

COMPORTEMENT HYDRIQUE D'UNE BARRIÈRE OUVRAGÉE SABLE DE DUNE-BENTONITE

HYDRIC BEHAVIOR OF DUNE SAND-BENTONITE BARRIER

M.K. GUEDDOUDA¹, N. ABOU-BEKR¹, S.TAIBI², R. ARAB³

¹ Laboratoire EOLE, Université A. Belkaid, Tlemcen, Algérie

² Laboratoire OMC, Université du Havre, Le Havre, France

³ AFITEX, Champhol, France

RÉSUMÉ – L'article présente une étude de valorisation de matériaux locaux à base de sable de dune de la région de Laghouat et de bentonite de carrière pour la conception de barrières ouvragées destinées à la réalisation des fonds des installations de stockage des déchets (ISD). En premier lieu, on présente les résultats des essais préliminaires des mélanges sable de dune-bentonite basés sur le critère de perméabilité qui ont fait apparaître que la formulation composée de 85 % de sable de dune et 15 % de bentonite satisfait ce critère. En second lieu, l'étude du comportement de ce mélange sur les chemins de drainage-humidification a été mise en évidence. Enfin, des essais de perméabilité saturée de ce mélange par deux méthodes différentes à l'aide de l'appareil triaxial ont été effectués. En général, la formulation à base de sable de dune et de bentonite adoptée répond parfaitement aux réglementations et constitue un bon matériau local, disponible en abondance pour la conception des barrières des fonds des ISD.

Mots-clés : sable de dune, bentonite, drainage-humidification, perméabilité saturée.

ABSTRACT - This paper presents a study on the valorisation of local material such as dune sand from Laghouat region and mine bentonite intended for insulation barriers for hazardous waste centers. Firstly, the results of preliminary tests on dune sand - bentonite mixtures are presented; it shows that the formulation composed with 85 % of dune sand and 15 % of bentonite satisfies the permeability criteria required by different regulations. Secondly, the behavior of this mixture on the drying and wetting paths are put forward for different samples initially prepared from past then compacted form. Finally saturated permeability tests on this mixture are carried out with two different techniques using triaxial apparatus. In general, the dune sand bentonite mixture adopted in this study satisfies perfectly the regulation requirements and hence constitutes a good local material which is largely available for the conception of barrier base liners.

Keywords : dune sand, bentonite, drying – wetting, saturated permeability.

1. Introduction

L'Algérie génère chaque année 10 à 12 millions de tonnes de déchets ménagers. Elle compte 3000 décharges sauvages. Ces décharges occupent une surface totale de l'ordre de 150 000 hectares (ministère de l'aménagement du territoire, de l'environnement et du tourisme algérien. Guide des techniciens communaux pour la gestion des déchets ménagers et assimilés (2009)). Le risque de pollution de la nappe souterraine est plus probable pour les régions du sud de l'Algérie. Ceci est dû, d'une part, à l'augmentation progressive du volume des déchets domestiques (expansion des villes) et industriels (exploitation des hydrocarbures) et, d'autre part, à l'absence quasi-totale de cours d'eau qui se déversent dans la mer. En conséquence, les substances chimiques générées par ces déchets demeurent dans le sol et seront lessivées par la suite vers les nappes d'eau potable par les processus d'infiltration des eaux pluviales.

Les couches étanches à base de sols compactés sont utilisées pour isoler les contaminants et les matériaux contaminés de l'environnement extérieur et empêcher par le fait même la contamination des sols, des eaux souterraines et de l'air. Une des solutions actuelles est de les contenir dans des lieux spécifiques ceinturés d'une couche étanche protectrice. L'efficacité de ces couches dépend de leur comportement mécanique, hydraulique et de leurs propriétés d'atténuation et de rétention de la contamination. D'après les recommandations de la communauté européenne, le coefficient de perméabilité saturée doit être inférieur à 10^{-9} m/s pour les fonds des installations de déchets ménagers et spéciaux (Van Impe et Bouazza, 1996). Ces recommandations sont conformes avec celles préconisées par le ministère de l'aménagement du territoire, de l'environnement et du tourisme algérien

dans le Guide des techniciens communaux pour la gestion des déchets ménagers et assimilés (2009). Une solution technologique consiste à utiliser un mélange sable-bentonite (Goran et al., 2002 ; Blatz et al., 2002 ; Chalermyanont et Arrykul, 2005 ; Aina, 2006 ; Cui et al., 2008).

En général, les caractéristiques des matériaux destinés à la couche d'étanchéité doivent répondre à certaines conditions (ADEME, 1999) : (i) une limite de liquidité $w_L \geq 25$ à 30% et un indice de plasticité $I_P \geq 10$ à 20 % ; (ii) la couche d'étanchéité ne doit pas contenir plus de 10% de gravier (dimensions supérieures à 0,5 cm) ; (iii) la teneur en carbone organique ne doit pas dépasser 5%. (iv) leurs propriétés de gonflement qui permettent le remplissage des fissures existantes ou qui se développeraient à posteriori ; (v) une très faible perméabilité ; (vi) des propriétés d'échange et d'adsorption aptes à retenir préférentiellement certains polluants.

