

ETUDE DES MELANGES SABLE-BENTONITE UTILISES DANS LA CONSTRUCTION DE BARRIERES DE CONFINEMENT DE DECHETS SOLIDES

Reçu le 27/06/2005 – Accepté le 24/07/2006

Résumé

La pollution de l'environnement causée par les percolations de lixiviats issues de déchets solides confinés dans les sites d'enfouissement est un problème assez répandu et de nombreuses études lui ont été consacrées. Ce présent travail s'intéresse surtout à l'utilisation de la bentonite de Maghnia qui est de type sodique et qui est mélangée avec du sable pour être utilisée dans la construction de barrières destinées au confinement de ces déchets.

Généralement, les principales caractéristiques recherchées dans la conception des barrières de confinement sont :

- Une faible conductivité hydraulique ($k \leq 10^{-7}$ cm/s) pour minimiser les fuites ;
- Une résistance au cisaillement suffisante pour maintenir la stabilité de la barrière ;
- Un potentiel de retrait faible pour minimiser les fissures dues à la dessiccation avec un rétrécissement de moins de 10% [1].

Les aspects importants de la conception de telles barrières sont la conductivité hydraulique, le densité sèche maximum des mélanges compactés de sable /bentonite et la résistance au cisaillement du mélange.

Cette étude considère les propriétés de sept mélanges de sable/bentonite à différentes proportions, par rapport à leur performance en tant que barrière de confinement. Les résultats sur les essais de compactage, les essais de cisaillement direct ainsi que des essais de conductivité hydraulique de ces mélanges sont présentés. Une caractérisation physique et chimique a été menée par des essais standards sur les deux matériaux afin de déterminer leurs propriétés.

Finalement cette étude a montré qu'un mélange sable- bentonite à 10% assure une imperméabilisation adéquate des centres d'enfouissement technique.

Mots-clés : mélange sable/bentonite, conductivité hydraulique, barrières de confinement, déchets solides, centre d'enfouissement technique (C.E.T).

Abstract

Pollution of the environment by lixiviats leakages from landfills is a well-known and wide spread problem to which many studies have been devoted. The present study deals with the use of bentonite from Maghnia in a mixture sand/bentonite, for the design of barriers for solid waste confinement.

The requirements for an efficient barrier designed for solid waste confinement are as follows:

- A low hydraulic conductivity ($k \leq 10^{-7}$ cm/s) to minimize leakage;
- An adequate shear strength to maintain barrier stability;
- A minimal shrinkage potential to minimize cracking with less than 10% shrinkage [1].

This study has also considered the engineering properties of seven sand/bentonite mixtures with respect to their performances as confining barrier. Data on the compaction tests, direct shear tests and hydraulic conductivity tests of the mixtures are presented. Physical and chemical characterisations were conducted through standard tests to determine the properties of the two materials.

Finally, this study has shown that a mixture of sand-bentonite with 10% bentonite can produce an adequate barrier for solid waste confinement

Key words: sand /bentonite mixture, hydraulic conductivity, landfills, solid waste, barrier for confinement.

S. KOULOUGHLI¹

M. BENCHEIKH LEHOCINE²

¹Département Génie Civil,

²Département Chimie Industrielle
Faculté des Sciences de l'Ingénieur
Université Mentouri Constantine,
Algérie

ملخص

أن تلوث المحيط من التسربات التي تحدث من مواقع طمر النفايات الصلبة، مشكل معروف و منتشر كثيرا. العديد من

هذه الدراسات تهتم باستعمال البنتوناية من مدينة مغنية كمكون من خليط رمل / بنتوناية في بناء لعزل النفايات الصلبة. أهم الميزات المطلوبة أثناء وضع الحاجز العازل لنفايات الصلبة هي:

$$(k \leq 10^{-7} \text{ cm/s})$$

•

•

•

[1].

أهم الجوانب التي تدرس في الحواجز العازلة للنفايات الصلبة هي النفاذية، الكثافة الجافة القصوى والمقاومة للقص للخليط.

هذه الدراسة تقدم الخاصيات لسبع (07) خلاط من الرمل و البنتوناية و حصيلة تجارب الرص و النفاذية و القص لمجموع سبع خلاط مقدمة

Il existe 3000 décharges sauvages en Algérie dont 350 au niveau des 40 grandes villes du pays, représentant une superficie totale de 150.000 hectares [2]. Ces décharges sont situées le plus souvent sur des terres agricoles ou d'élevage ou le long des oueds. Les impacts de la gestion non rationnelle des déchets ont été estimés en termes monétaires à 0,32% du PIB dont 0,19% en impacts sur la santé et 0,13% en pertes économiques (potentiel de recyclage et de valorisation non réalisés).

La nouvelle stratégie en matière de gestion des déchets repose sur les principes universellement admis et notamment :

- La réduction de la production des déchets à la source.
- La collecte, le transport et l'élimination des déchets.
- Conformément aux dispositions de la loi 01 – 19 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets, l'Etat et les collectivités locales se sont dotés d'un instrument légal pour une gestion intégrée des déchets. Le traitement des déchets passe par la réalisation de centres d'enfouissement techniques (CET) qui doivent comporter :
 - un système de casiers et d'alvéoles étanches.

- un système de drainage et de traitement des lixiviats (eaux de percolation et effluents issus de la décomposition des déchets.).
- un système de captage et d'élimination des biogaz issus de la décomposition de la fraction organique des déchets.

