
Comportement sur chemin drainage- humidification de mélange sable de dune – bentonite

Mohamed Kamel Gueddouda *— **Nabil Abou-bekr ****— **Saïd Taïbi ***** — **Huaqing Wang ***** — **Mohamed Lamara***— **Idriss Goual***— **Sayah Goual***

* *Laboratoire de recherche de Génie Civil. Université Amar Teledji. BP.37 G, Laghouat. Algérie, mk.gueddouda@mail.univ-lagh.dz, lrm3a_md@yahoo.fr, goualid@yahoo.fr, ms.goual@mail.lagh-univ.dz*

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

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

RESUME. Les couches sable-bentonite sont utilisées comme barrières étanches pour l'enfouissement des déchets ménagères et industriels. Dans la pratique, on cherche à obtenir le mélange le moins coûteux qui satisfait les conditions hydrauliques et mécaniques. La première partie de cet article, présente une synthèse des résultats justifiant le choix du mélange optimum vis-à-vis la perméabilité saturée. La deuxième partie, présente les résultats expérimentaux du comportement obtenue sur les chemins de drainage- humidification du mélange optimum préparé à différents degré de saturation sous contraintes extérieures nulles.

D'autre part, la comparaison entre chemins de drainage-humidification et chemins de compression-décompression oedométriques qui a confirmé l'équivalence entre les contraintes capillaires et mécaniques.

ABSTRACT. Compacted layers of sand-bentonite mixtures have been proposed and used in a variety of geotechnical projects as engineered barriers for the enhancement of impervious landfill liners, cores of zoned earth dams and waste repository systems. In the practice we try to get an economical mixture that satisfies the hydraulic and mechanical requirements.

In the first part of this paper present a summary of results to justify the choice of an optimum mix with regard to its saturated permeability. In the second part, we present experimental results obtained on the behaviour of the drying-wetting paths of the optimum mixture prepared at different degree of saturation in null external stress. Moreover, the comparison between drying-wetting paths and oedometeric or isotropic compression-decompression paths confirmed the equivalence between the effects of capillary and mechanical stresses.

MOTS CLES: Mélange s/b, chemin drainage-humidification, sol non saturé, région aride, Algérie.

KEYWORDS: Mixtures s/b, drying-wetting path, unsaturated soil, arid region, Algeria

1. Introduction

En Algérie, le risque de pollution de la nappe souterraine est plus probable dans les régions sud. Ceci est dû d'une part à l'augmentation progressive de volume de déchets domestiques (expansion des villes) et industriels (exploitation des hydrocarbures) et d'autre part à l'absence quasi-total des cours d'eau qui se débouchent sur la mer. En conséquence, les substances chimiques générées par ces déchets demeurent dans le sol et seront lessivés par la suite vers les nappes souterraines par les processus d'infiltration des eaux pluviales.

Le calcul des barrières ouvragées compactées réalisées par le mélange sable-bentonite destinées pour la conception des centres de stockage des déchets ménagers nécessite la connaissance de son comportement mécanique lors d'un cycle de drainage- humidification. L'étude des chemins de drainage -humidification présente un double intérêt, d'une part parce qu'elle permet de mettre en évidence le rôle de la pression capillaire à laquelle est soumis le sol et de comprendre cet aspect important de son comportement, d'autre part parce que de nombreux phénomènes réels suivent, en première approximation, des chemins de drainage ou d'humidification : retrait-gonflement des sols à faible profondeur lors de variations du niveau de la nappe phréatique, géotechnique routière, etc. (Verbrugge et Fleureau, 2002). L'essai consiste à imposer au sol une suite de pressions capillaires croissantes jusqu'au séchage complet (drainage), puis à le réhumidifier en imposant une suite de pressions capillaires décroissantes (humidification), en l'absence de contrainte extérieure (Coussy et Fleureau, 2002). A l'équilibre, sous chaque pression on mesure les caractéristiques finales des échantillons (volume, teneur en eau), dont on déduit l'indice des vides e , le degré de saturation S_r , la teneur en eau massique w ou volumique θ .

Dans cet article, nous présentons en premier lieu, une synthèse des résultats d'une étude préliminaire sur le comportement hydrique des mélanges sable de dune de la région de Laghouat (sud de l'Algérie) et bentonite de Maghnia (ouest de l'Algérie) pour obtenir un mélange optimum qui a satisfait la condition fondamentale pour la conception des barrières ouvragées ou la perméabilité saturée doit être inférieure à 10^{-9} m/s ou comprise entre 10^{-8} m/s et 10^{-10} m/s (Chapuis, 1990 ; Parker et al. 1993). Les pourcentages de bentonite utilisée varient entre 3 % et 15 %. La mesure de la perméabilité saturée pour les différents mélanges a été réalisée par les essais oedométriques. Les résultats obtenus nous a conduit à opter à un mélange optimum de 85 % de sable de dune +15% de bentonite (Gueddouda et al., 2008). La mesure de la perméabilité saturée de ce mélange a été réalisé en deux régimes différents : régime permanent (à charge constante) et régime transitoire (méthode de pulse) en utilisant l'appareil triaxial. Les résultats obtenus ont confirmés le choix du mélange optimum. En second lieu, nous présentons le mode opératoire de préparation des échantillons et du matériel utilisé, ainsi les résultats expérimentaux du comportement du mélange obtenus sur les chemins de drainage-humidification du mélange optimum préparé à différents degrés de saturation (pâte

saturée, pâte sèche, OPN-2, OPN, OPN+2) sous contraintes extérieurs nulles. Les résultats des essais sont présentés dans des diagrammes à cinq plans qui se correspondent verticalement et horizontalement en fonctions des paramètres d'états (w , e , S_r et la succion).

