
Comportement sur chemin de drainage humidification de quelques argiles de Tlemcen (Algérie), partie 1 : Expérimentale

Assia Bendi-Ouis* — **Mounir Derfouf*** — **Nabil Abou-Bekr*** —
Said Taïbi**

* *Laboratoire Eau et Ouvrages dans Leur Environnement, Université A. Belkaid, BP 230 - 13000 Tlemcen, Algérie, asbendiouis@gmail.com, der_mounir@yahoo.fr, aboubekrnabil@yahoo.fr*

** *Laboratoire Ondes et Milieux Complexes, FRE CNRS 1302, Université du Havre, 53 rue de Prony, 76600 Le Havre, France, Said.Taïbi@univ-lehavre.fr*

RÉSUMÉ. Ce travail présente les résultats d'une étude expérimentale du comportement sur chemin de drainage humidification de quelques sols argileux de la région de Tlemcen sous l'effet des variations de succion sous contrainte extérieure nulle. Deux techniques expérimentales ont été utilisées, la technique osmotique et celle des solutions salines saturées, afin de balayer une large gamme de succion. Les essais ont été réalisés à différents états initiaux sous forme de pâte et compacté. Une comparaison entre le comportement des matériaux dans les deux états est exposée.

ABSTRACT. This paper presents an experimental study of the behaviour on drying wetting paths of some clayey soil. It concerns some clayey soils of Tlemcen region (west of Algeria). Two experimental techniques were used, the osmotic technique and the salt solutions technique in order to cover a wide range of suction. The tests were performed on samples in the slurry and compacted initial states. A comparison between the behaviour of materials in the two states is exposed.

MOTS-CLÉS: Argile, drainage, humidification, succion, pâte, compacté.

KEYWORDS: Clay, drying, wetting, suction, slurry, compacted.

1. Introduction

En l'absence de variation de contrainte mécanique, le volume du sol peut varier si l'on soumet l'eau contenue dans l'échantillon à un état de tension. C'est la différence entre les pressions interstitielles de l'air et de l'eau nommée pression capillaire ou plus généralement succion notée S qui est le paramètre déterminant des mouvements des fluides dans les milieux poreux : $S = u_a - u_w$.

Sur chemin de drainage humidification, l'échantillon de sol est soumis à des variations de succion sous contrainte extérieure constante (nulle dans cette étude). Ce cas est traduit en pratique par plusieurs phénomènes en l'occurrence : retrait et gonflement des sols superficiels lors des variations du niveau de la nappe phréatique, géotechnique routière etc.

L'article aborde l'aspect des variations de volume, à travers quatre matériaux, prélevés à Tlemcen et ses environs, très différents de par leurs limites de liquidité et leurs domaines d'utilisation:

- La bentonite de l'usine Bental de Maghnia : Utilisée dans les forages.
- Le gisement de la bentonite de Maghnia : Le matériau naturel utilisé dans la fabrication de la bentonite de forage.
- La marne de Bouhennak : Prélevée dans une cité d'habitation de la ville de Tlemcen.
- L'argile de Sikkak : Utilisée dans le noyau du barrage en terre « Sikkak » de Tlemcen.

2. Caractéristiques des matériaux

Le tableau 1 répertorie les résultats des identifications physique, chimique et mécanique des quatre matériaux étudiés.

| Matériau | Sikkak | Marne de Bouhennak | Gisement Bentonite de Maghnia | Bentonite de forage de Maghnia | Norme |
|---|--------|--------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------|
| Identification physique | | | | | |
| -Granulométrie (%) : | | | | | NF P 94-041 |
| Gravier | 7 | | 4 | | |
| Sable | 35 | | 31 | | |
| Limon | 13 | | 17 | | |
| Argile (<2 μm) | 45 | 43 | 48 | 60 | NF P 94-057 |
| < 80 μm | 78 | 73 | 82 | 87.3 | |
| - Limites d'Atterberg (%) : | | | | | |
| Liquidité ω_L | 50 | 47 | 112 | 130 | NF P 94-051 |
| Plasticité ω_p | 23 | 25 | 45 | 42 | |
| Indice de plasticité I_p | 27 | 22 | 67 | 88 | |
| -Densité des grains solides (γ_s / γ_w) | 2.64 | 2.60 | 2.72 | 2.65 | NF P 94-054 |
| Identification chimique | | | | | |
| - VB | 3.6 | 6.67 | 22 | 42.7 | NF P 94-068 |
| -SST (m^2/g) | 75 | 140 | 467 | 897 | |
| -% CaCO_3 | 11 | 31 | 6 | 4 | |
| -% MO | 1.5 | | - | | |
| Identification mécanique | | | | | |
| -Proctor normal $\gamma_d \text{ max} / \gamma_w$ | 1.55 | | 1.23 | | NF P 94-093 |
| ω_{opt} (%) | 16 | | 18 | | |

Tableau 1. Résultats de l'identification des matériaux

3. Conditions initiales des essais

Deux séries d'essais de drainage / humidification sont effectuées. Les états initiaux pris en considération sont les suivants:

- Première série matériau sous forme de pâte : pour les quatre matériaux étudiés:
 - Etat saturé (drainage): préparé à partir d'une teneur en eau qui vaut 1.5 fois la limite de liquidité du matériau ($\omega = 1.5 \omega_L$).
 - Etat sec (humidification) : préparé sous forme de pâte, mis à séchage à l'air libre puis à l'étuve (à 50°C).
- Deuxième série d'essais matériau compacté : pour deux matériaux (gisement de bentonite de Maghnia et Sikkak) :
 - Etat compacté : préparé à la teneur en eau OPN. Afin d'obtenir la valeur de la densité sèche maximale on a eu recours au compactage statique effectué à la presse CBR à une vitesse de 1.5 mm/min.
 - Etat compacté (côté sec) : à une teneur en eau : OPN-2% et compacté à la densité sèche maximale.
 - Etat compacté (côté humide) : à une teneur en eau : OPN+2% et compacté à la densité sèche maximale.

4. Chemins de drainage humidification des argiles sous forme de pâte

Pour imposer une large gamme de succion, deux techniques expérimentales ont été utilisées : la technique osmotique (50 kPa- 3MPa) et la technique des solutions salines saturées (4- 340 MPa).

En déterminant le volume externe de l'échantillon par pesée hydrostatique dans une huile non mouillante, les valeurs de teneur en eau, degrés de saturation et indice des vides sont déduites.

Les figures 2 et 3 représentent le chemin de drainage humidification des matériaux étudiés.

Sur les graphiques ($\log S, e$) (Figures 2.B et 3.B), il y a une variation importante de l'indice des vides avec la pression capillaire, qui s'apparente à la courbe de compressibilité classique d'un sol saturé. Contrairement à cette dernière, elle présente un palier quasi-horizontal lorsque la pression capillaire devient supérieure à une valeur seuil, notée « pression capillaire de retrait » (S_{SL}). Quel que soit le matériau, on note une forte irréversibilité entre le drainage et l'humidification avant le seuil, et une quasi-réversibilité après.

L'indice des vides étant une mesure du volume global de l'échantillon, le plan (ω, e) présente en fait la courbe de retrait du sol. La saturation du sol se traduit par

une droite passant par l'origine, d'équation: $e = (\gamma_s/\gamma_w)*w$. L'intersection de cette droite avec l'asymptote horizontale de la courbe quand w tend vers 0 correspond à la limite de retrait du sol, w_{SL} .

Dans les graphes 2C, 2D et 3C, 3D, on a reporté les variations du degré de saturation en fonction des deux variables, w et S . Les deux courbes présentent deux parties sensiblement linéaires correspondant d'une part à un degré de saturation proche de 1, et d'autre part à la désaturation très rapide du sol associée à une faible variation de l'indice des vides. L'intersection entre les deux droites caractérise le point d'entrée d'air, auquel correspond la « pression capillaire de désaturation », notée $S_{désat}$.

On définit également une « pression capillaire de resaturation » (S_{sat}) sur le chemin d'humidification.

Enfin, le graphique du bas (2E et 3E) traduit l'effet de la succion sur la teneur en eau, qui rend compte de la variation globale de volume du sol.

En comparant les chemins de drainage humidification des quatre matériaux on retrouve les mêmes tendances de variation des différents paramètres, les différences se situent au niveau des valeurs caractéristiques propres à chaque matériau:

– Le domaine où le matériau reste saturé est plus large pour les matériaux de plus forte plasticité (bentonite de Maghnia et gisement de bentonite de Maghnia). Ceci est dû principalement au fait que les argiles très plastiques sont plus fines.

– Les grandes variations de l'indice des vides sont constatées pour des pressions capillaires inférieures à la limite de retrait, tandis qu'au delà de cette limite les variations sont négligeables.

– En terme de teneur en eau, la limite de retrait constitue un palier sur lequel on pourra prévoir les variations du volume des sols argileux, en connaissant sa teneur en eau initiale.

Les principales caractéristiques sont résumées dans le tableau ci-dessous :

| Matériaux | w_L | I_p | $U_{désat}$ (kPa) | U_{sl} (kPa) |
|--------------------------|-------|-------|-------------------|----------------|
| Marne de Bouhennak | 47 | 22 | 1000 | 5000 |
| Argile de Sikkak | 50 | 27 | 1000 | 3500 |
| Gisement de la bentonite | 112 | 67 | 3000 | 5500 |
| Bentonite de Maghnia | 130 | 88 | 3000 | 7000 |