Le principe des CET repose sur le confinement des matières polluantes et c'est le rôle du système d'étanchéité qui comprend un filtre, une couche drainante et l'étanchéité proprement dite. Cette dernière est constituée par des barrières physiques de confinement situées entre le déchet et l'environnement extérieur.

Les mélanges sable/bentonite (S/B) sont fréquemment utilisés comme barrière de confinement dans la construction de centres d'enfouissement techniques [3], particulièrement en l'absence de sols naturels imperméables. La complémentarité des propriétés des deux matériaux, la bentonite et le sable, les rend très appropriés pour la réalisation des fonds étanches de ces centres. La présence du sable constitue le 'squelette' qui donne au mélange sa résistance et sa stabilité. La bentonite remplit les vides entre les particules de sable et assure ainsi au mélange sa faible conductivité hydraulique qui repose largement sur les propriétés de la bentonite et en particulier sa capacité de gonflement, permettant la création d'un milieu continu. Pour l'obtention d'une conductivité hydraulique faible, il est essentiel d'obtenir une répartition uniforme de la bentonite à travers tous les pores du mélange. En outre la densité de la bentonite dans les pores doit être la plus élevée possible. Ceci peut être obtenu par un compactage optimal du mélange (sable/bentonite).

Généralement, plus on augmente la proportion de bentonite dans le mélange, plus la conductivité hydraulique de ce dernier diminue. Mais en raison du coût de la bentonite, l'ajout doit être maintenu dans des proportions qui garantissent un bon fonctionnement de la barrière étanche conformément à l'état de l'art [4]. En pratique, le pourcentage de bentonite dans un mélange sable/bentonite utilisé pour la réalisation d'une barrière étanche varie entre 4 et 12 % [5].

Les autres facteurs qui influent sur la conductivité hydraulique du mélange S/B sont la granulométrie du sable, son origine géologique, ainsi que sa provenance. Ces derniers facteurs déterminent la forme des grains de sable et la configuration des pores.

Pour réaliser une barrière en sable/bentonite, il est nécessaire de sélectionner en premier un sable et une bentonite et étudier le comportement hydraulique de mélanges S/B à différentes teneurs en bentonite, caractérisé essentiellement par la conductivité hydraulique. Ce paramètre noté k est exprimé en cm/s. Généralement, la conductivité hydraulique du sable varie de 1 à 1×10^{-5} cm/s [6]. Elle peut être réduite si le sable est mélangé à un matériau imperméable comme la bentonite qui est un matériau argileux à usage industriel, essentiellement composé de smectite et plus particulièrement de montmorillonite. Il en existe une certaine diversité dont les performances, vis à vis de la propriété imperméabilisation, dépendent des paramètres suivants de la bentonite :

- La teneur en montmorillonite ;

- La concentration relative en sodium et en calcium ;
- La finesse de mouture qui a une conséquence indirecte sur l'activité de la bentonite. A poids égal, une bentonite fortement broyée a une surface d'exposition supérieure (surface spécifique) et s'hydrate plus rapidement que la bentonite grossière.

Pour satisfaire aux exigences d'une conductivité hydraulique minimale, des essais de laboratoire sont réalisés avant la construction de la barrière d'étanchéité. Ces essais ont pour but de déterminer les caractéristiques de mélange et de mise en place des matériaux et établir des spécifications de design [7] pour l'utilisation de la bentonite de Maghnia dans la confection de CET.

Pour les mélanges sable/bentonite, la courbe Proctor donne le couple teneur en eau optimale –densité sèche maximale et les essais de conductivité hydraulique fournissent le couple teneur en bentonite – conductivité hydraulique.

Dans cette étude, des essais ont été réalisés pour déterminer les paramètres des mélanges de sable/bentonite qui peuvent générer des conductivités hydrauliques inférieures à 1×10^{-7} cm/s, valeur exigée par de nombreuses réglementations internationales (ex. législation Française avec la loi du 13 juillet 1992, réglementation Fédérale Canadienne, réglementation de l'Environmental Protection Agency -EPA- aux Etats –Unis) [8], tout en gardant une bonne résistance au cisaillement. Ces paramètres ont été obtenus à partir d'essais de laboratoire, notamment :

- L'essai de conductivité hydraulique au perméamètre à charge variable fixé sur l'oedomètre qui permet de déterminer le coefficient de conductivité hydraulique ' k ' (cm/s).
- L'essai Proctor normal qui permet de déterminer les caractéristiques de compactage d'un matériau. En effet, le compactage diminue le volume des vides du mélange et par conséquent réduit sa conductivité hydraulique et augmente sa résistance mécanique.
- L'essai de cisaillement direct à la boîte qui permet de déterminer la résistance au cisaillement du mélange. Les paramètres à la rupture qu'on obtient pour plusieurs états de contraintes permettent en particulier d'étudier la stabilité des pentes des talus du CET.

2. MATERIAUX ET METHODES EXPERIMENTALES

2.1 Matériaux :

La bentonite de Maghnia utilisée dans cette étude est manufacturée par Bentoal (E.N.O.F) et est de type sodique. Elle est utilisée généralement dans les travaux de forage. Le sable provient d'une carrière située à environ 15 Km au Nord- Est de la ville de Constantine. Les propriétés de ces deux matériaux ont été déterminées par des essais standard tels que la granulométrie, les limites d'Atterberg, la densité spécifique, l'essai au bleu de méthylène et l'essai de surface spécifique Blaine.