L'article présente une étude de valorisation de matériaux locaux à base de sable de dune et de bentonite de carrière pour la conception de barrières ouvragées destinées à la réalisation des fonds des centres d'enfouissement technique (CET). Les gisements de bentonite les plus importants se trouvent dans l'ouest algérien. On relève en particulier la carrière de Maghnia (Tlemcen), dont les réserves sont estimées à onze millions de tonnes (Bental, 2002). Le sable de dune est largement disponible dans les régions sud de l'Algérie. La démarche scientifique intègre la caractérisation physico-chimique et hydrique de ce matériau, ce qui a abouti à proposer une formulation répondant aux critères réglementaires

2. Matériaux et méthodes

2.1 Matériaux

Deux matériaux à caractéristiques radicalement différentes ont été utilisés. Le premier matériau est une bentonite originaire d'une carrière de la région de Maghnia (ouest algérien). Elle est extraite du gisement de Hammam Boughrara (Tlemcen). Elle est non traitée et finement broyée. Ses principaux constituants minéralogiques sont : la silice (65,2 %) et l'alumine (17,25 %). Le rapport SiO_2 / Al_2O_3 est égal à 3,77. Les résultats des analyses chimiques sont résumés dans le tableau 1. Avec une limite de liquidité (w_L) de 141 % et un indice de plasticité (I_P) de 93 %, la bentonite de Maghnia est classée parmi les sols très argileux très plastiques (At) selon la classification LCPC / USCS. D'après la classification de Skempton et al. (1953) basée sur l'activité (A), la bentonite de Maghnia présente un fort pourcentage en Montmorillonite calcique (Ca^{2+}). Les résultats des essais d'identification de la bentonite de Maghnia sont résumés dans le tableau 2.

Tableau 1. Analyse chimique de la bentonite de Maghnia et du sable de dune

Bentonite de Maghnia							
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	CaO	K ₂ O	MgO	Fe ₂ O ₃	Autre
%	%	%	%	%	%	%	%
65,2	17,3	3	5	1,7	3,1	2,1	2,6

Sable de dune					
SiO ₂	SO ₃	Cl ⁻	CaCO ₃	Autre	M.O
%	%	%	%	%	%
96	1	0,4	2,5	0,1	0

Le second matériau est un sable de dune de la région de Laghouat ; cette région est considérée comme semi-aride à aride, située à 400 km au sud de la capitale Alger. Le sable de dune de la région de Laghouat est un sable siliceux. Les résultats des analyses chimiques du sable de dune sont résumés dans le tableau 1. Les résultats des analyses granulométriques résumés dans le tableau 2, ce sable se classe comme propre mal gradué (Sm (LCPC)= SP (USCS)).

Des mélanges sable de dune-bentonite ont été formulés avec différents pourcentages et pour chaque formule, des mesures préliminaires de la perméabilité saturée ont été effectuées à l'œdomètre sur des échantillons compactés à l'OPN (P 94-090). Le tableau 3 montre que la formule 85% Sable de dune + 15 % Bentonite satisfait cette condition principale. Dans la suite, on retiendra cette formule pour la conception de la barrière étanche qu'on nomme S₈₅B₁₅. Ce matériau S₈₅B₁₅ présente une limite de liquidité de 34 % et un indice de plasticité de 13. D'après la classification LCPC / USCS, il apparaît comme un sol moyennement argileux peu plastique (Ap/CL).

Tableau 2. Propriétés physico-mécaniques du sable de dune et de la bentonite

	% < 2 μm	% \leq 80 μm	w _L (%)	I _p (%)	S _p (m ² /g)	d _{max} (mm)	C _u	C _Z
B	60	85%	141	93	462	0,2	---	---
S	---	2%	---	----	1,4	0,5	1,7	1,1
Normes	NFP 94-56/57		NFP 94-51		NFP 94-	NFP 94-56		

Tableau 3. Perméabilité saturée des mélanges sable de dune- bentonite mesurée à l'œdomètre

% Sable	97	95	90	88	85
% Bentonite	3	5	10	12	15
σ_v (kPa)	25 800	25 800	25 800	25 800	25 800
k(m/s)	7,4.10 ⁻⁶ 4,7.10 ⁻⁷	1,1.10 ⁻⁶ 3,8.10 ⁻⁸	9,2.10 ⁻⁸ 2,2.10 ⁻⁹	3,6.10 ⁻⁸ 5,9.10 ⁻¹⁰	7,4.10 ⁻⁹ 4,5.10 ⁻¹¹

2.2. Méthodes

2.2.1. Chemins de drainage humidification

Nous désignons par chemins de drainage-humidification des chemins dans lesquels le paramètre essentiel est la succion, en l'absence de contrainte extérieure. Le comportement sur chemin de drainage humidification a été étudié par différents auteurs (Delage, 1987; Zerhouni, 1991 ; Fleureau et al., 1993 ; Taibi, 1994 ; Cui et al., 2002 ; Ghembaza et al., 2007). Ces essais consistent à imposer aux échantillons une suite de succions croissantes jusqu'à séchage complet (drainage), puis à le réhumidifier en imposant une suite de succions décroissantes (imbibition). À l'équilibre sous chaque succion, on mesure les caractéristiques d'état des échantillons par des pesées dans une huile non mouillante. Trois méthodes d'imposition de succion ont été utilisées : (i) méthode des plaques tensiométriques pour des gammes de succion très faible, de 1 à 20 kPa (1, 3, 6, 10 et 20 kPa). Son principe consiste à imposer 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 quelques mètres de profondeur. L'équilibre intervient au bout d'une semaine (Fleureau et al., 2002) ; (ii) la méthode osmotique a été mise en œuvre pour des gammes de succion comprise entre 50 et 8400 kPa. Dans cette technique, l'échantillon se trouve au contact d'une solution de macromolécules organiques de polyéthylène glycol PEG, à travers une membrane de dialyse de faible porosité (5nm), le PEG 20000 est utilisé pour la gamme de succion comprise entre 50 et 1500 kPa et le PEG 6000 pour la gamme de succion comprise entre 3100 et 8400 kPa. À l'équilibre, le potentiel d'hydratation du PEG est égal à celui du sol, et l'on peut établir une équivalence entre la concentration de la solution osmotique en PEG et la succion au bout de deux semaines (Ghembaza et al., 2007) ; (iii) la technique des solutions salines saturées permet de balayer les gammes de succion les plus élevées (3 MPa à 1000 MPa). Cette méthode repose sur un principe physique : à une concentration en sel, une pression d'air et une température donnée 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.