Tableau. 4. Principales caractéristiques des matériaux étudiés

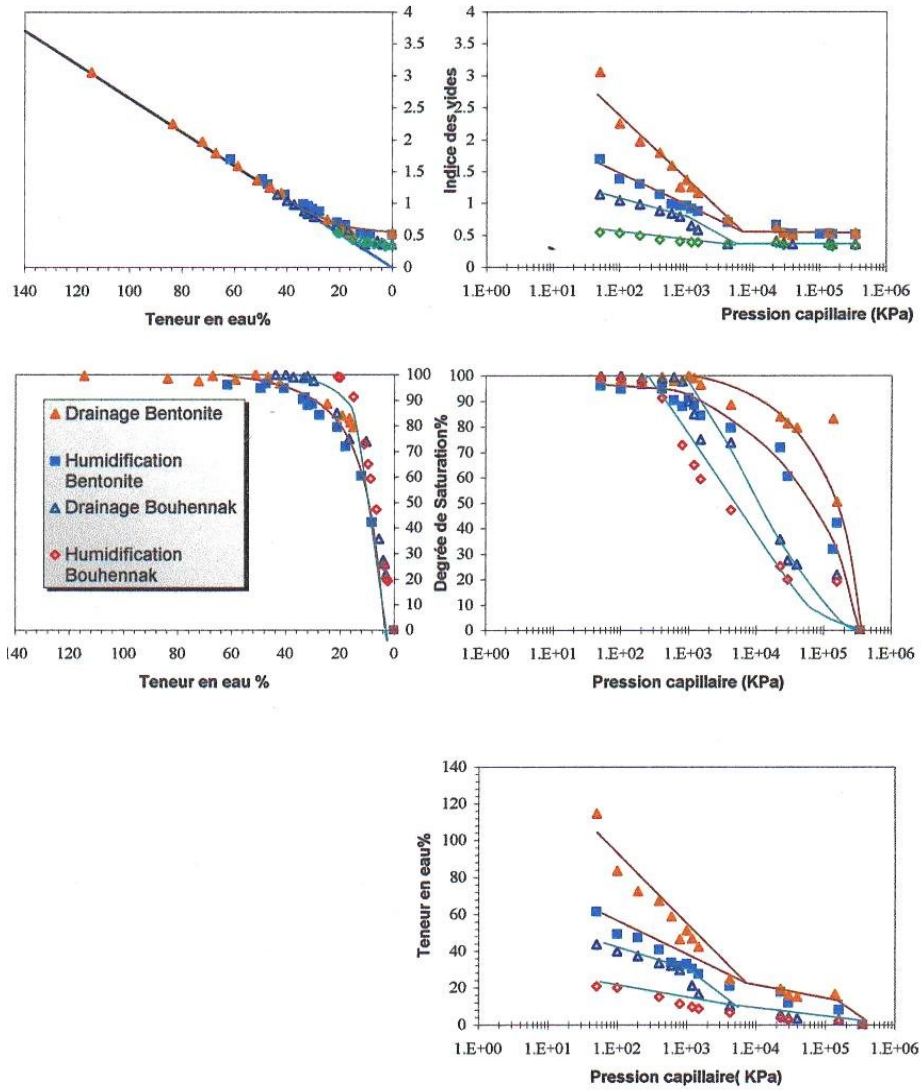


Figure 2. Premier cycle de drainage humidification sur la marne de Bouhennak et la Bentonite de Maghnia initialement sous forme de pâte à $w_i=1.5w_L$.

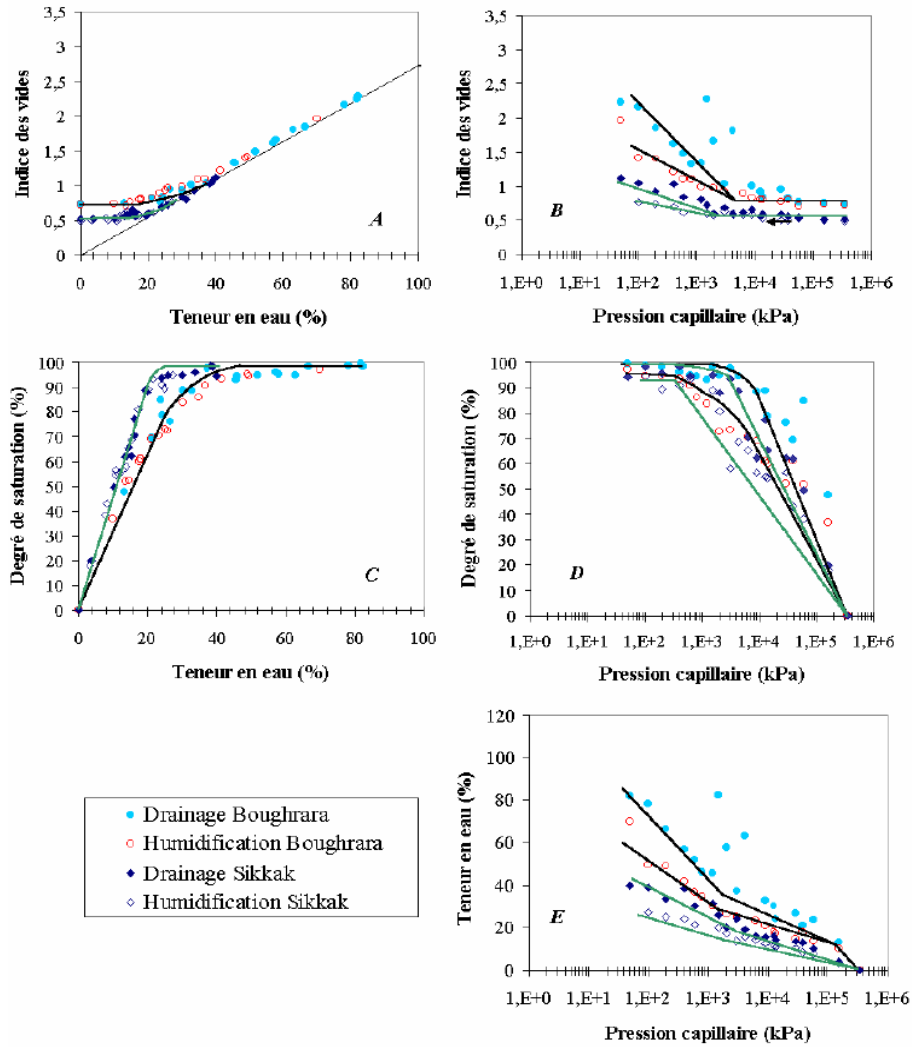


Figure 3. Chemins de drainage- humidification sur les matériaux du gisement de Maghnia et Sikkak initialement saturés, préparés sous forme de pâtes à $1.5 \omega_L$.