Des tests spécifiques ont également été réalisés sur la bentonite tels que l'essai par spectroscopie de photoélectron X mesure du pH, l'essai de gonflement libre (free swell

index) et l'essai de l'absorption d'eau sur la plaque (Plate Water Absorption –PWA). Ces essais sont décrits ci-dessous et toutes les expériences dans ce travail ont été réalisées sur un même lot de bentonite. Cette dernière est prélevée directement de son emballage d'usine pour les besoins des divers essais. Les échantillons de sable ont été obtenus par quartage à partir d'un lot global d'environ une tonne.

2.2 Méthodes expérimentales :

2.2.1 Indice de gonflement libre (free swell index) :

L'essai de gonflement libre est une procédure utilisée pour déterminer les caractéristiques générales de gonflement de la bentonite [9]. Bien que ce test ne possède pas une corrélation proportionnelle avec les propriétés hydrauliques de la bentonite, un grand pouvoir de gonflement est considéré par beaucoup de chercheurs [6] comme un bon indicateur sur la qualité de colmatage de la bentonite et peut donc être utilisé dans ce sens.

L'essai, tel que définie par la norme ASTM D 5890, consiste à ajouter une quantité de 2g de bentonite dans une burette graduée contenant 100 ml d'eau distillée. On lit simplement le niveau de l'interface entre le gel et l'eau claire. La mesure est exprimée en ml. Ce test présente l'intérêt d'être assez simple et montre une bonne reproductibilité.

Il existe sur le même principe un test modifié où la procédure ci-dessus est répétée pour trois échantillons similaires (2g par 100 ml d'eau), et on laisse sédimenter de la même manière. Ce test de gonflement libre présente d'après E.P.A [10] une bonne corrélation avec les essais de conductivité hydraulique. Un indice de 18 ml/2g correspond approximativement à un coefficient de conductivité hydraulique de 10^{-11} m/s.

2.2.2 Absorption d'eau sur plaque (Plate Water Absorption –PWA) :

Ce test montre la capacité de la bentonite en poudre (sèche) placée sur une plaque poreuse à absorber l'eau. 2g de bentonite sont posés sur un papier filtre puis sur une large plaque poreuse. Le niveau d'eau vient effleurer le niveau supérieur de la plaque.

On mesure l'accroissement de poids pendant 18 heures. Les valeurs varient entre 700 et 1000 % pour la bentonite sodique. Ce test montre toujours d'après EPA, une bonne corrélation avec les essais de conductivité hydraulique libre. Il est standardisé aux Etats-Unis par la norme ASTM E-946.

2.2.3 Le pH:

Le pH des suspensions de bentonite est un indicateur de la présence des cations échangeables. Le pH des bentonites sodiques varie entre 8,5 et 10,5 tandis que celui des bentonites calciques est inférieur à 8,5 [11]. Le test consiste à préparer une suspension de 40 grammes de bentonite dans de l'eau distillée et à mesurer son pH après 24 heures.

2.2.4 Les essais de compactage :

Les essais de compactage ont été réalisés pour déterminer les teneurs en eau optimales et les densités

sèches maximales des mélanges sable/bentonite étudiés. Ces mélanges ont été préparés par l'ajout d'un pourcentage de bentonite à trois (03) kg de sable séché à l'étuve. Les pourcentages de bentonites utilisés sont : 3%, 5%, 8%, 10%, 15%, 20% et 22% pondéraux. Six échantillons par mélange ont été préparés, en ajoutant la quantité de bentonite nécessaire. Chaque échantillon a été homogénéisé par un malaxeur électrique de marque Seidner pendant 10 minutes. De l'eau de robinet a ensuite été rajoutée aux mélanges selon les quantités désirées. Les échantillons ont été gardés pendant 24 heures dans des récipients étanches pour permettre leur hydratation avant l'opération de compactage. Pour chaque mélange, l'Optimum Proctor (densité sèche maximale, teneur en eau optimale) a été déterminé par l'essai proctor normal (d'après NF P 94 – 093).

2.2.5 Détermination des paramètres de la résistance au cisaillement :

L'essai de cisaillement direct à la boîte a permis de déterminer les paramètres de la résistance au cisaillement à savoir la cohésion et l'angle de frottement interne des mélanges sable/bentonite (d'après NF P 94 – 071-1). L'appareil de cisaillement utilisé dans cette étude est un Wykeham Farrance qui reçoit un échantillon de 100 x 100 x 40 mm.

Les échantillons de sable/bentonite ont été compactés dans la boîte de façon à atteindre une teneur en eau proche de celle de l'optimum Proctor ($w_{opt} + 2$ à 6%) et laissées ensuite 24 heures pour consolider sous la contrainte normale choisie avant l'essai de cisaillement. Pour chaque essai de cisaillement direct, trois contraintes normales ont été utilisées 11.7, 26.7 et 80.1 kPa avec une vitesse de cisaillement suffisamment lente de 0.060mm /min pour être dans des conditions de cisaillement drainé.

2.2.6 Mesure de la conductivité hydraulique :

Pour déterminer la conductivité hydraulique des mélanges sable-bentonite, les essais ont été réalisés à l'oedomètre. Le perméamètre, du type à charge variable, est fixé sur le support solidaire du bâti à l'aide de vis et d'écrous à oreilles. Il comporte un tube placé devant une échelle graduée en charge hydraulique de 10 à 60 cm et qui est réglable en hauteur pour être étalonnée en fonction de la hauteur de l'échantillon. Un réservoir permet de saturer les circuits. Pour minimiser les pertes d'eau par évaporation, le tube a été couvert d'un petit ballon en plastique légèrement gonflé.