2. Matériaux utilisés

La bentonite utilisée dans cet article, est une argile naturelle (bentonite de Maghnia), extraite du gisement de Hammam Boughrara (Tlemcen). Elle est non traitée et finement broyée. Le diffractogramme aux rayons X de l'échantillon de bentonite montre que le minéral argileux prédominant est la montmorillonite avec la présence du quartz, de la calcite, des traces de kaolinite et d'illite (Figure 1). Des analyses chimiques montrent que, les principaux constituants minéralogiques sont : la silice SiO_2 (65,2 %) et l'alumine Al_2O_3 (17,25 %). Le rapport $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ de la bentonite de Maghnia est égale à 3,77.

Les résultats de l'analyse granulométrique de la bentonite montre que le taux des éléments inférieur à $2 \mu\text{m}$ (C_2) est de l'ordre de 60 %. D'après les résultats des limites d'Atterberg, la bentonite de Maghnia est classée parmi les sols très argileux très plastique avec une limite de liquidité (w_L) de 141 % et un indice de plasticité (I_p) de 93 % (Gueddouda et al 2007). D'après la classification de Skempton et al. (1953), basée sur l'activité ($A = I_p/C_2$), la bentonite de Maghnia présente un fort pourcentage en Montmorillonite calcique (Ca^{2+}).

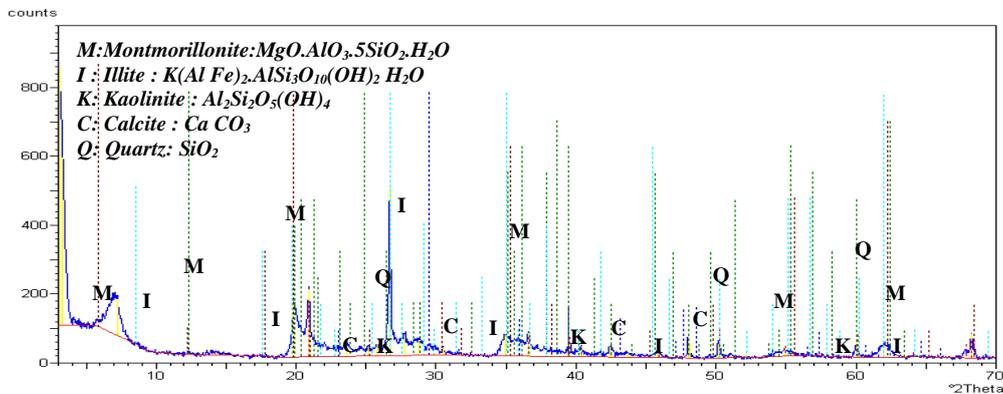


Figure 1. DRX de la bentonite de Maghnia

La région de Laghouat est considérée comme une région semi aride à aride située au sud de la capitale Alger (environ 400 km). Le sable de dune utilisé dans cette étude est un sable local. Les analyses chimiques du sable de dune de la région de Laghouat montrent la présence d'un fort pourcentage en silice ($\% \text{SiO}_2 > 95 \%$). Le sable de dune de Laghouat est un sable siliceux (Lamara et al 2006). D'après les résultats des analyses granulométriques, les coefficients d'uniformités et de

courbures sont respectivement $C_u = 1,67$ et $C_c = 1,1$. Le sable de dune de la région de Laghouat se classe parmi les sables propres mal gradués, de granulométrie moyenne. Sa courbe est uniforme et très peu étalée (Lamara et al.2006).

C_u : coefficient d'uniformité dit de Hazzen. $C_u = D_{60}/D_{10}$

C_c : coefficient de courbure. $C_c = (D_{30})^2/D_{60}.D_{10}$

Les propriétés physico-mécaniques du mélange optimum 85% S + 15% B sont regroupées dans le tableau 1. Le mélange 85% S + 15 % B présente une limite de liquidité de 34% avec un indice de plasticité de 12,5. D'après la classification de Casagrande, ce mélange apparaît comme un sol moyennement argileux peu plastique. Les résultats des essais de gonflement à l'oedomètre effectués sur des échantillons compactés statiquement montrent que le mélange présente un taux de gonflement (G) de l'ordre de 8,7 % obtenu par la méthode du gonflement libre (J.F Serratrice & B.Soyez, 1996) et une pression de gonflement (P_g) de l'ordre de 178 kPa obtenue par la méthode du volume constant (J.F Serratrice & B.Soyez, 1996).

$C_2 \leq 2\mu\text{m}$	C_u	γ_d (kN/m^3)	w_{opt} (%)	w_L (%)	I_p (%)	Sst (m^2/g)	G %	P_g (kPa)
9 %	3,75	17,0	15,2	34	12,5	83	8,70	178

Tableau 1. Propriétés physico-mécaniques du mélange 85%S – 15% B (Gueddouda et al 2008)

Le choix d'un mélange optimum sable de dune + bentonite destiné pour la réalisation des barrières étanches est basé essentiellement à la mesure de la perméabilité. Des essais oedométriques ont été effectués sur des mélanges sable de dune + bentonite pour des estimations indirectes de la perméabilité saturée en utilisant la méthode de Taylor. Les pourcentages de bentonite additionnés sont : 3%, 5%, 10%, 12% et 15%. Les échantillons sont compactés statiquement à l'OPN à une vitesse de 1,14 mm/min. Les estimations indirectes de la perméabilité sur ces mêmes mélanges nous a conduit à opter un mélange optimum de 85% S + 15 % B qui a satisfait la condition fondamentale des barrières ouvragées. Les valeurs de la perméabilité du mélange optimum varient de $7,4 \times 10^{-9}$ m/s à $1,5 \times 10^{-11}$ m/s selon les contraintes verticales appliquées variant de 25 kPa à 800 kPa (Gueddouda et al 2008). Des essais de perméabilité saturée ont été réalisés sur le même mélange optimum (85% S + 15 % B) en deux régimes différents. Ces essais ont été effectués à l'aide de l'appareil triaxial de révolution de type Bishop-Wesley. L'échantillon est compacté à la densité de Proctor normal par le compactage statique à double piston à une vitesse de 1,14 mm/min. Les dimensions de l'échantillons sont : $D=35$ mm, $H= 70$ mm. L'échantillon est saturé par application des contres pressions jusqu'à atteindre 600 kPa. Les deux régimes utilisés sont : (i) régime permanent (à charge constante, un gradient hydraulique constant de 57,14 ($\Delta u = 40$ kPa) et contraintes effectives moyennes variables σ'_3 ; (ii) régime transitoire (méthode de pulse, pulse constant (variation de la pression initiale $\Delta u_0 = u_e - u_s = 50$ kPa et contraintes

effectives moyennes variables ; u_e et u_s sont respectivement les pressions appliquées à l'entrée et la sortie de l'échantillon). Les résultats des essais de perméabilités en deux régimes ont confirmés le choix du mélange optimum. Les résultats sont représentés graphiquement dans la figure 2.