Pour la réalisation des essais de drainage-humidification, les échantillons ont été confectionnés dans cinq états initiaux (différents degré de saturation) : (i) pâte saturée : l'échantillon est préparé sous forme de pâte à une teneur en eau initiale égale à une fois et demie sa limite de liquidité ($w_0 = 1,5 \times w_L$). (ii) pâte sèche : à l'étuve à 105°C pendant 24 heures. (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 à la conserver dans un sac étanche pendant une journée dans un milieu humide, ensuite cette poudre est compactée statiquement à la densité de Proctor Normal. Le compactage statique à double piston est effectué à une vitesse de 1,14 mm/min et permet une

répartition homogène de la contrainte de compactage (Ghembaza et al., 2007). L'échantillon ainsi compacté est découpé en galettes de 1cm de hauteur. Chaque galette est découpée en quatre quarts d'environ 1 cm^3 chacun. (iv) échantillons compactés à l'OPN - 2 et OPN + 2 : le mode opératoire de préparation est le même que celui du compactage à l'OPN, sauf que la teneur en eau est respectivement $w_{\text{OPN}-2}$, $w_{\text{OPN}+2}$.

2.2.2. Mesure de la perméabilité saturée

La mesure de la perméabilité saturée est effectuée sur des échantillons compactés statiquement à l'OPN. Deux méthodes de mesure ont été utilisées:

(i) Mesure en régime permanent (à charge constante) : c'est une méthode directe basée sur la loi de Darcy ;

(ii) Mesure en régime transitoire: la méthode utilisée est celle dite « pulse test ». Le principe de l'essai consiste à soumettre un échantillon de sol à une pression différentielle instantanée à l'une de ses extrémités. L'observation de la dissipation de la pression en fonction du temps permet la détermination de la perméabilité.

Les essais ont été réalisés dans un perméamètre à paroi flexible. Le dispositif expérimental est composé d'une cellule triaxiale de révolution de type Bishop- Wesley, pilotée à l'aide de trois contrôleurs pression- volume (GDS). L'écoulement se fait verticalement de bas en haut. Le programme expérimental consiste à réaliser deux séries d'essais pour chaque régime (permanent et transitoire) afin de voir l'effet de la contrainte effective moyenne (gradient hydraulique, $i = \text{constant}$) et l'effet du gradient hydraulique (contrainte moyenne effective constante, $\sigma'_3 = \text{constant}$). Pour comparer les mesures des deux régimes, il est nécessaire de conserver les mêmes conditions initiales de l'échantillon.

3. Résultats et discussions

3.1. Chemins de drainage-humidification

Les chemins de drainage-humidification du mélange $S_{85}B_{15}$, initialement préparé sous forme de pâte à $w_i = 1,5 w_L$, sont représentés sur la figure 1. Les chemins de drainage-humidification des mélanges $S_{85}B_{15}$ compactés statiquement à différents degrés de saturation sont représentés dans la figure 2. En général, l'application d'une succion 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. La représentation globale de l'état du matériau incluant tous ces paramètres comporte 5 plans qui se correspondent verticalement et horizontalement (Biarez et al., 1988 ; Fleureau et al., 1993).

Dans la figure 1, le plan $[w, e]$ présente la courbe de retrait usuelle. Sur un chemin de dessiccation, le sol suit d'abord la droite de saturation d'équation : $e = (\gamma_s/\gamma_d).w$. Lorsque la teneur en eau décroît, l'indice des vides tend vers une valeur asymptotique constante. L'intersection de la droite de saturation avec l'asymptote horizontale de la courbe de drainage quand w tend vers zéro correspond à la limite de retrait du sol (w_{SL}). La limite de retrait w_{SL} est de l'ordre de 28% correspondant à l'indice des vides de limite de retrait $e_{w_{SL}}$ de l'ordre de 0,75.

Le plan $[lg(s), e]$ représente la courbe de compressibilité hydrique. Le coude de la courbe où débute le palier de retrait constitue un point caractéristique de ce plan (Taibi, 1994). Une variation importante d'indice des vides avec la succion est observée avant d'atteindre le palier de la limite de retrait. Nous désignons par succion de limite de retrait s_{SL} , l'abscisse du point où débute le palier horizontal. Elle est estimée pour le matériau $S_{85}B_{15}$ à 2 MPa. On note une forte hystérésis entre les chemins de drainage et d'humidification avant le palier et une quasi-réversibilité sur le palier.

Le plan $[w, S_r]$ présente deux parties sensiblement linéaires, la première partie présente un palier horizontal qui met en évidence le domaine dans lequel le sol reste quasi- saturé (degré de saturation proche de 1 ($S_r > 95\%$)). La deuxième partie met en évidence la désaturation du sol qui se traduit par une diminution rapide du degré de saturation avec la teneur en eau. L'intersection de la droite de drainage tracée pour des degrés de saturation inférieurs à 50 % et l'axe horizontal correspondant à $S_r = 100\%$ donne la teneur en eau de désaturation notée w_d estimée à 31%.

