.R.A. Versailles éd., 361 p.
- [4] Tessier D., Lajudie A. et Petit J.C., 1992, Relation between the macroscopic behavior of clays and their microstructural properties, *Applied Geochemistry*, 1, p. 151-161
- [5] Haal D.G.M., Reeve M.J., Thomasson A.J. et Wright V.F., Water retention porosity and density of field soils, *Soil Survey Tech. Monogr.*, n° 9, Rothamsted Experimental Station, Harpenden, Gde-Bretagne, 75 p.