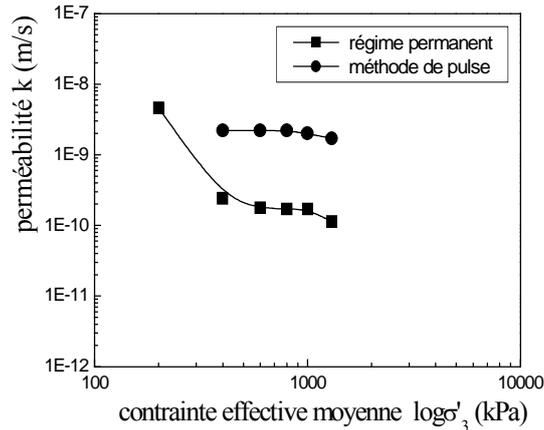


Figure 2. Variation de la perméabilité en fonction de la contrainte effective moyenne σ'_3

3. Programme expérimental

Le comportement sur chemin de drainage humidification est déterminé par un certain nombre d'essais. Ces essais consistent à imposer au sol une suite de pressions capillaires croissantes jusqu'à séchage complet (drainage), puis à le réhumidifier en imposant une suite de pressions capillaires décroissantes (imbibition). Trois méthodes d'imposition de succion ont été utilisées: (i) méthode des plaques tensiométriques pour des gammes de succion très faible (1 et 20 kPa). (ii) pour des gammes de succion faible (50kPa, 8400kPa), la méthode osmotique a été mise en œuvre (en utilisant le PEG 20000 pour la gamme de 50 à 1500 kPa et PEG 6000 pour la gamme de 3100 à 8400 kPa). (iii) la technique des solutions salines saturées permis de balayer les gammes de pression capillaire les plus élevées (8,4MPa à 156 MPa).

3.1. Préparation des échantillons

Les échantillons ont été confectionnés dans cinq état initiaux (différents degré de saturation) : (i) pâte saturé : l'échantillon est saturé préparé sous forme de pâte à une teneur en eau initiale égale à une fois et demi sa limite de liquidité ($w_0 = 1,5 \times w_L$). La pâte étant mis dans un sac en plastique (environ une journée) pour l'homogénéisation. (ii) pâte sèche : on prend une partie de la pâte saturée, puis la séché à l'étuve à 105°C pendant 24 heures (la partie de la pâte saturée est versée dans un plateau sous forme de petits échantillons d'environ 1cm³ de volume pour

chaque échantillon). (iii) échantillon compacté à l'optimum Proctor normal (OPN) : le mode opératoire consiste à humidifier la poudre du mélange à la teneur en eau correspondant à l'optimum Proctor normal puis elle est soigneusement conservée dans un sac étanche pendant une journée dans un milieu humide, ensuite le sol est compacté statiquement à la densité de Proctor normal (les dimensions des échantillons sont : $D=35$ mm, $H=70$ mm), le compactage statique à double piston est effectué à une vitesse de $1,14$ mm/min qui permet une répartition homogène de la contrainte de compactage (Ghembaza et al., 2007). L'échantillon ainsi compacté sera découpé à des galettes de 1 cm de hauteur, cette dernière est découpée en quatre parties (environ 1 cm³ de volume pour chaque partie) Figure 3. (iv) échantillons compactés à l'OPN - 2 et OPN + 2 : le mode opératoire de préparation est le même que l'échantillon de l'OPN, sauf en conservant la densité de Proctor est en variant la teneur en eau ($w_{opt} - 2$, $w_{opt} + 2$).

3.2 Principe des méthodes de contrôle et de mesure de la succion

3.2.1. Méthode des plaques tensiométriques (1 à 20 kPa)

Le principe de cette consiste à imposer à une hauteur de colonne d'eau « négative » à la base de l'échantillon à l'image d'un sol en contact avec une nappe phréatique souterraine à quelque mètre de profondeur. Le mode opératoire de préparation de cet essai comporte les étapes suivantes : (i) saturation des plaques avec de l'eau désaéré (ii) placer les plaques au niveau désiré avec saturation du réservoir et du tube avec de l'eau désaéré (10 cm, 30 cm, 60 cm, 100 cm, 150 cm, 200cm); (iii) couverture du réservoir de la plaque par un parafilm pour éviter l'évaporation (couvercle); (iv) pose des échantillons (Figure 3). L'équilibre intervient au bout d'une semaine.