Le plan $[lg(s), S_r]$ présente la variation du degré de saturation avec la succion. Le sol reste quasi-saturé jusqu'à une succion d'environ 0,1MPa correspondant à la succion de désaturation s_d ou point d'entrée d'air. Ensuite, le degré de saturation décroît rapidement pour atteindre une valeur de 5 % pour une succion de l'ordre 10 MPa. La succion de désaturation (s_d) est plus faible que la succion de limite de retrait s_{SL} , ceci caractérise généralement le comportement des sols lorsqu'on part d'un sol saturé sous forme de pâte.

Dans le plan $[lg(s), w]$, on remarque dans le domaine quasi-saturé ($s < s_d$) que la teneur en eau varie peu. Au-delà de s_d , on note une diminution rapide de la teneur en eau jusqu'à une succion égale à s_{SL} .

Lorsque la succion est supérieure à la succion de limite de retrait ($s > s_{SL}$), on constate que la teneur en eau tend vers un palier correspondant au palier ou l'indice des vides reste constant.

À titre indicatif, nous avons superposé sur la figure 1 dans le plan $[\lg(s), e]$, la droite de corrélation normalement consolidée de pente $C_c = 0,009(w_L - 13)$ (Biarez et Favre, 1975), on remarque que cette droite de corrélation est parallèle au chemin de drainage dans sa partie normalement consolidée. Cependant, le fort décalage des deux droites laisse penser qu'une corrélation basée sur l'utilisation de e_{min} et e_{max} (Biarez et Favre, 1975), plutôt que w_L , serait mieux adaptée à ce matériau qui contient 85% de sable.

Si l'on considère à présent le chemin d'humidification dans les 5 graphes de la figure 1 de l'échantillon séché initialement à l'étuve (105°C), on constate que l'hystérésis dépend du domaine de succion considéré : Pour $10 < s < 156$ MPa, la teneur en eau, l'indice des vides et le degré de saturation varient peu. Le degré de saturation varie de 5 à environ 10%. L'hystérésis entre les chemins de drainage – d'humidification est négligeable. On note une quasi-réversibilité entre les deux chemins dans les cinq plans. Pour $0,1 < s < 10$ MPa, l'augmentation du degré de saturation et de la teneur en eau est plus importante. Il s'agit d'une phase intermédiaire de saturation où les gros pores se resaturent progressivement. Dans ce domaine, l'hystérésis entre le chemin de drainage et le chemin d'humidification apparaît dans les trois plans : $[l_0(s), e]$, $[\lg(s), w]$ et $[\lg(s), S_r]$. Elle résulte essentiellement d'un effet de type « bouteille d'encre » (Mualem, 1974 ; Fleureau, 1979 ; Zerhouni, 1991). Pour $s < 0,1$ MPa, le sol est quasi saturé et le chemin d'humidification dans le plan $[\log(s), e]$ suit une pente plus faible que celle du drainage. Ceci est dû au fait que le drainage est un chemin de compressibilité plastique et l'humidification est un « déchargement hydrique » qui suit un chemin élastique.

Dans les plans $[w, S_r]$ et $[w, e]$, on constate une quasi-réversibilité entre le chemin de drainage et d'humidification.

La figure 2 présente le cycle de drainage- humidification des échantillons compactés à différents teneurs en eau du côté sec et humide de l'OPN : OPN, OPN-2, OPN+2. Les succions initiales sont déterminées par la méthode du papier filtre (ASTM Standard D5298-03). L'état OPN est caractérisé par une teneur en eau de 15,2 % et correspond à une succion de 0,1 MPa, l'état OPN-2 est caractérisé par une teneur en eau de 13 % et correspond à une succion de 0,5 MPa et l'état OPN+2 est caractérisé par une teneur en eau de 17 % et correspond à une succion de 0,04 MPa. Les échantillons suivent un chemin de drainage pour des valeurs de succion supérieures aux succions initiales et un chemin d'humidification pour des valeurs inférieures. Nous avons superposé à ces points expérimentaux des échantillons compactés, les chemins de drainage et d'humidification de la pâte représentée dans les cinq plans par des lignes continues. Les chemins de drainage et d'humidification de l'échantillon compacté à l'OPN sont présentées dans les deux plans ($[\lg(s), e]$ et $[w, e]$) par des lignes en pointillés.

Dans le plan $[\lg(s), S_r]$, le degré de saturation des échantillons chute rapidement à partir de l'état initial pour atteindre 3 % pour une succion d'environ 40 MPa. Cette diminution rapide est également constatée dans le plan $[\lg(s), w]$. Dans le plan $[\lg(s), e]$, le point initial de l'échantillon compacté à l'OPN semble décalé par rapport aux autres points expérimentaux. Ceci est dû à la qualité de la mesure de la succion par la méthode du papier filtre qui est peu précise, comparée aux autres points expérimentaux où la succion a été imposée. Pour des fortes succions (> 10 MPa), les trois états se regroupent sur le même palier de la limite de retrait et ce palier des échantillons compactés est plus bas que celui de la pâte. Ceci confirme que la limite de retrait n'est pas un paramètre intrinsèque du matériau mais dépend de son état initial (Fleureau et al., 1993). L'indice des vides de limite de retrait e_{SL} des échantillons compactés est de l'ordre de 0,57. Par ailleurs, sur les chemins d'humidification, on constate que la pente de gonflement est plus importante pour les échantillons compactés que pour les échantillons de la pâte séchée. Ce résultat confirme le rôle de la contrainte de consolidation : plus la contrainte de consolidation est élevée, plus le module de gonflement du sol est grand. Cette conclusion doit être nuancée, lorsque l'on compare des échantillons compactés et des échantillons séchés, par l'influence de la microstructure du sol, qui est très différente dans les deux cas. La préparation d'un échantillon compacté entraîne en effet l'existence de « mottes » ou d'agrégats dont les dimensions peuvent être extrêmement variables et qui modifient sensiblement le comportement du matériau (Taibi, 1994 ; Fleureau et al., 2002 ; Ghembaza et al., 2007). Ce résultat confirme aussi le rôle de la teneur en eau : plus la teneur en eau de compactage est élevée, plus le gonflement du sol est faible. Ce résultats est en accord avec les travaux de plusieurs chercheurs (Chen, 1988 ; Hachichi et Fleureau., 1999). Le tableau 5 regroupe les paramètres déduits des essais de drainage-humidification dans les différents états initiaux. Une variation de la teneur en eau de 2% du côté sec et humide de l'OPN n'influe pas sur les paramètres déduits des chemins de drainage-humidification (e_{SL} , w_{SL} , s_{SL}).