5. Prédiction du comportement dans le domaine saturé

Zerhouni. (1991), a essayé d'établir des corrélations basées sur une régression linéaire simple entre la limite de liquidité et la pression capillaire de désaturation, le coefficient de régression R^2 était de l'ordre de 0.836.

Nous avons suivi la même démarche en considérant des matériaux ayant les mêmes conditions initiales pour établir une corrélation entre la limite de liquidité et les propriétés qui caractérisent l'étendue du domaine saturé (pression capillaire de désaturation et de retrait).

Le tableau 5 regroupe les différentes caractéristiques des quatre matériaux étudiés ainsi que d'autres relevées dans la littérature.

| Matériaux | w_L | I_p | S_{desat} | S_{sl} | Sources |
|---|-------|-------|-------------|----------|--|
| Limon de Sterrebeek | 27 | 20 | 26 | | Biarez et al. (1988) |
| Argile Vieux Pré | 32 | 13 | 800 | 1400* | Indarto (1991), cité par Taibi. (1994) |
| Limon d'Orly | 33 | 13 | 100* | 1500* | Taibi (1994) |
| Marne rouge | 36 | 13 | 500 | 1300* | Biarez et al. (1988) |
| Limon de Joussigny | 37 | 21 | 800 | 2000 | Fleureau et al. (2002) |
| Argile sableuse 90P300/5RF/5S | 38 | 19 | 200 | 1200 | Sayad-Gaidi (2003) |
| Argile jaune | 40 | 20 | 800* | 1000* | Indarto (1991), cité par Taibi. (1994) |
| Marne de Bouhennak | 47 | 22 | 1000 | 5000 | Derfouf (2005) |
| Mers El Kebir | 49 | 30 | 1500 | 4000 | Bourokba et al (2007) |
| Argile de Sikkak | 50 | 27 | 1000 | 3500 | Bendi-Ouis (2005) |
| Argile Blanche | 61 | 31 | 900 | 2000 | Zerhouni (1991) |
| Gisement de la bentonite | 112 | 67 | 3000 | 5500 | Bendi-Ouis (2005) |
| Bentonite de Maghnia | 130 | 88 | 3000 | 7000 | Derfouf (2005) |
| * : valeurs estimées à partir des courbes expérimentales des auteurs. | | | | | |

Tableau 5. Valeurs caractéristiques de quelques argiles préparées à 1.2 à 1.5 w_L

La figure 4 représente l'ensemble de ces points expérimentaux dans les plans (w_L , S_{desat}) et (w_L , S_{SL}). Les points expérimentaux semblent rassemblés autour des droites de régression linéaires d'équations :

$$S_{desat}=28.6(w_L)-474.05 \quad (R^2=0.89) \quad [1]$$

$$S_{SL}=52.73(w_L) +27.85 \quad (R^2=0.70) \quad [2]$$

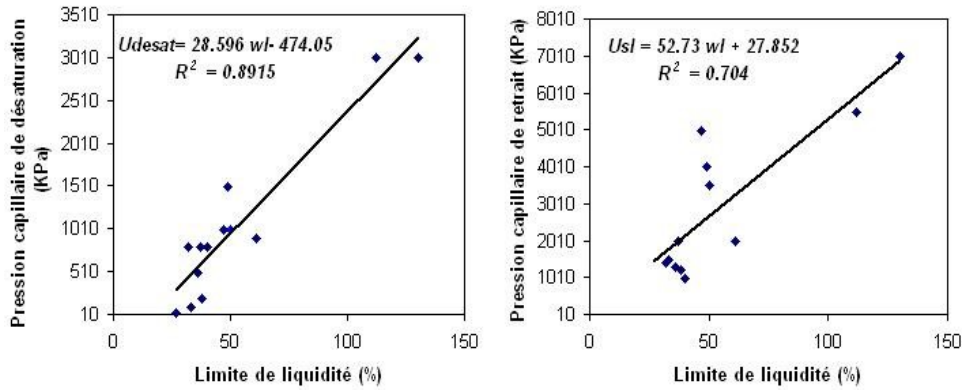


Figure. 4. Corrélation de la pression capillaire de désaturation et de retrait avec la limite de liquidité, d'argiles préparées sous forme de pâte à $1.2 w_L$ et à $1.5 w_L$.

Les valeurs des coefficients de régression obtenus restent relativement insuffisantes, en particulier pour la pression de limite de retrait. Le travail devrait être poussé pour améliorer ces corrélations. Ceci dit, une grande partie du chemin de drainage pourrait ainsi être estimée de façon approchée en utilisant les corrélations établies.