Les échantillons sont préparés en mélangeant en premier le sable avec la quantité choisie de bentonite sèche en poudre, de l'eau est ajoutée afin d'obtenir la teneur en eau ($w_{opt} + 2$ à 6%) voulue dans le mélange. Les échantillons (12 mm de haut et 70 mm de diamètre) sont placés et compactés à la main en 03 couches dans l'anneau.

La teneur en eau est mesurée afin d'atteindre une valeur supérieure à la valeur optimale ($w_{opt} + 2$ à 6%). L'essai de conductivité hydraulique est effectué après consolidation. La saturation se fait par le bas de l'échantillon sous une charge hydraulique initiale de 50 cm. La saturation incomplète de l'échantillon reste un inconvénient de ce type de cellule.

L'échantillon est protégé du séchage par des réserves d'eau derrière les pierres poreuses dont la conductivité hydraulique est d'environ 10^{-2} cm/s.

3. RESULTATS DE L'ETUDE DES MATERIAUX:

Afin de fixer d'une manière optimale les propriétés des matériaux du couple sable/bentonite qui rentrent dans la composition de la barrière de confinement, les résultats obtenus par les différents essais sur ces matériaux sont discutés ci-après.

3.1 La bentonite :

La bentonite de cette étude est produite à partir de plusieurs bassins volcaniques du Tertiaire à l'Ouest du pays et parce qu'elles sont des matériaux naturels, les bentonites varient considérablement d'une origine à l'autre au regard de leur composition chimique, minérale et organique et de leur granulométrie.

L'analyse chimique d'échantillons de la bentonite de Maghnia préparés sous forme de pastilles a été effectuée par spectroscopie de photoélectron X. Le spectromètre utilisé est un appareil Philips (Magi X PRO). Il se compose d'une source de rayons X, d'un analyseur d'énergie, d'un système de détection et d'acquisition et d'un groupe de pompage. L'énergie de l'analyseur est fixée à 20 e-V. L'acquisition des spectres et leur traitement mathématique sont réalisés par le logiciel SuperQ.

Ce qui donne une composition chimique pour la bentonite de Maghnia dont les résultats de l'analyse est présenté dans les tableaux 1 a et b suivants :

Tableau 1 : Résultat de l'analyse élémentaire et en % d'oxyde

Elts	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ti	Fe
%	45.2	5.59	2.63	14.4	22.6	0.042	0.0886	0.555	4.58	0.77	0.188	3.21

(a) Analyses élémentaires

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	SO ₃	Rb ₂ O
%	58.455	17.143	4.589	4.364	1.078	7.532	5.512	0.314	0.221	0.107

(% en poids)

(b) les oxydes

Cette composition chimique est comparée à celles de quelques bentonites commerciales utilisées dans les travaux d'imperméabilisations dans le tableau 2 suivant.

Tableau 2 : Composition chimique de bentonites commerciales (exprimée en % du poids des oxydes) [12].

*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SiO ₂	63.00	60.00	62.00	62.70	59.73	60.22	60.76	59.91	58.67	58.455
Al ₂ O ₃	22.54	22.42	23.50	22.20	24.30	23.87	23.08	21.97	27.34	17.143
Fe ₂ O ₃	2.27	3.74	3.35	4.62	5.54	6.28	6.10	6.72	3.64	4.589
MgO	2.00	2.65	3.35	2.01	3.00	1.55	1.57	2.25	2.62	4.364
CaO	1.00	1.68	1.30	0.58	0.50	0.13	0.17	0.34	0.50	1.078
Na ₂ O	5.17	4.21	3.45	7.06	6.59	6.96	6.07	6.68	7.04	7.532
K ₂ O	3.60	3.63	3.03	0.62	0.22	0.59	1.72	1.71	0.18	5.512
TiO ₂	-	-	-	-	-	0.34	0.38	0.33	-	0.314
SO ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.221
Rb ₂ O	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.107

* 1. Mine du Honjo, Japon. 2. Tala, Argentine 3. Crook county, Wyo. USA. 4. Yamagata, Japon. 5. Amory, Miss. USA. 6. Ponzia, Italie 7. San Gabriel, Argentine. 8. Taourit, Maroc 9. Aspro Chorio, Grèce 10. Maghnia, Algérie.

L'analyse élémentaire montre que la bentonite de Maghnia contient, par rapport aux autres, moins d'alumine

et d'avantage d'éléments secondaires tels que le magnésium et le potassium.

Le type d'argile peut être déterminé par le calcul du rapport SiO₂ / Al₂O₃. Pour la bentonite de Maghnia, ce rapport est de 3.78 et cette valeur est l'indice d'une montmorillonite [13]. Au vu de la prépondérance du pourcentage de sodium sur celui du calcium, ceci suggère que cette dernière est de type montmorillonite sodique [14]. Ceci est conforté par la valeur du pH de 10.1 comme montré dans le tableau.3. D'après ces résultats et en se basant sur les classifications qualitatives et quantitatives citées dans la littérature internationale, la bentonite de Maghnia possède un potentiel de gonflement très élevé. La surface spécifique, l'indice de plasticité, la limite de retrait indiquent également un pouvoir de rétention d'eau assez élevé. Ceci a été confirmé par la mesure de l'indice de gonflement (Free Swell Index) et de l'essai d'absorption d'eau à la plaque (Plate Water Absorption).