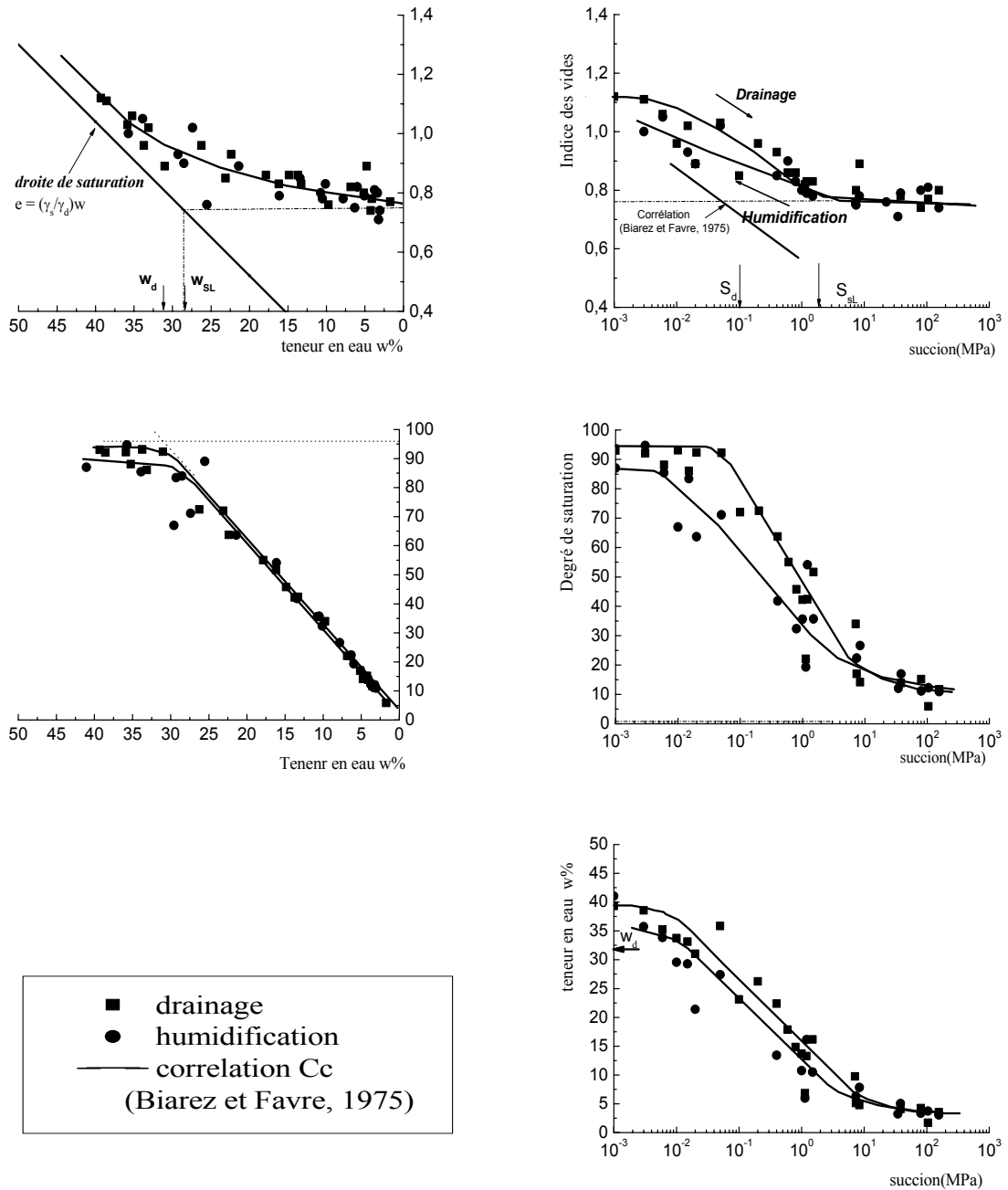


Figure 1. Chemin de drainage-humidification du mélange $S_{85}B_{15}$ préparé initialement sous forme de pâte

Tableau 5. Paramètres des chemins de drainage-humidification des échantillons dans les différents états initiaux

	s_{SL} (MPa)	e_{SL}	w_{SL} (%)
pâte	2	0,75	28
OPN	$\cong 1$	$\cong 0,57$	$\cong 22$