Sur la figure 5, on présente sur le même graphe la courbe de drainage - humidification et la courbe œdométrique de chacun des quatre matériaux étudiés ainsi que la corrélation de Biarez et Favre (1975).

On constate que, tant que les échantillons restent saturés, le chemin de drainage est parallèle à la droite de compression œdométrique et la corrélation du chemin de compression isotrope. La comparaison entre les coefficients de compressibilité (C_c) et de gonflement (C_s) d'une part, et les indices de drainage (C_d) et d'humidification (C_h) d'autre part (définis selon Biarez et al. (1988), comme étant respectivement la pente des chemins de drainage et d'humidification dans le domaine saturé), montre que le coefficient de compressibilité et l'indice de drainage sont pratiquement égaux, de même que le coefficient de gonflement et l'indice d'humidification. Il s'en suit que les corrélations de Biarez et Favre. (1975) établies pour C_c et C_s restent applicables pour C_d et C_h :

$$C_d = 0.009 (w_L - 13), \text{ et}$$

$$C_d/C_h \approx 4, \quad (\text{Tableau 6}).$$

Il est à noter que ces corrélations ne peuvent être appliquées que pour des chemins de drainage sur matériaux normalement consolidés.

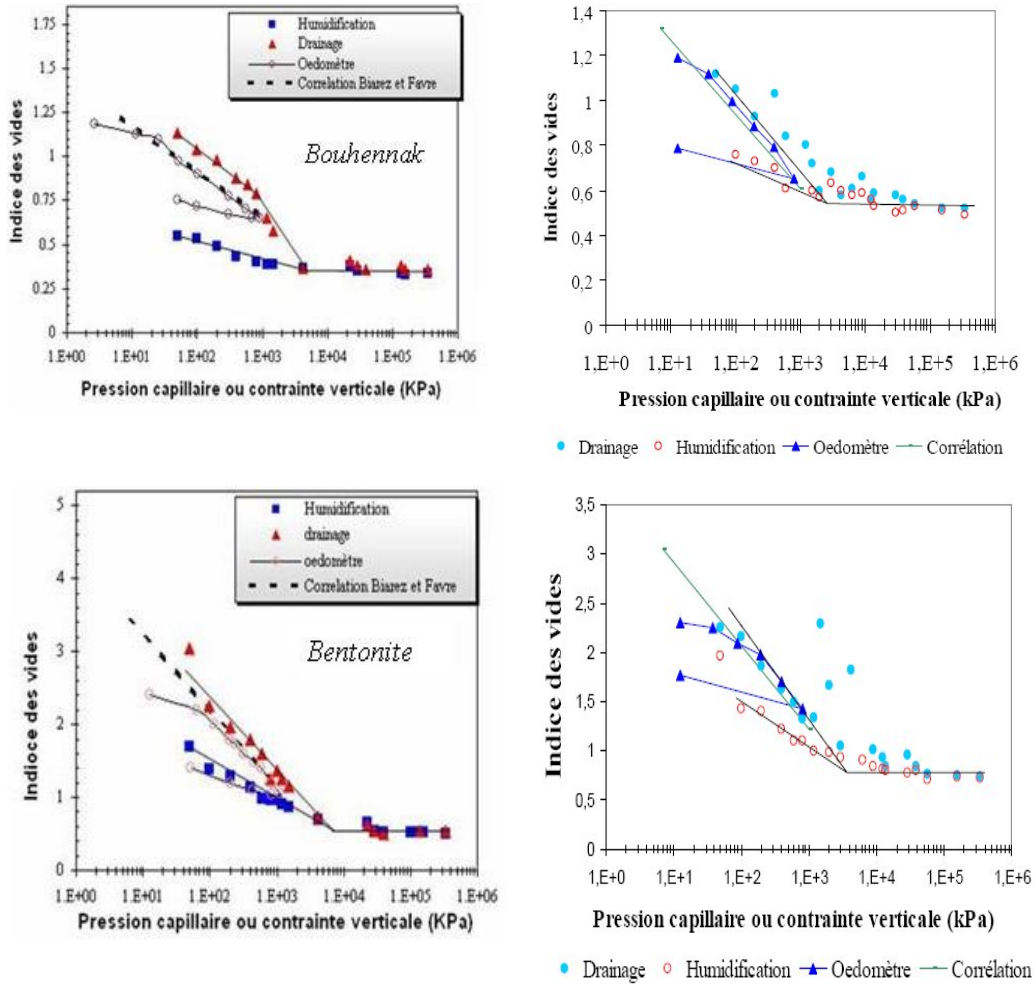


Figure 5. Comparaison entre les chemins de drainage humidification et le chemin œdométrique de la pâte des matériaux étudiés

| Matériaux | C_c | C_d | C_s | C_h | C_c/C_s | C_d/C_h |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-----------|-----------|
| Bouhennak | 0.311 | 0.286 | 0.08 | 0.073 | 3.88 | 3.92 |
| Bentonite | 0.975 | 1.097 | 0.263 | 0.251 | 3.71 | 4.37 |
| Sikkak | 0.323 | 0.315 | 0.076 | 0.076 | 4.25 | 4.14 |
| Gisement de bentonite | 0.866 | 0.880 | 0.196 | 0.229 | 4.41 | 3.84 |

Tableau 6. Paramètres C_c , C_s , C_d , C_h mesurés.