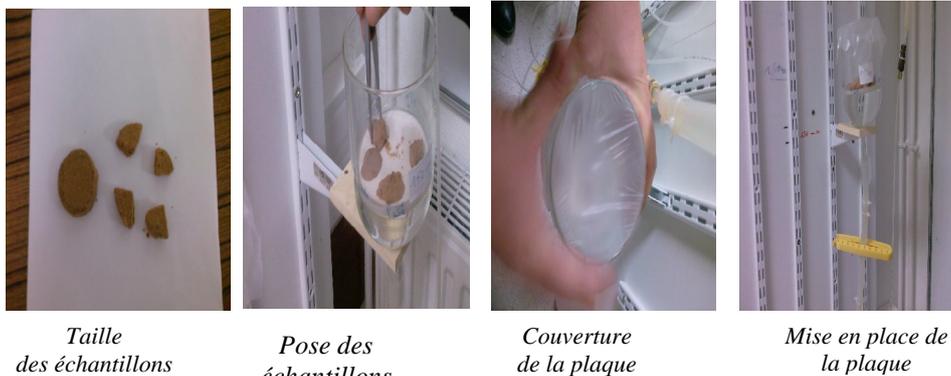


Figure 3. Mise en place de la plaque tensiométriques

3.2.2. Méthode osmotique

Le phénomène d'osmose s'observe lorsque deux solutions de concentrations différentes sont en contact à travers une membrane, perméable à l'un des solutés des phases en présence. Il repose sur la concentration qu'un système physique quelconque en déséquilibre tend toujours à se ramener à un état d'équilibre par transfert énergétique. L'utilisation de cette méthode nécessite la connaissance de la relation qui lie la concentration du PEG (polyéthylène glycol) avec la succion imposée. Les différentes concentrations de PEG20000 (MWCO 14000) et PEG 6000 (MWCO 3500. flatwidth : 54 ± 2 mm. Diameter :34mm) utilisées, sont indiquées dans le tableau 2. La pose des échantillons consiste à fixer la membrane semi-perméable (membrane de dialyse avec une faible porosité « 5nm ») dans le bûcher contenant du PEG par l'intermédiaire d'une bague en PVC, le rôle de la membrane poreuse ne laissant migrer que les molécules d'eau et les ions de la solution du sol. La bague est ensuite glissée sur les parois du bûcher jusqu'à ce que le contact entre la solution et la membrane sera parfaite (pas de bulle d'air). Les échantillons seront ensuite posés sur la membrane, le bûcher sera fermé par un couvercle (parafilm). On laisse les bûchers pendant deux semaines environ pour la stabilisation du transfert.

Masse PEG/500 ml eau PEG20000	$u_a - u_w$	Masse PEG/500 ml eau PEG6000 à 20C°.	$u_a - u_w$
g	kPa	g	MPa
27	50	260	3,1
45	100	313	4,5
59.5	200	371	6,3
79	400	423	7,4
94	600	459	8,4
105	800		
115	1000		
124	1200		
134	1500		

Tableau 2. *Succion imposée en fonction de la Concentration du PEG à 20C°.*

3.2.3. Méthode des solutions salines saturées (3 à 1000 MPa)

Cette méthode repose sur un principe physique : à une concentration en sel, une pression d'air et une température données correspondent à une seule pression partielle de vapeur d'eau. Lorsqu'une solution saline saturée est en équilibre thermodynamique avec sa vapeur, l'humidité relative de l'atmosphère environnante reste constante pour une valeur donnée T de la température. L'échantillon est placé dans un dessiccateur hermétiquement fermé et rempli d'une solution saline générant

une humidité relative connue. Les transferts hydriques se font ici en phase vapeur et sont donc beaucoup plus lents qu'avec les deux autres méthodes. Cette méthode est plus simple d'emploi et moins dangereuse, mais les échanges par phase vapeur sont plus lents et il faut environ 1 à 3 mois pour atteindre l'équilibre. La détermination des succions est déduite de la loi de Kelvin. Les solutions salines saturées utilisées et leurs succions en fonction de la température et l'humidité relative sont présentées dans le tableau 3.

Le paramètre humidité relative est très important, d'où la vérification de l'humidité relative des solutions salines saturées est nécessaire, pour cela on la mesure pour chaque solution en mettant un hygromètre à l'intérieur du dessiccateur et on relève les valeurs de l'humidité et de la température en fonction du temps.

Solution saline saturée	Humidité relative (Hr)% (T=24°C)	$u_a - u_w$ MPa	Masse du sel/500ml de solution g
CaNO ₃	64,5	61,57	1000
KCl	66,3	57,7	345
(NH ₄)Cl	76,1	38,35	375.65
NaCl	69,5	51	360
CH ₃ COOH	42,4	120,47	Liquide
KCNS	47	106,01	1118.12
CuSO ₄	85,6	21,8	Liquide
CaCl ₂	56,6	79,91	730
NaSO ₃ , 7H ₂ O	86,5	20,36	200

Tableau 3. Caractéristiques des solutions salines utilisées

4. Résultats et discussions

Les chemins de drainage-humidification du mélange étudié, initialement préparés sous forme de pâte à $w_i = 1,5$ wL, sont représentés sur la figure 4. Les chemins de drainage-humidification des mélanges compactés sont représentés dans les figures 5 et 6. Dans le cas général, l'application d'une pression interstitielle négative à un échantillon de sol se traduira simultanément par une variation de volume et de teneur en eau, ou encore d'indice des vides et de degré de saturation. C'est pourquoi, il est nécessaire de disposer d'une représentation globale de l'état du matériau incluant tous ces paramètres. La figure 4 comporte 5 graphiques qui se correspondent verticalement et horizontalement (Biarez et al. 1988 ; Fleureau et al. 1993).

La méthode de détermination des volumes externes (totaux) des échantillons après l'équilibre est basée sur une mesure hydrostatique dans l'huile de Kerdane. La densité de ce dernier est de l'ordre de $\gamma_k/\gamma_w = 0.783$, il s'évapore à l'étuve à 105°C. A partir de ce volume on déduit les teneurs en eau, degrés de saturation et indice des vides de chaque échantillon.

4.1. Pâte saturée (Chemin de drainage)

Dans le quadrant supérieur droit (indice des vides en fonction de la pression interstitielle négative) (Figure 4), on observe une variation importante d'indice des vides avec la pression interstitielle négative, qui s'apparente à la courbe de compressibilité classique d'un sol saturé. Contrairement à cette dernière, elle présente un palier quasi-horizontale lorsque la pression négative devient supérieure à une valeur seuil, notée S_{SL} . On note une forte irréversibilité entre le drainage et l'humidification avant le palier, et une quasi-réversibilité sur le palier.