Les principales propriétés mesurées de cette bentonite sont listées dans le tableau 3 et sont comparées à celles de bentonites utilisées dans la construction de C.E.T dans le tableau 4.

Tableau 3 : Propriétés de la bentonite sodique de Maghnia

Propriétés	Valeur
Surface Spécifique ¹	872 m ² /g
Masse Volumique (Gs) ²	2.72
Indice de Gonflement (Free Swell Index) ⁴ (Résultat de l'essai de gonflement libre modifié)	35 cm ³ /g
Absorption d'Eau à la Plaque (Plate Water ⁹ Absorption)	900%
Valeur au Bleu ⁵	29.41
pH ⁶	10.1
Limite de Liquidité ³	216%
Indice de Plasticité ³	120%
Limite de Retrait ⁷	11%
Teneur en Eau - à la livraison ⁸	12%

¹: Mesurer par l'essai suivant la norme ASTM C 204 – 89.

²: Déterminer selon la procédure norme NF P 94 -054.

³: Déterminer selon la procédure norme NF P 94 -051.

⁴: Déterminer selon la procédure décrite dans la norme ASTM D 5890.

⁵: Mesurer avec l'essai de bleu de méthylène d'après norme NFP 94 068.

⁶: Déterminer sur une suspension de 20g de bentonite dans 400 ml d'eau distillée.

⁷: Déterminer selon la procédure ASTM D427-61.

⁸: Déterminer selon la procédure norme NF P 94 -050.

⁹: Déterminer selon la procédure ASTM E-946.

Tableau 4 : Propriétés de quelques bentonites utilisées dans la construction de C.E.T comparées à ceux de la bentonite de Maghnia.

	Wyoming bentonite United States	Sodium bentonite Songkhla Province Thaïlande	Kolar bentonite Karnataka State Inde	Bentonite de Maghnia Algérie
Masse volumique	2.76	2.55	2.77	2.72
Surface spécifique	980 m ² /g	749 m ² /g	800 m ² /g	872 m ² /g
Gonflement libre	36 ml	-	-	35 ml
Valeur au bleu	-	-	34.0	29.41
pH	9.50	11	11	10.1
Limite de liquidité	407%	487%	310%	216%
Indice de plasticité	359%	452%	216%	120%

L'ingrédient primaire de la bentonite est la montmorillonite (figure 1). A l'état sec, une particule de montmorillonite ressemble à un livre fermé composé de plusieurs feuillets minces maintenus ensemble par des forces de van der Waals (figure 2) [15]. Quand la bentonite sèche et l'eau sont mélangées comme dans le cas des mélanges sable/bentonite, l'eau est attirée dans les particules de montmorillonite pour hydrater les surfaces des feuillets élémentaires. Pour la combinaison de la montmorillonite et l'eau de robinet utilisée dans cette étude, cette dernière forme un film épais visqueux et ionique autour des feuillets provoquant ainsi le gonflement des particules de montmorillonite [16]. Les bentonites disponibles dans le commerce sont des montmorillonites avec des impuretés telles que de fines particules de quartz.

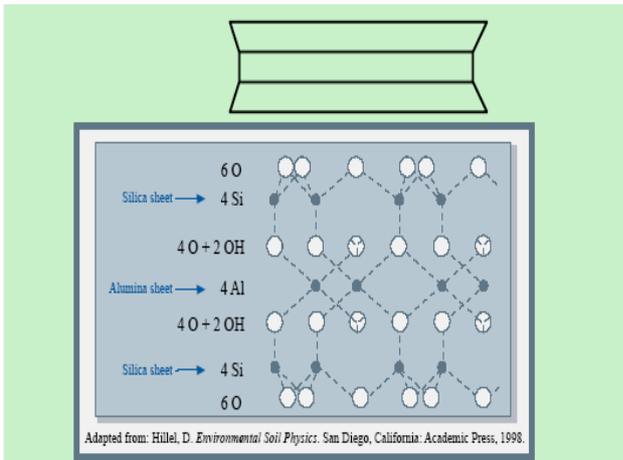


Figure 1 : Structure moléculaire de la Montmorillonite (reproduit de : Hillel, D., 1998.Environmental Soils Physics.San Diego, California Academic Press)

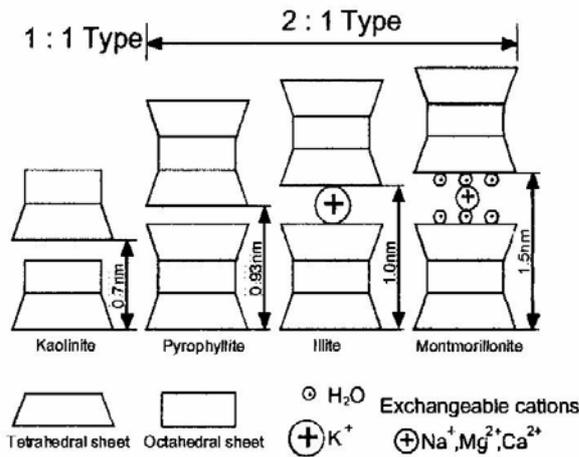


Figure 2 : Arrangement Structural dans des Minéraux argileux typiques

3.2 Le sable :

La courbe granulométrique du sable utilisé est représenté sur la figure 3. Cette granulométrie est uniforme [17], caractérisée par un coefficient d'uniformité, inférieur à 2, un diamètre moyen $D_{50} = 0,6$ mm. Les principales propriétés du sable sont montrées dans le tableau 5 ci-dessous.