Donc dans le domaine où les échantillons sont saturés, des incréments identiques de pression capillaire ou de contrainte mécanique produisent la même variation de volume, et que le chemin de drainage peut être déduit naturellement des corrélations du chemin de compression isotrope, ce qui rejoint les remarques de plusieurs auteurs : Biarez et al. (1988) zerhouni (1991), Fleureau et al. (2002).

6. Chemin de drainage - humidification des matériaux compactés:

En ce qui concerne les matériaux compactés (sikkak et gisement de bentonite), les chemins de drainage humidification (Figures 6 et 7) ont donné lieu aux constatations suivantes :

Les états initiaux ont été déterminés par mesure de la succion à l'aide de la méthode du papier filtre. Les échantillons suivent un chemin de drainage pour des succions supérieures à la valeur de la succion de l'échantillon compacté trouvée et un chemin d'humidification pour des valeurs inférieures à cette dernière.

– Il y a une légère dispersion dans les résultats mais les points semblent proches d'une droite moyenne, indépendamment de la teneur en eau initiale, spécialement dans les plans $[\log(S), e]$ et $[\log(S), \omega]$.

– Les échantillons compactés, à n'importe quelle teneur en eau initiale, se comportent comme des échantillons surconsolidés.

– Les chemins de dessiccation humidification sont sensiblement réversibles.

– La courbe de désaturation des échantillons compactés du côté sec de l'optimum (OPN -2%) est sensiblement différente de celles des échantillons compactés à l'optimum ou du côté humide. Vanapalli et al. (1999) ont abouti au même résultat.

– Pour la plupart des points expérimentaux, à la même pression capillaire le degré de saturation des échantillons compactés du côté sec de l'optimum est quelque peu plus bas que celui des deux autres.

7. Comparaison entre les chemins de drainage - humidification pour matériaux sous forme de pâte et compactés:

En comparant les résultats obtenus sur le matériau de Sikkak et du gisement de bentonite, sous forme de pâte et compacté (Figures 6 et 7) on peut émettre ce qui suit :

– Les paliers de retrait différent, ceux des échantillons compactés (OPN, OPN-2%, OPN+2%) se trouvent au dessous de celui de la pâte, donc le matériau est dans un état plus dense.

– La pression capillaire de retrait est plus élevée et la limite de retrait plus faible pour les échantillons compactés par rapport à ceux de la pâte. Ceci va dans le sens des conclusions de Fleureau et al. 1993 qui affirment que la limite de retrait n'est pas un paramètre intrinsèque du matériau mais qu'elle dépend de son état initial et de son indice des vides.