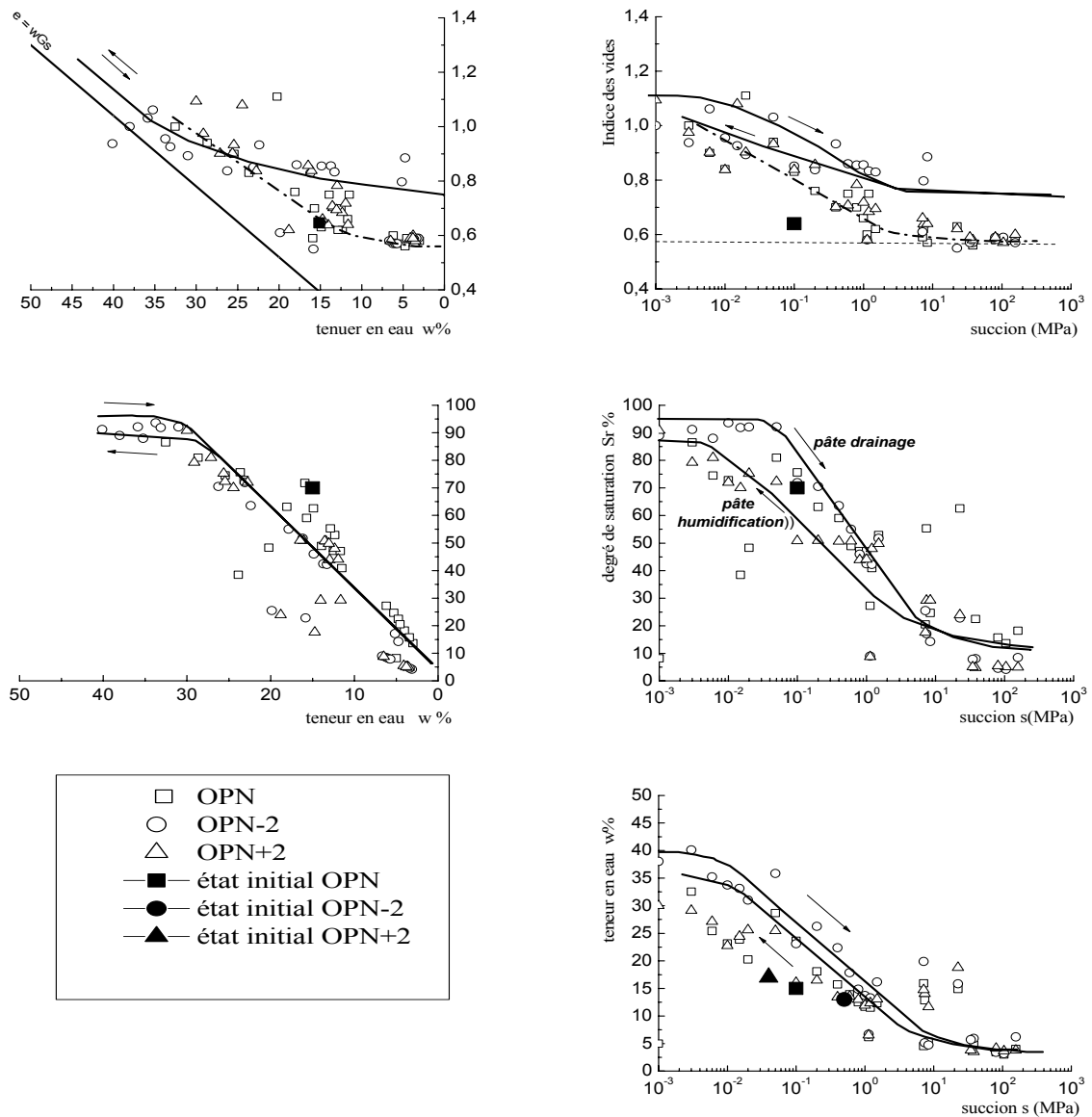


Figure 2. Chemin de drainage-humidification sur le mélange S₈₅B₁₅ compacté à différents états initiaux

3.2. Conductivité hydraulique saturée

Pour la mesure du coefficient de perméabilité saturée du mélange S₈₅B₁₅ compacté statiquement à l'OPN, deux méthodes de mesure différentes ont été utilisées dans le but de comparer les temps de mesure de ce paramètre: (i) méthode en régime permanent; (ii) méthode en régime transitoire dite méthode de pulse (Brace et al., 1968 ; Souli et al., 2008). Les dimensions de l'échantillon sont H = 70 mm et D = 35 mm. Les effets de la contrainte effective moyenne (σ'_3) et du gradient hydraulique sur le coefficient de perméabilité ont été étudiés. Les échantillons compactés ont été saturés par application d'une contre pression de 200 kPa.

Dans le cas de la mesure en régime permanent, le coefficient de perméabilité est déduit par application directe de la loi de Darcy. La figure 3 montre un exemple des volumes entrant et sortant de l'échantillon en fonction de temps. On remarque que les débits entrant et sortant sont identiques après 15 minutes environ, temps nécessaire à l'établissement du régime permanent.

Dans le cas de la mesure en régime transitoire, le coefficient de perméabilité est déterminé à partir de la courbe de dissipation de la pression en fonction du temps par application de loi de Darcy sur des incréments de temps courts d'environ 10 secondes. La figure 4 présente un exemple de dissipation de la pression en fonction du temps où la pression de confinement σ_3 est de 400kPa. On constate que le temps de dissipation est de l'ordre d'une heure environ.