Dans le quadrant supérieur gauche (indice des vides en fonction de la teneur en eau), l'indice des vides étant une mesure du volume global de l'échantillon, ce graphique présente en fait la courbe de retrait du sol. La saturation du sol se traduit par une droite passant par l'origine, d'équation : $e = (\gamma_s/\gamma_w).w$ (avec γ_s/γ_w : densité des grains solides). 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} . La limite de retrait w_{SL} est de l'ordre de 28% correspondant à e_{wL} de l'ordre de 0,75. Lorsque la teneur en eau décroît, l'indice des vides tend vers une valeur constante. On retrouve le même comportement que sur la figure de droite, avec le palier qui traduit l'arrêt des déformations après un séchage important du sol et que l'on peut interpréter par l'analyse des forces de contact entre grains, à l'échelle microscopique. La succion de la limite de retrait est estimée à $1,5 \cdot 10^3$ kPa.

Dans les deux quadrants du milieu sont reportées les variations du degré de saturation en fonction des deux mêmes variables, w et $-u_w$. Les deux courbes présentent deux parties sensiblement linéaires correspondant d'une part à un degré de saturation proche de 1 ($S_r > 90\%$), d'autre part à la désaturation très rapide du sol associée à une faible variation d'indice des vides (le degré de saturation décroît rapidement presque linéairement avec la teneur en eau). L'intersection entre les deux droites caractérise le point d'entrée d'air (le sol reste quasi saturé jusqu'à une pression d'environ 40 kPa correspondant à la teneur en eau de désaturation d'environ 31%), auquel correspond la « pression interstitielle négative de désaturation », notée $S_{désat}$; cette construction permet donc une détermination fiable et reproductible de ce point, par ailleurs très mal défini sur la courbe teneur en eau - indice des vides. Le degré de saturation décroît jusqu'à atteindre une valeur de 5 % pour une pression négative d'environ 10^5 kPa. La pression interstitielle négative de désaturation « $S_{désa}$ » est plus faible que la pression négative de retrait, caractérise également le comportement du matériau lorsque l'on part d'un sol saturé sous forme de pâte.

Dans le plan $[\log(-u_w), w]$, la diminution rapide du degré de saturation se traduit par une chute de la teneur en eau (succion comprise entre la succion de désaturation et la succion de la limite de retrait), cette diminution est linéaire et elle traduite par une grande pente. Dans le domaine ou la succion est inférieure à la succion de désaturation, on constate que la teneur diminue légèrement, cette diminution est linéaire et elle traduite par une faible pente correspondant au palier ou le degré de saturation reste constant (plan $[\log(-u_w), Sr]$ (domaine quasi saturé). Dans le domaine ou la succion est supérieure à la succion de la limite de retrait, on constate que la teneur tend vers un palier (teneur en eau presque constante) correspondant au palier ou l'indice reste constant (plan $[\log(-u_w), e]$).

4.2. Pâte sèche (Chemin d'humidification)

Si l'on considère à présent le chemin d'humidification dans les 5 graphes de la figure 4 de l'échantillon séché initialement à une succion de 120 MPa, on signale les remarques suivantes :

Dans les trois plans de droite (indice, succion et teneur en eau en fonction de la succion), dans le domaine ou la succion est supérieure à la succion de la limite de retrait, on constate l'apparition de trois paliers traduite par une quasi-réversibilité entre les chemins de drainage et les chemins d'humidification (domaine ou $Sr < 10\%$).

Dans le domaine ou la succion est inférieure à la succion de désaturation, l'augmentation de la teneur en eau et du degré de saturation est sensiblement plus importante, suivie d'une augmentation de l'indice des vides. Il s'agit d'une phase intermédiaire de saturation où les gros pores se resaturent progressivement.

Dans le domaine intermédiaire ou la succion est comprise entre la succion de désaturation et la succion de la limite de retrait, on constate une grande irréversibilité qui est clairement visible dans le plan $[\log(-u_w), Sr]$ caractérisé par la variation globale de volume du sol et du remplissage des pores.

Dans le plan $[w, Sr]$, on constate une quasi-réversibilité entre le chemin de drainage et d'humidification.