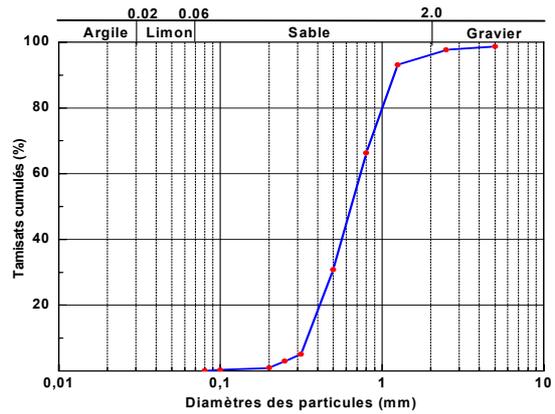


Figure 3 : Courbe Granulometrique du sable utilisé

Tableau 5 : Propriétés du sable jaune utilisé

Propriétés	Valeur
Coefficient d'Uniformité ($Cu = D_{60} / D_{10}$) ¹⁰	1.9
Diamètre Effectif (D_{10}) ¹⁰	0.38 mm
Masse Volumique (Gs)	2.5
Teneur en Eau	~ 3%

¹⁰ : Déterminé selon la procédure ASTM D421-58.

3.3 Les résultats des tests de compactage :

Les résultats des essais de compactage sont montrés sur la figure 4. Les valeurs des densités sèches sont données en fonction des teneurs en eau des mélanges, pour les différents mélanges. Les courbes obtenues pour l'ensemble des mélanges sable/bentonite sont des courbes typiques de compactage [18] où la densité sèche du mélange s'accroît avec l'augmentation de la teneur en eau jusqu'à une valeur optimale, pour ensuite décroître alors que la teneur en eau augmente.

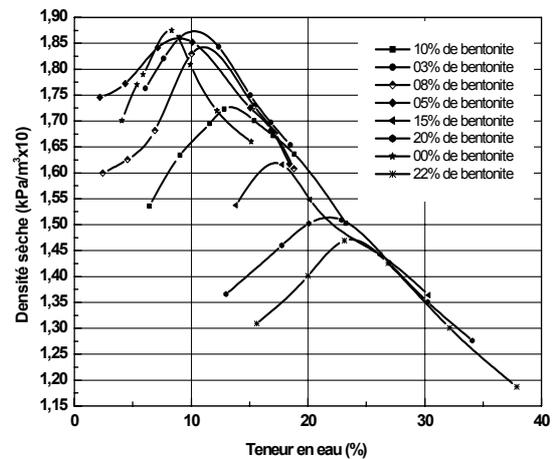


Figure 4 : Résultats des essais de compactage: variation de la densité sèche en fonction de la teneur en eau pour les huit mélanges étudiés.

Les densités sèches maximales et les teneurs en eau optimales qui leur correspondent, obtenues graphiquement à partir des courbes de compactage (Optimum Proctor), sont représentées sur le tableau 6.

Tableau 6 : Densité sèche maximale et teneur en eau optimale des différents mélanges sable/bentonite.

Teneur en bentonite (%)	Densité sèche maximale (kPa / m ³)	Teneur en eau optimale (%)
0	18.69	8.33
3	18.61	9.0
5	18.52	10.1
8	18.30	10.95
10	17.23	12.80
15	16.35	20.30
20	15.09	22.87
22	14.60	23.00

On observe que la densité sèche maximale diminue alors que la teneur en eau augmente quand le pourcentage de bentonite dans le mélange s'accroît. Toutefois la teneur en eau optimale semble modérément affectée par l'augmentation du pourcentage de bentonite présent dans le mélange jusqu'aux environs de 7 % de bentonite. Au delà de ce niveau la teneur en eau optimale paraît augmenter plus rapidement. En effet, les figures 5 et 6 montrent que la variation de la teneur en bentonite de 0 à 22 % s'accompagne par une diminution de la densité sèche maximale de 18.69 à 14.60 kPa / m³ et les teneurs en eau optimales correspondantes s'accroissent de 8.33 à 23%.

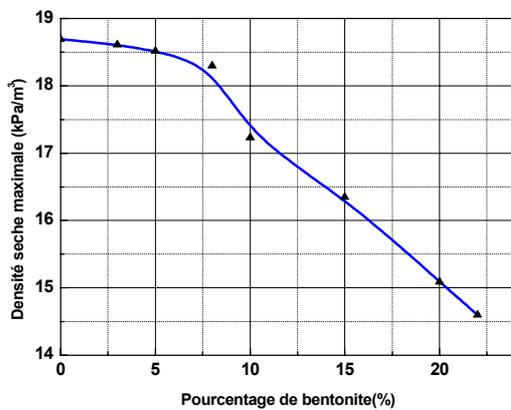


Figure 5 : Variation de la densité sèche maximale en fonction du pourcentage de bentonite des mélanges sable/bentonite

La présence de la bentonite rend la demande en eau plus importante. Cependant l'ajout d'eau, particulièrement pour les teneurs en bentonites élevées (ex. 15%,20%,22%), entraîne un gonflement important de la bentonite.