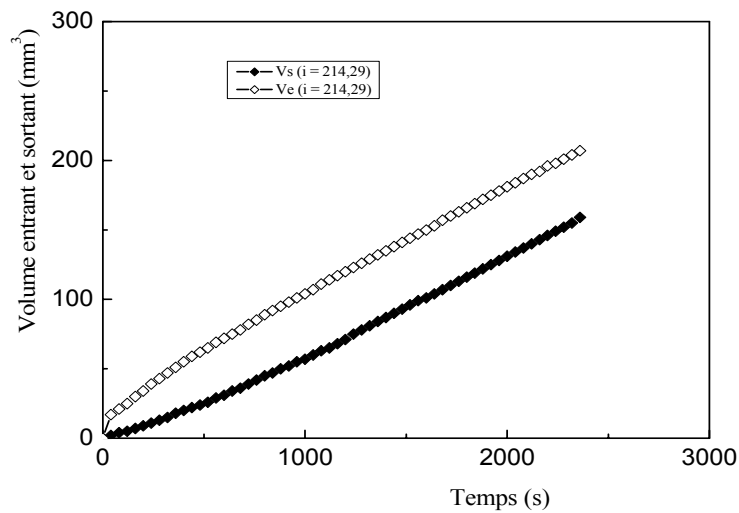


Figure 3. Variation des volumes entrant et sortant en fonction du temps ($i=214$, $\sigma_3' = 400\text{kPa}$)

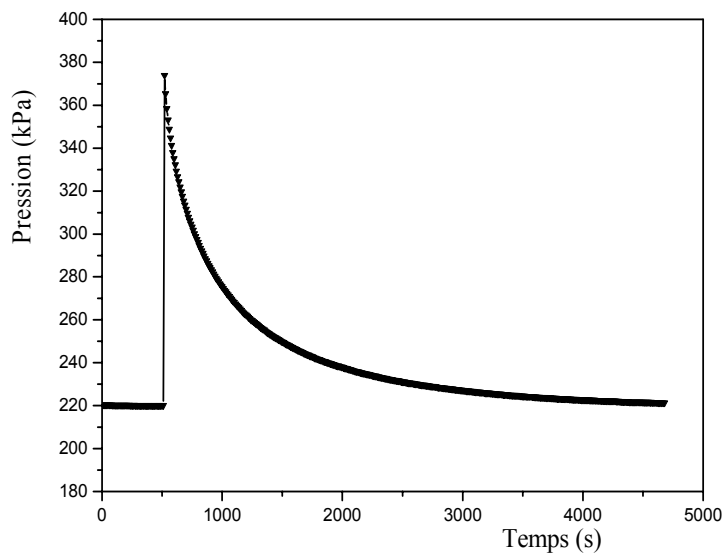


Figure 4. Dissipation de la pression en fonction de temps ($\sigma_3' = 400\text{ kPa}$, $i_0 = 214$)

La figure 5 présente l'effet du gradient hydraulique sur le coefficient de perméabilité mesuré par les deux méthodes. On remarque d'une part que le coefficient de perméabilité croît très légèrement avec le gradient et que la méthode de pulse donne des valeurs plus élevées que la méthode en régime permanent. La différence peut atteindre un facteur de 10.

La figure 6 présente l'influence de la contrainte effective de confinement sur le coefficient de perméabilité saturé. On remarque que, dans le domaine des contraintes testées (200-1300 kPa), on ne constate pas de variation du coefficient de perméabilité. Ceci est dû à la forte surconsolidation initiale de l'échantillon compacté à l'OPN qui le rend insensible à ce niveau de contrainte. Par ailleurs, on remarque toujours la différence d'un facteur de 10 environ des mesures effectuées par les deux méthodes.

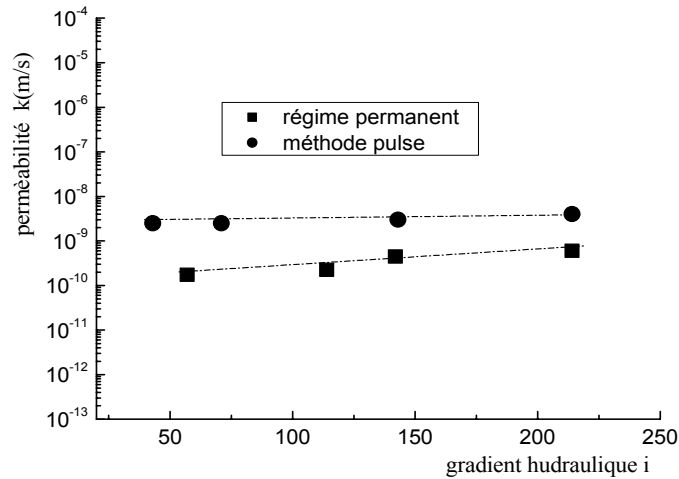


Figure 5. Variation du coefficient de perméabilité en fonction des gradients hydrauliques ($\sigma'_3 = 400$ kPa)

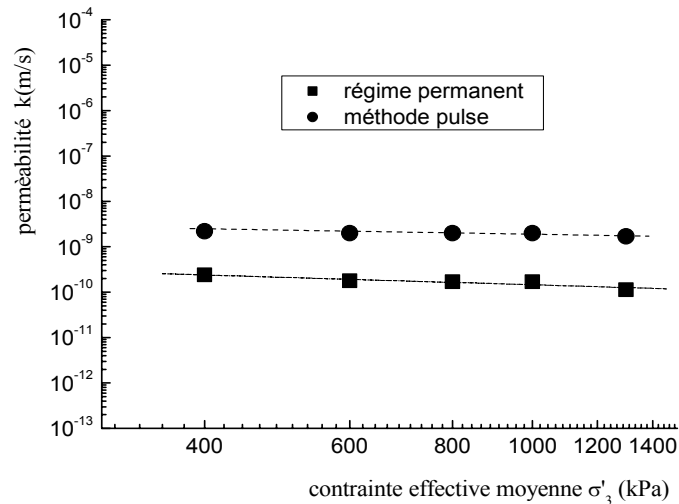


Figure 6. Variation du coefficient de perméabilité en fonction des contraintes effectives moyennes

4. Conclusions

Les essais préliminaires basés sur le critère de perméabilité ont fait apparaître que la formulation composée de 85 % de sable de dune et 15 % de bentonite satisfait ce critère pour la conception des barrières ouvragées des fonds des ISD.