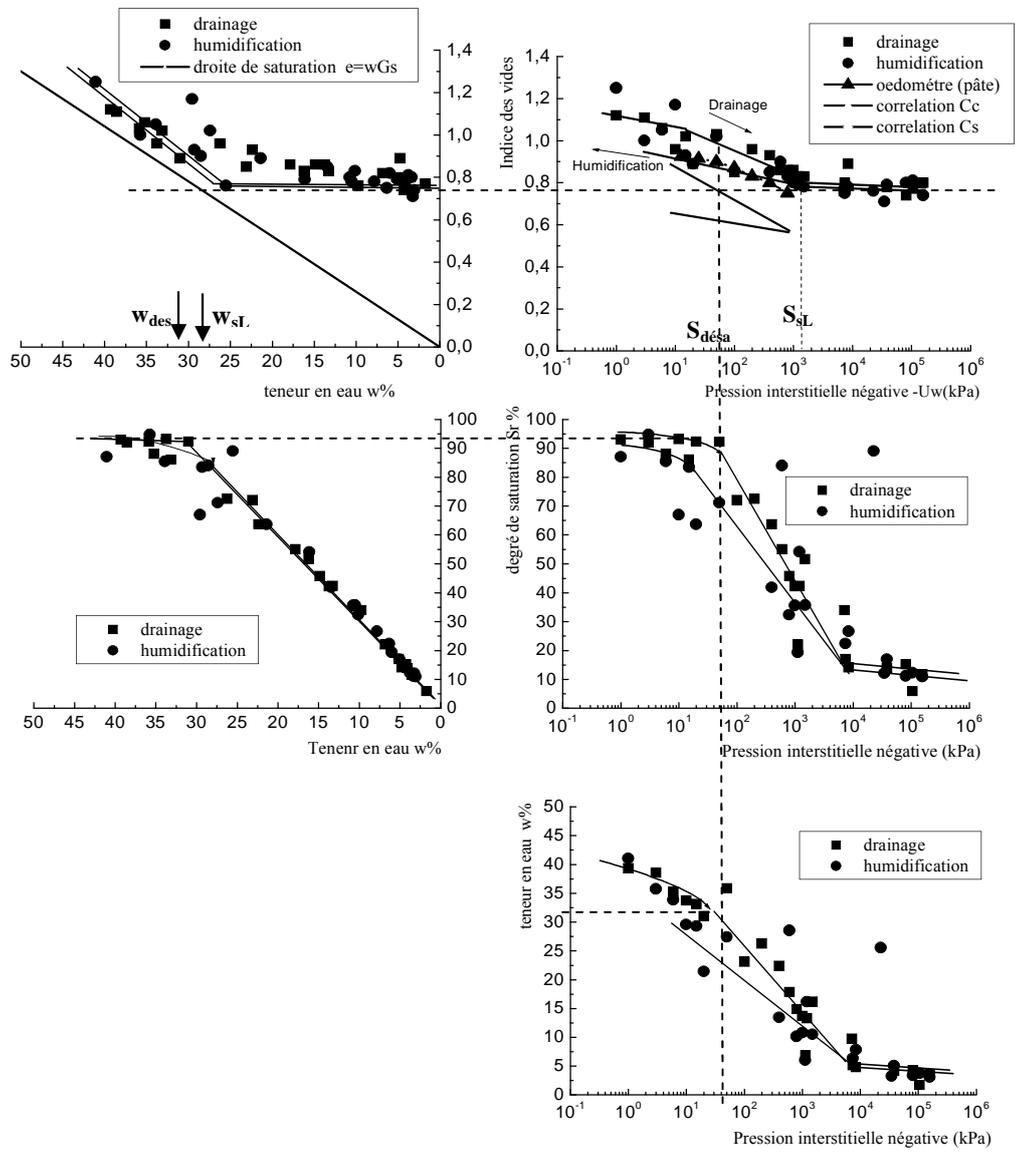


Figure 4. Chemin de drainage-humidification sur le mélange 85% s + 15% B préparé initialement sous forme de pâte ($w_0 = 1,5 w_L$)

4.3. Echantillon compacté (OPN-2, OPN, OPN+2)

La figure 6 représente le cycle de drainage- humidification des échantillons compactés (compactage statique) à différents degrés de saturation du côté sec et humide de l'OPN (OPN, OPN-2, OPN+2). Rappelons que l'état OPN est caractérisé par une teneur en eau de 15 % et correspondant à une pression interstitielle négative de 0,1 MPa, l'état de l'OPN-2 est caractérisé par une teneur en eau de 13 % et correspondant à une pression interstitielle négative de 0,5 MPa et l'état de l'OPN+2 est caractérisé par une teneur en eau de 17 % et correspondant à une pression interstitielle négative de 0,04 MPa (les différentes succions des trois états ont été déterminé par la méthode des papiers filtres W N°42). On constate que les échantillons suivent un chemin de drainage à partir de ces pressions interstitielles et un chemin d'humidification pour des valeurs inférieures à ces dernières.

Dans le plan $[\log(-u_w), S_r]$, le degré de saturation chute rapidement à partir de cette pression pour atteindre 5% pour une pression d'environ $5 \cdot 10^4$ kPa pour le cas de l'OPN+2. Pour le cas de l'OPN-2, le degré de saturation chute rapidement à partir de cette pression pour atteindre 3% pour une pression d'environ 10^5 kPa. Cette diminution rapide est également constatée dans le plan $[\log(-u_w), w]$. Pour des fortes pressions ($> 10^4$ kPa), les trois états d'échantillons se regroupent en formant un palier.

Dans le plan $[\log(-u_w), e]$, on constate que les échantillons présentent un même palier de la limite de retrait et ce palier des échantillons compactés est plus bas de celui de la pâte. Par ailleurs, dans le domaine quasi saturé, on constate que le gonflement est plus important pour les sols compactés à l'OPN-2, OPN et OPN+2 que pour les échantillons de pâte séchés initialement. On note aussi que le gonflement est plus important pour les sols compactés à l'OPN-2 que les autres états. Ce résultat confirme le rôle de la teneur en eau : plus la teneur en eau est élevée, plus le gonflement du sol diminue. Ce résultats est en accord avec les travaux de plusieurs chercheurs (Chen, 1988 ; Hachichi et Fleureau, 1999).

5. Comparaison entre chemin de drainage humidification et chemin oedométrique

Le tableau 4 présente les coefficients de la courbe de drainage-humidification et de la courbe oedométrique du mélange 85%S+15%B. Les coefficients C_D et C_H sont définis respectivement comme les pentes des chemins de drainage (C_D) et d'humidification (C_H) dans le plan $[\log(-uw), e]$. Les coefficients C_c et C_s sont définis respectivement comme les pentes de l'essai oedométrique dans les cas de chargement et déchargement dans le plan $[\log \sigma'_v, e]$. On constate que, les courbes de drainage humidification ont la même allure que les courbes œdométriques, ceci est caractérisé par les valeurs des coefficients des pentes dans les deux essais. Au-delà de la pression de consolidation, ces courbes présentent une partie sensiblement linéaire, qui correspond à un comportement non réversible.

Chemin D-H		oedomètre	
C_D	C_H	C_C	C_S
12	6	14	6

Tableau 4. Paramètres de l'essai drainage-humidification et essai oedométrique

Notons que pour une valeur donnée de la contrainte, la courbe oedométrique se trouve à un indice des vides inférieur à celui de la courbe de drainage. En conclusion, dans le domaine où les échantillons sont saturés, des incréments identiques de pression capillaire ou de contrainte mécanique produit la même variation d'indice des vides, ce qui rejoint les remarques de nombreux auteurs (Biarez et al 1988 ; Zerhouni 1991; Soemitro ; 1992, Derfouf ; 2005). La correspondance entre les chemins de compression et de drainage montre qu'il est possible d'établir une équivalence entre une contrainte externe et une pression négative interne.