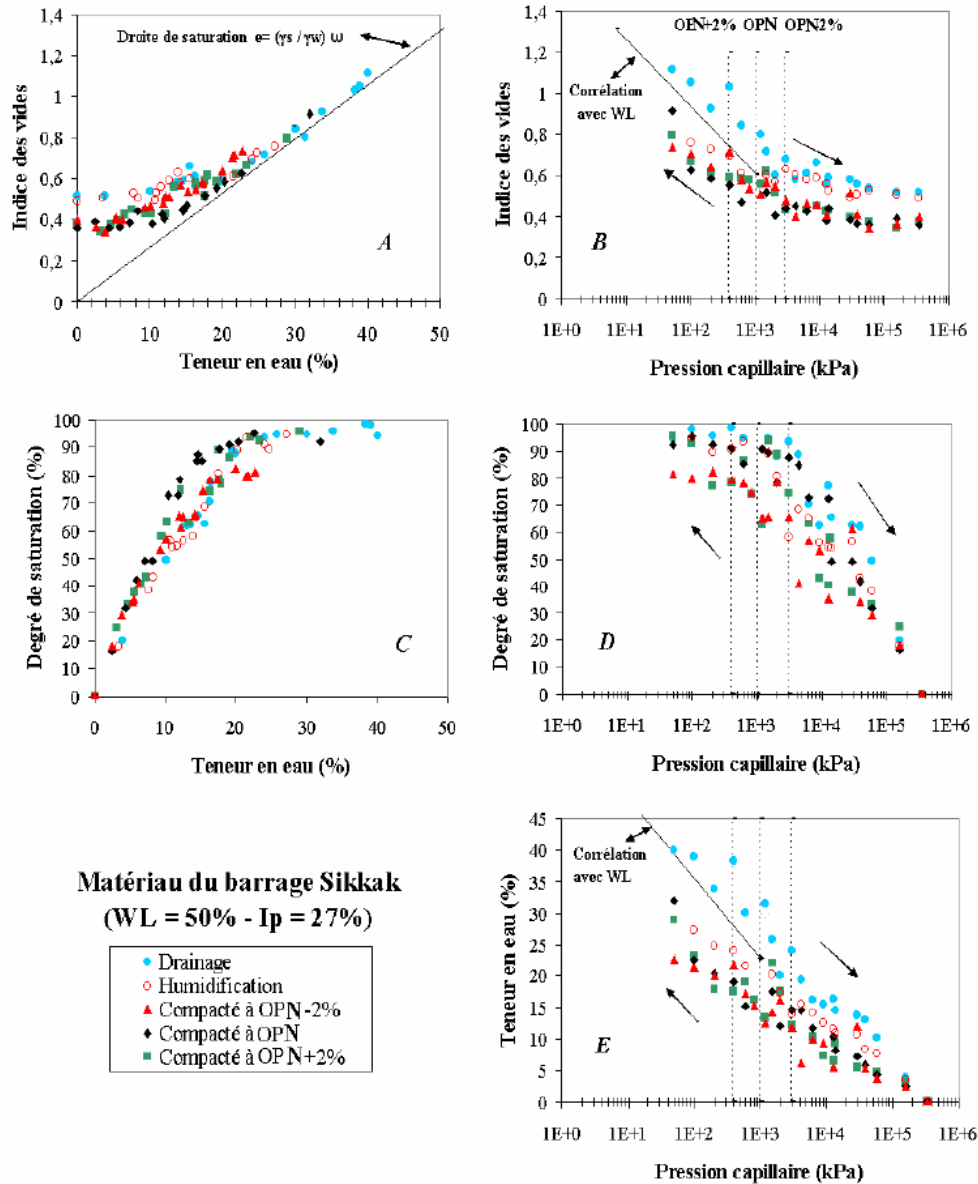


Figure 6. Synthèse des chemins de drainage - humidification à différents états initiaux pour le matériau de Sikkak.

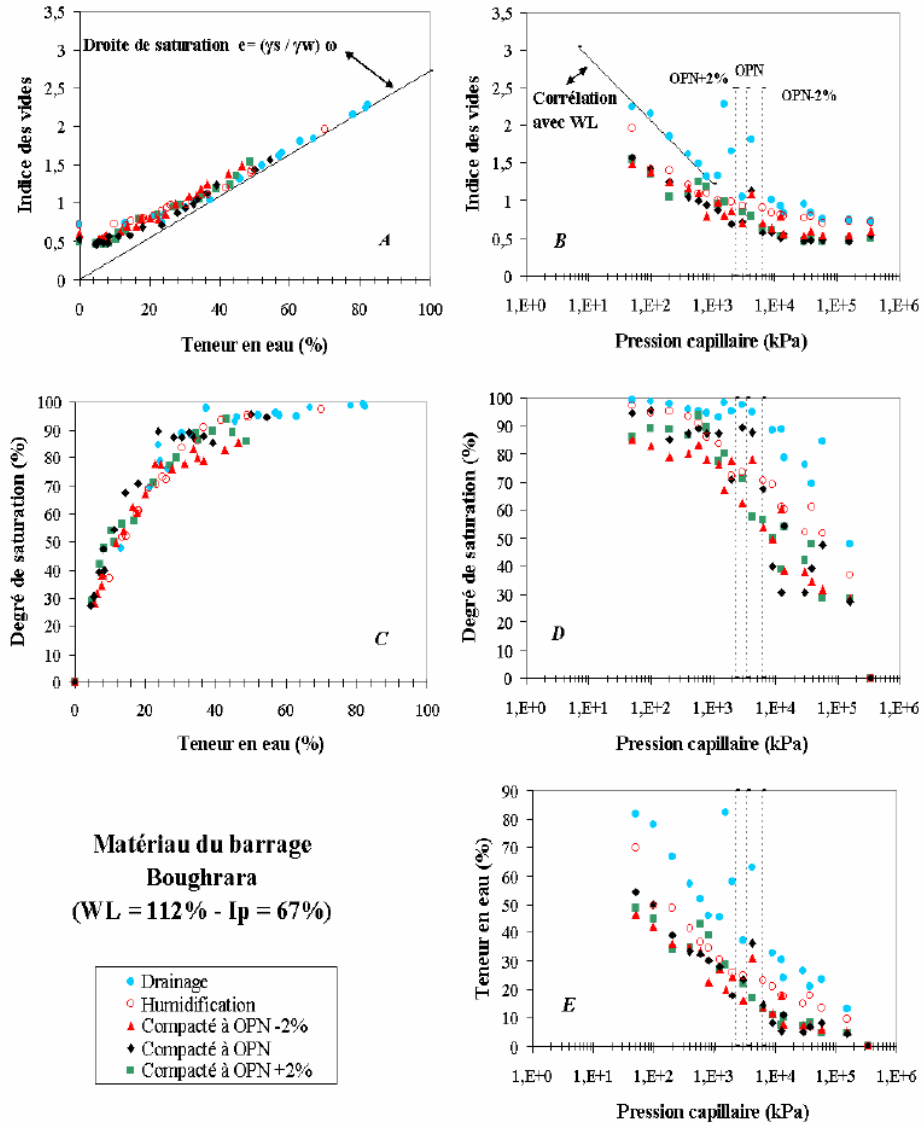


Figure 7. Synthèse des chemins de drainage- humidification à différents états initiaux pour le gisement de bentonite de Maghnia.

8. Conclusion

Les essais présentés montrent l'intérêt d'une représentation globale de l'état du matériau au cours d'un cycle de drainage humidification. Cette représentation permet de suivre l'évolution de la saturation du sol, de relier les caractéristiques de retrait aux caractéristiques de drainage et d'humidification.