Les chemins de drainage et d'humidification sur ce mélange $S_{85}B_{15}$ préparé initialement sous forme de pâte, font apparaître un domaine quasi-saturé jusqu'à une succion s_d de l'ordre de 0,1 MPa. Au-delà de ce domaine, on observe une diminution importante d'indice des vides, du degré de saturation et de la teneur en eau jusqu'à une succion de limite de retrait s_{SL} . Sur le chemin d'humidification, on observe une hystérésis entre le chemin de drainage et le chemin d'humidification lorsque la succion devient inférieure à s_{SL} . Dans le domaine des fortes suctions ($s > s_{SL}$), on observe une quasi-réversibilité entre les deux. Dans le cas du même matériau compacté initialement à l'OPN, le palier de limite de retrait est plus bas que celui de la pâte. Par ailleurs, dans le plan $[\log s, e]$ la pente de gonflement est plus importante que celle de la pâte séchée. Par ailleurs, on constate qu'une variation de la teneur en eau de 2% du côté sec et humide de l'OPN n'influe pas sur les chemins de drainage et d'humidification définis à l'OPN.

Par ailleurs, le coefficient de perméabilité saturée du matériau compacté est très peu sensible à la contrainte de confinement dans le domaine 0,4 -1,4 MPa.

Dans le cas des essais triaxiaux saturés CD et CU effectués sur le matériau $S_{85}B_{15}$ compacté à l'OPN, on observe un état de déformations plastiques jusqu'à la rupture sans l'apparition de paliers francs dans le plan $[\varepsilon_1-q]$. Ce type de comportement est caractéristique des sols fortement surconsolidés. Par ailleurs, dans le plan $[p'-q]$, les chemins suivis rejoignent la même droite enveloppe de résistances maximales (M_{max}) correspondant à un angle de frottement de l'ordre de 26° . Cette valeur

est conforme à l'ordre de grandeur recommandé pour les interfaces sols/géosynthétiques bentonitiques dans les CET (Garcin et al., 1998).

On en conclut que la formulation à base de sable de dune et de bentonite adoptée répond parfaitement aux exigences de la réglementation en vigueur et constitue un produit économique à base de matériaux locaux disponibles en abondance pour la conception des barrières des fonds des CET.

5. Références bibliographiques

- ADEME (1999). *Les installations de stockage de déchets ménagers et assimilés*. Techniques et Recommandations. ADEME Editions, Paris.
- Aina M.P. (2006). Expertises des centres d'enfouissement techniques de déchets urbains dans les PED : contributions à l'élaboration d'un guide méthodologique et à sa validation expérimentale sur sites, Thèse de Doctorat, Université de Limoges, France.
- Bental (2002). *Projet de développement des gisements d'argile bentonitique du district de Hammam Boughrara, Maghnia, (Tlemcen)*, Algérie.
- 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, p. 63-71.
- Blatz J.A., Graham J., Chandler N.A. (2002). Influence of suction on the strength and stiffness of compacted sand-bentonite ». *Canadian Geotechnical Journal*, 39, pp. 1005-1015.
- Brace W F., Walsh J B., Frangos W.T. (1968). Permeability of granite under high pressure », *J. Geol. Res.* 73, p. 2225-2236.
- Chalermyanont, T., Arrykul, S. (2005). Compacted sand-bentonite mixtures for hydraulic containment liners », *Songklanakarin J. Sci. Technol.*, 27(2): 313-323.
- Cui, Y.J., Tang, A.M., Loiseau, C., Delage, P. (2008). Determining water permeability of compacted bentonite-sand mixture under confined and free-swell conditions », *Physics and Chemistry of the Earth*, 33, S462-S471.
- Delage P. (1987). Aspects du Comportement des Sols Non Saturés. *Revue Française de Géotechnique*, 40, 1987, p. 33-43.
- Fleureau J.M., Kheirbek-Saoud S., Soemitro R., Taibi S. (1993). Behavior of clayey soils on drying-wetting paths. *Canadian Geotechnical Journal*, 30 n°2, p. 287-296.
- Fleureau J.M., Verbrugge J.C., Pedro J.H., Correia A.G., Kheirbek-Saoud. S. (2002). Aspects of the behaviour of compacted clayey soils on drying and wetting paths », *Canadian Geotechnical Journal*, 39, p. 1341-1357.
- Ghembaza M.S., Taibi S., Fleureau J.M. (2007). Effet de la température sur le comportement des sols non saturé sur les chemins de drainage et d'humidification », *Canadien Geotechnical Journal*, 44, p. 1064-1081.
- Goran S., Oberg-Hogsta A.L. (2002). Determination of hydraulic conductivity of sand-bentonite mixtures for engineering purposes », *Geotechnical and Geological Engineering*, 20: p. 65-80.
- Guide des techniciens communaux pour la gestion des déchets ménagers et assimilés. Ministère de l'Aménagement du Territoire, de l'Environnement et du Tourisme Algérien. 2009.
- Souli H., Fleureau J.M., Trabelsi A.M.B. (2008). Physicochemical analysis of permeability changes in the presence of zinc », *Elsevier, Geoderma*, , p. 1-7.
- Taibi S. (1994). Comportement mécanique et hydraulique des sols soumis à une pression interstitielle négative, étude expérimentale et modélisation, Unpublished thèse de Doctorat, Ecole Centrale Paris, France.
- Van Impe W.F., Bouazza A. (1991). Barrières d'étanchéité dans les sites de décharges : développement récents », *Revue Française de Géotechnique*, 74 : p. 3-18.
- Zerhouni M. I. (). Rôle de la pression interstitielle négative dans le comportement des sols – Application aux routes, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Paris.