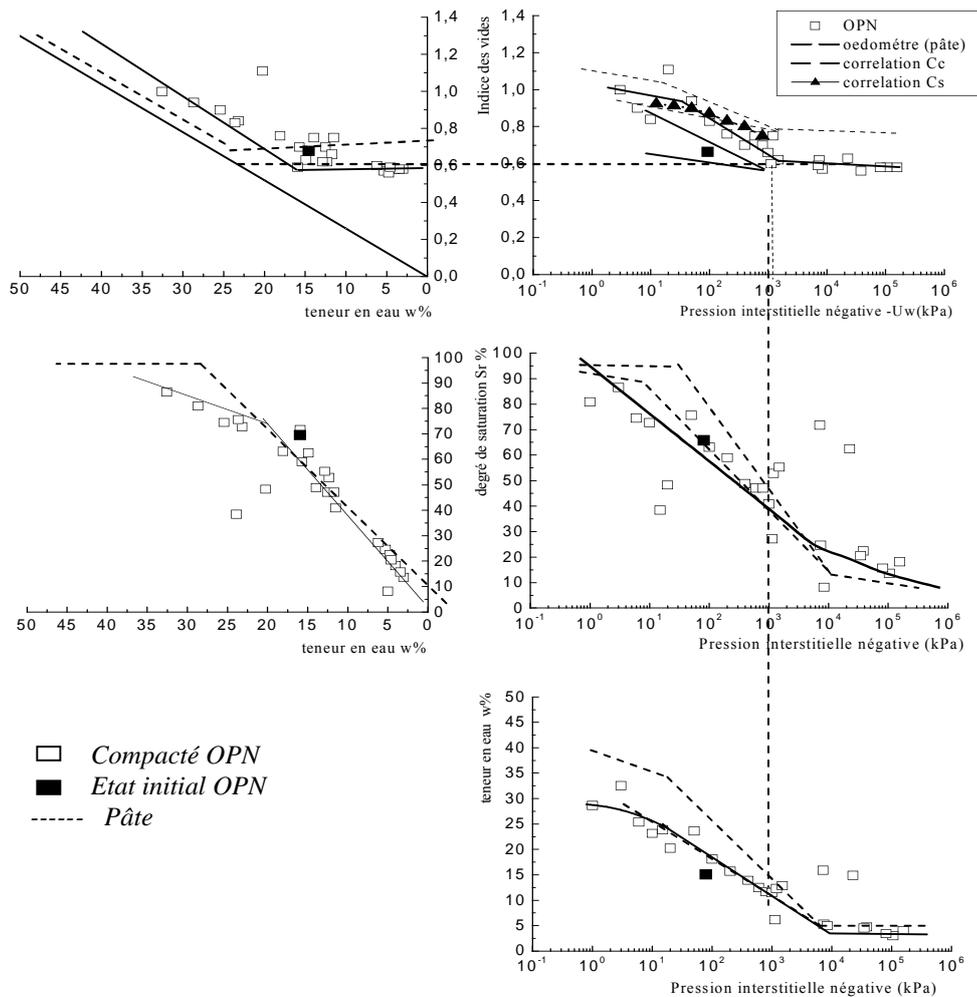


Figure 5. Chemin de drainage-humidification sur le mélange 85% s + 15% B compacté à l'optimum Proctor normal (OPN)

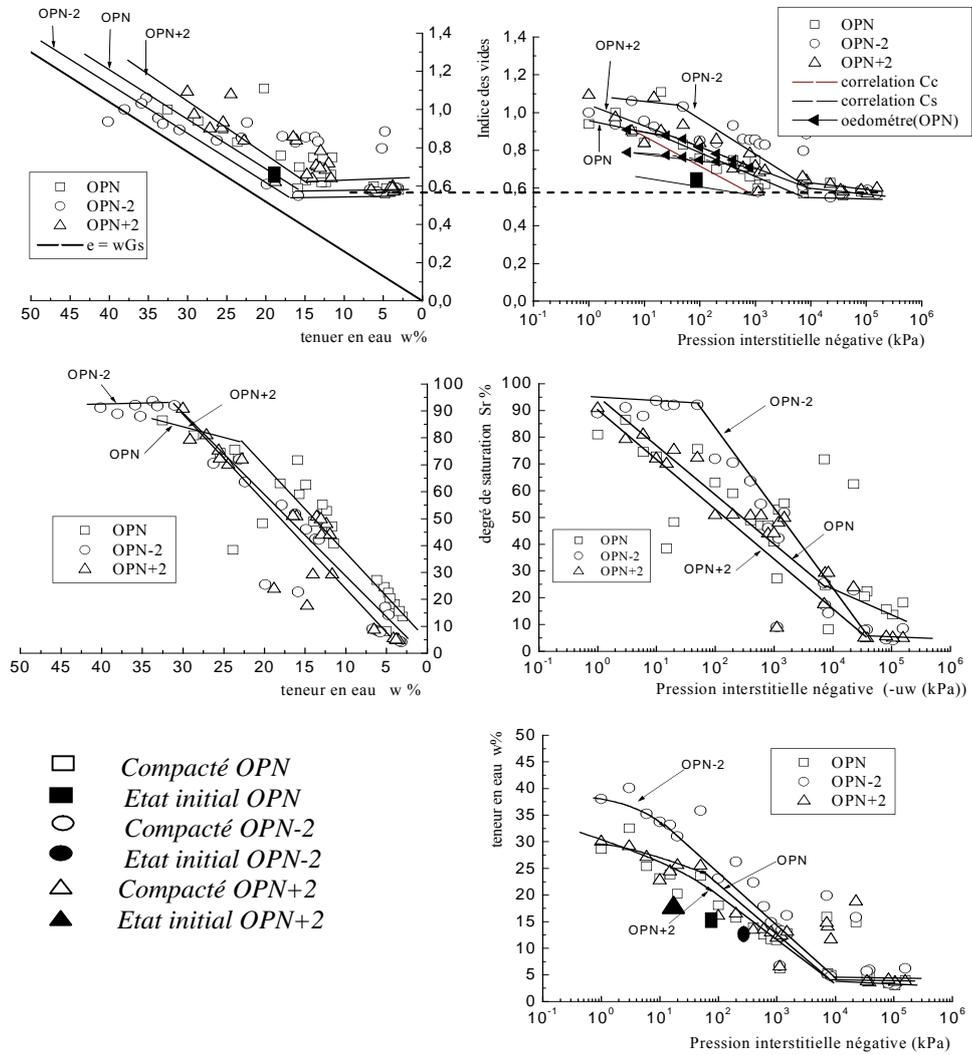


Figure 6. Chemin de drainage-humidification sur le mélange 85% s + 15% B compacté à différents degrés de saturation