– Matériaux sous forme de pâte :

Les essais sur les matériaux sous forme de pâte, montrent l'existence d'un domaine de pression capillaire où le sol reste saturé. L'étendue de ce domaine varie en fonction de la plasticité du sol et du réseau poreux.

Il apparaît possible de pouvoir estimer une grande partie du chemin de drainage des sols argileux (de teneur en eau initiale supérieure à w_L) à partir de leur limite de liquidité, en particulier, dans le domaine quasi-saturé, le chemin de drainage est très proche du chemin mécanique isotrope, et l'on peut par conséquent se baser sur les corrélations établies pour ce dernier chemin. D'autre part, on peut estimer la pression capillaire de désaturation et la pression capillaire de limite de retrait en utilisant les corrélations présentées dans cet article.

– Matériaux compactés :

Sur des chemins appliqués à des matériaux compactés, les échantillons se comportent comme des matériaux surconsolidés. Les chemins de dessiccation humidification sont dans ce cas réversibles.

La pression capillaire de retrait est plus élevée et la limite de retrait plus faible pour les échantillons compactés par rapport aux échantillons sous forme de pâte.

9. Bibliographie

- Abou-Bekr.N, 1995. Modélisation du comportement mécanique et hydraulique des sols partiellement saturée. Thèse de doctorat. Ecole Centrale de Paris.
- Abou-Bekr N., Bendi-Ouis A. & Taibi S. (2006): «Characterization of the clay of Sikkak core earth dam (West of Algeria) » in *The Fourth International Conference on Unsaturated Soils, Carefree, Arizona, U.S.A. on April 2-5, 2006*, pp 1607-1616. Edited by American Society of Civil Engineers ASCE, ISBN-10 0784408025 & ISBN-13: 978-0784408025.
- Bendi-Ouis A., 2005 Comportement des argiles des barrages Sikkak et Boughrara soumises à une pression intertitielle négative. Mémoire de Magistère de l'université Aboubekr Belkaid, Tlemcen, Algérie.
- Biarez J., Favre, J.L. 1975. Table ronde sur les corrélations des paramètres en mécanique des sols. Ecole Centrale Paris.
- Biarez, J., Fleureau, J.M., Zerhouni, M.I, Soepandji, B.S. 1988. Variations de volume des sols argileux lors de cycles de drainage humidification. *Revue Française de géotechnique*. 41, 63-71

- Bourokba, M. S. Hachichi, A. Fleureau, J.M. 2007. Comportement de l'argile de Mers El Kebir sur chemin d'humidification drainage. *Colloque sols et matériaux à problèmes*. 9-11 Février. 195, 193. Tunisie.
- Coussy O. & Fleureau J.M., 2002: Mécanique des sols non saturés. Editions Lavoisier, Hermès, France.
- Delage P. & Cui Y.J., 2000: L'eau dans les sols non saturés in *Techniques de l'Ingénieur*, traité Construction C301.
- Delage P., Howat M.D. & Cui Y.J., 1998: The relationship between suction and swelling properties in a heavily compacted unsaturated clay. *Engineering Geology, Elsevier*, Vol. 50.
- Derfouf, F.M. 2005 Comportement de deux argiles de la région de Tlemcen sur chemin de drainage humidification, étude expérimentale et modélisation. Mémoire de Magistère de l'université Aboubekr Belkaid, Tlemcen, Algérie.
- Fleureau. J.M, Bouabdellah. A., Maouchi. D., Taibi. S., Kheirbek-Saoud. S (1999). "Description and modeling of the drying-wetting paths of a few natural soils". In Proceedings of the 11th *Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Iguassu Falls, Brazil, 8-12 August, Edited by Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Vol. 1, pp. 193-200.
- Fleureau, J.M., Verbrugge, J.C., Huergo, P.J., Correia, A.G. & Kheirbek-Saoud, S. 2002 Aspects of the behaviour of compacted clayey soils on drying and wetting paths. *Canadian Geotechnical Journal*. 39, 1341-1357.
- Modaressi, A. Abou-Bekr. N. 1994 A unified approach to model the behavior of saturated and unsaturated soils. *Conference on computer methods and advances in geomechanics*. H.J.Siriwardane and M.M. Zaman (ed.), Balkema.
- Sayad-Gaidi, S. 2003 Ecoulements dans les milieux poreux peu perméables saturés et non saturés. Thèse de Doctorat de l'université du Havre, France.
- Vanapalli. S.K, Fredlund. D.J & Pufahl. D.E, 1999: "The influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristics of compacted till". *Géotechnique* VOL 49, N° 2.
- Taibi, S. 1994 Comportement mécanique et hydraulique des sols soumis à une pression interstitielle négative, étude expérimentale et modélisation. Thèse de Doctorat. Ecole Centrale de Paris.
- Zerhouni, M.I. 1991 Rôle de la pression interstitielle négative dans le comportement des sols -Application aux routes. Thèse de Doctorat. Ecole Centrale de Paris.

10. Remerciements

Le présent travail a été réalisé dans le cadre du projet PAI CMEP TASSILI (réf. 06/MDU/690) entre l'Université A. Belkaid, Tlemcen et l'Université du Havre.