Ceci est dû à la diffusion de l'eau à l'intérieur des particules de cette dernière, résultant en une augmentation disproportionnée du volume apparent et de la masse du mélange.

Cela fait que la densité sèche diminue bien que la teneur en eau augmente, comme indiqué par le tableau 6 et les figures 4 et 5.

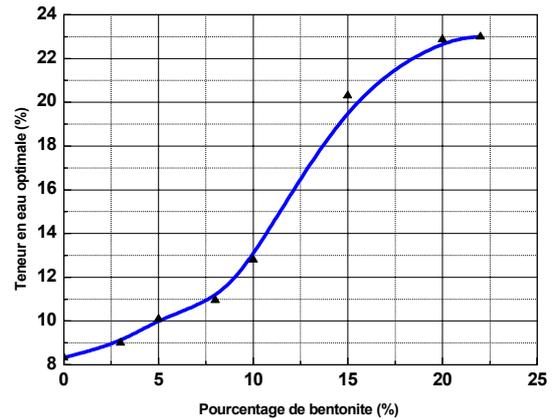


Figure 6 : Variation de la teneur en eau optimale en fonction du pourcentage de bentonite des mélanges sable/bentonite.

3.4 Les résultats des essais de cisaillement

Les courbes enveloppes Mohr-Coulomb obtenues à partir des essais de cisaillement direct sur les mélanges sable/bentonite, préparés à une teneur en eau proche de l'optimum Proctor (w_{opt.} +2 à 6%), sont représentées sur la figure 7 et les valeurs correspondantes des paramètres de cisaillement (cohésion et angle de frottement) sont données sur le tableau 7.

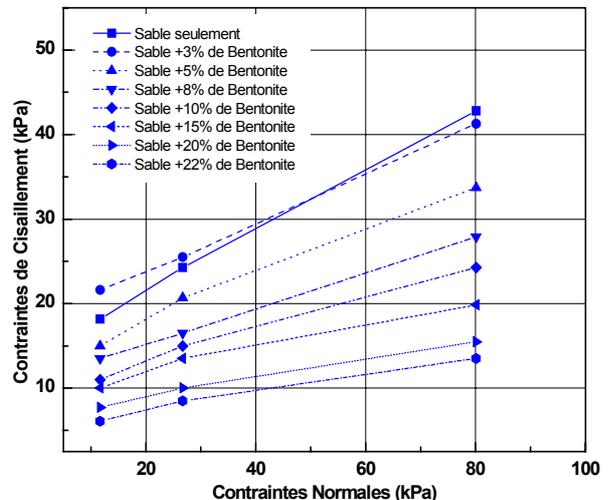


Figure 7 : Les courbes enveloppes Mohr-Coulomb des mélanges sable/bentonite obtenues à partir de l'essai de cisaillement direct.

Ces valeurs ont été obtenues à partir des contraintes normales et de cisaillement suivantes :

$$\sigma_n = \frac{P_v}{A} : \text{contraintes normales en kPa / cm}^2 \quad (1)$$

$$\tau = \frac{P_h}{A} : \text{contraintes de cisaillement en kPa / cm}^2 \quad (2)$$

Avec :

P_v : forces normales en kPa.

P_h : forces de cisaillement en kPa.

Ces contraintes doivent satisfaire à l'équation de Mohr-Coulomb.

$$\tau = c + \sigma_n \tan \varnothing \quad (3)$$

Avec :

c : cohésion en kPa.

\varnothing : angle de frottement interne en degrés.

Tableau 7 : Résultats des essais de cisaillement direct sur les mélanges de sable/bentonite

Teneur en Bentonite %	Angle de Frottement interne \varnothing (Degrés)	Cohésion c (kPa)
0	36	14.5
3	31	17.8
5	30	12.33
8	27	9.11
10	25	6.8
15	22	7.24
20	19	4.55
22	19	3.88

Le résultat des essais de cisaillement direct sur les mélanges de sable/bentonite étudiés montre que l'angle de frottement interne des mélanges est très sensible à la variation de la teneur en bentonite puisqu'il est passé de 36° à 19° pour une variation de la teneur en bentonite de 3 à 22%, respectivement (figure 8). Il faut rappeler que la quantité d'eau de mélange augmente avec le pourcentage de bentonite, ce qui réduit la consistance de l'échantillon de S/B et influe négativement sur sa résistance au cisaillement.

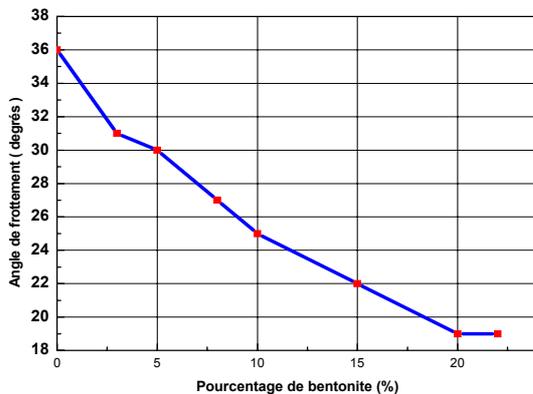


Figure 8 : Variation de l'angle de frottement en fonction du pourcentage de bentonite des mélanges sable/ bentonite

On peut remarquer que la cohésion augmente avec 3% de teneur en bentonite qui dans ce cas contribue à l'augmentation de la cohésion et joue un rôle semblable à celui d'un liant ; elle diminue ensuite pour les raisons invoquées plus haut. En général, les mélanges ont tendance à perdre leur cohésion à cause du gonflement de la bentonite et particulièrement pour les teneurs à partir de 5% (figure 9).