6. Conclusion

Les essais qui ont été présentés dans cet article avaient d'abord pour but de montrer l'intérêt d'une représentation globale de l'état du matériau au cours d'un cycle de drainage - humidification. Cette représentation permet notamment de suivre l'évolution de la saturation du sol, de relier les caractéristiques de retrait aux caractéristiques de drainage et d'humidification.

Dans le cas des chemins de drainage et d'humidification du mélange préparé initialement sous forme de pâte fait apparaître un domaine quasi saturé de drainage, ou le volume varie de façon quasi linéaire avec le logarithme de la succion. Dans ce domaine, le chemin de drainage est similaire à une consolidation mécanique normalement consolidé sur le même matériau saturé. Sur le chemin d'humidification, ce domaine quasi saturé semble plus réduit.

En comparant les résultats obtenus sur le mélange s/b, sous forme de pâte et compacté on peut émettre ce qui suit :

Les paliers de retrait diffèrent, ceux des échantillons compactés (OPN, OPN-2%, OPN+2%) se trouvent au dessous de celui de la pâte. La pression capillaire de retrait est plus élevée et la limite de retrait plus faible pour les échantillons compactés par rapport à ceux sous forme de pâte.

La comparaison entre les essais de drainage - humidification et les essais mécaniques de compression - décompression oedométriques a montré qu'il existe, dans les conditions d'essai considérées, une équivalence entre la contrainte mécanique appliquée et la pression capillaire tant que le sol reste saturé.

7. Bibliographie

- Biarez J., Fleureau J.M., Zerhouni M.I., Soepandji B.S., "Variations de volume des sols argileux lors de cycles de drainage-humidification", *Revue Française de Géotechnique*, 41, 1988. pp. 63-71.
- Chapuis R.P., "Sand – Bentonite liners: predicting permeability from laboratory tests". *Canadien Geotechnical Journal*, 27, 1990, pp.47-57.
- Chen.F.H. « Foundations on expansive soils ». *Developments in Geotechnical Engineering, Vol 54*, Elsevier Publishing Co.Amsterdam, 464 pages.
- Coussy. O & Fleureau J.M., *Mécanique des sols non saturés*. Edition Lavoisier. Hermès, France. 2002.
- Derfouf F.M., *Comportement sur chemin de drainage humidification de deux argiles de la région de Tlemcen*. Mémoire de Magister. Université A. Belkaid, Tlemcen. 2005.
- Fleureau, J.M, Kheirbek-Saoud, S. Soemitro,R & Taibi, S., "Behavior of clayey soils on drying-wetting paths". *Canadien Geotechnical Journal*.30 n°2. 1993, p. 287-296.

- Ghembaza M.S, Taibi. S, Fleureau J.M., « Effet de la température sur le comportement des sols non saturé sur les chemins de drainage et d'humidification ». *Canadien Geotechnical Journal*, 44, 2007, pp.1064-1081.
- Gueddouda M.K, Lamara M, Abou-bker N, Goual I. « Caractérisation et stabilisation des sols expansifs : effet de l'association (sel + sable de dune sur les paramètres de gonflement). *Sols et Matériaux à Problèmes*. Coll. Int. Hammamet (Tunis), le 11 & 14 février 2007, pp.27-34
- Gueddouda M.K, Lamara M, Abou-bker N, Taibi S. "Hydraulic Conductivity and Shear Strength of Dune Sand–Bentonite Mixtures" *E.J.G.E.* Vol.13. Bund H. 2008.
- Hachichi.A, et Fleureau.J.M. « Caractérisation et stabilisation de quelques sols gonflants d'Algérie ». *Revue Française de Géotechnique*. N° 86. PP 37-51
- Lamara M, Gueddouda M.K, Benabed B. « Stabilisation physico-chimique des argiles gonflantes (sable de dune + sel) » *Revue française de Géotechnique* N° -115, 2^{ème} trimestre 2006. pp. 25-35.
- Parker R.J., Bateman S., and Williams D., "Design and management of landfills" *Geotechnical management of waste and contamination*", Fell, Phillips & Gerard (eds), Balkema, Rotterdam, 1993, pp.209-252.
- Serratrice J.F & B.Soyez, (1996). " Les essais de gonflements". *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*. 204., réf.4082, Juillet –Août 1996, pp. 65-85.
- Skempton A.W. « The collaïdal activity of clays ». *Proceedings of the Third International Conferences on Soil Mechanics and Foundations Engineering*, vol.1, 1953. pp 57-61.
- Verbrugge.J.C & Fleureau J.M., *Bases expérimentales du comportement des sols non saturés. Chapitre 2 du livre Mécanique des sols non saturés sous la direction de Coussy. O & Fleureau J.M.* Edition Lavoisier. Hermès, France.2002, pp.69-111.
- Soemitro R, Comportement hydraulique et mécanique des argiles gonflantes. *Thèse de l'ECP*, Paris. 1992.
- Zerhouni M I Rôle de la pression interstitielle négative dans le comportement des sols – Application aux routes. *Thèse de doctorat*. Ecole Central de paris. 1991.

8. 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.