3.5 Les résultats des essais de conductivité hydraulique :

Les résultats des essais de conductivité hydraulique ainsi que ceux du gonflement en fonction de la teneur en bentonite pour les différents mélanges sable/bentonite, sont tabulés ci-dessous (Tableau .8).

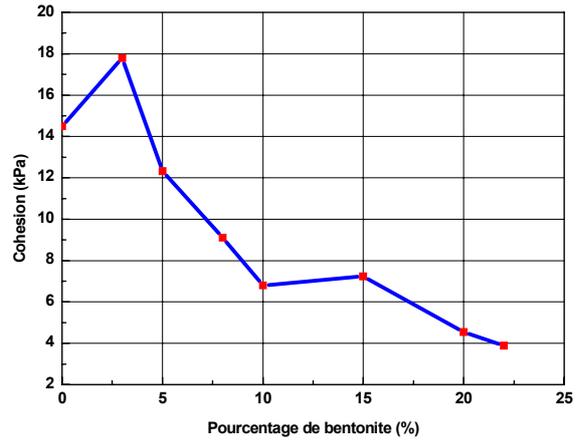


Figure 9 : Variation de la cohésion en fonction du pourcentage de bentonite des mélanges sable/ bentonite.

Les valeurs de la conductivité hydraulique [k], pour un essai au perméamètre à charge variable, sont calculées à partir de la relation suivante (4) :

$$k = 2,3 \frac{a}{A} \frac{1}{T} \log \frac{h_1}{h_2} \quad (4)$$

Avec :

k : la conductivité hydraulique en cm/s .

A : la section droite de l'échantillon S/B en cm².

a : la section droite du tube du perméamètre en cm² .

l : la longueur de l'échantillon de S/B en cm.

T : le temps en secondes.

h₁, h₂ : les niveaux d'eau successifs dans le tube du perméamètre pendant le temps T.

Bentonite %	Conductivité hydraulique k cm/s	Gonflement %
0	1.3 x 10 ⁻⁵	0.45
3	7.03 x 10 ⁻⁶	2.35
5	5.09 x 10 ⁻⁷	7.29
8	8.17 x 10 ⁻⁹	8.12
10	5.75 x 10 ⁻⁹	10.44
15	5.0 x 10 ⁻⁹	16.11
20	1.33 x 10 ⁻⁹	17.05
22	1.09 x 10 ⁻⁹	17.14

Tableau 8 : Résultats des essais de la conductivité hydraulique sur les mélanges sable/bentonite.

Lors des essais il a été noté que pour les teneurs élevées en bentonite, des fluctuations de la hauteur d'eau dans le perméamètre sont apparues avant qu'elle ne se stabilise.

La conductivité hydraulique des mélanges sable/bentonite est très sensible à la teneur de bentonite présente dans le mélange (figure 10). Elle diminue d'une manière remarquable puisqu'elle passe de 10⁻⁵ pour le sable seul à 10⁻⁷ pour une teneur de 5% en bentonite. Les essais ont montré également qu'au-delà d'une teneur de 10%, les améliorations au niveau de la conductivité hydraulique restent très modestes. Pour le sable utilisé dans cette étude, un apport d'environ 10% en bentonite, permettra la réalisation d'une barrière de confinement efficace et qui

satisfait les normes internationales (une conductivité hydraulique $k \leq 10^{-7}$ cm/s).

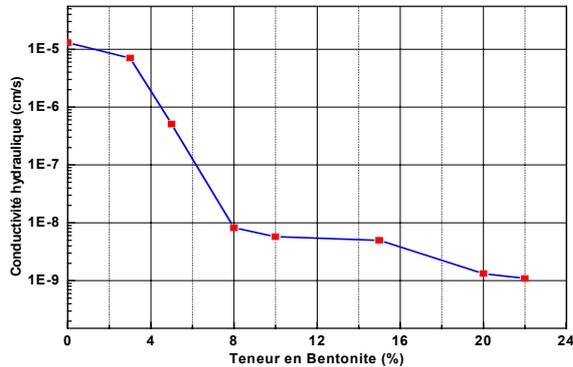


Figure 10 : Conductivité hydraulique des mélanges sable bentonite en fonction de la teneur en Bentonite

La relation entre le gonflement des mélanges et la teneur en bentonite est montrée sur la figure 11. Ce gonflement augmente avec la teneur en bentonite dans les mélanges. Pour une teneur en bentonite de 22 %, le gonflement est pratiquement de 17.5% alors qu'il est de moins de 1% pour le sable seul à cause des impuretés présentes. On remarque également qu'au delà d'une certaine valeur de la teneur de bentonite, autour de 10%, la conductivité hydraulique se stabilise alors que le gonflement continue à augmenter. Il faut noter que la conductivité hydraulique est un paramètre empirique global, coefficient de proportionnalité dans l'équation de Darcy, qui dépend fondamentalement de plusieurs paramètres physiques (viscosité du liquide, rugosité de la matrice solide etc..) alors que le gonflement est un phénomène local dont le temps d'accomplissement est très important relativement à celui de la mesure de la conductivité hydraulique. L'apport d'eau pour le gonflement provient aussi de l'eau 'stagnante' présente autour des particules.

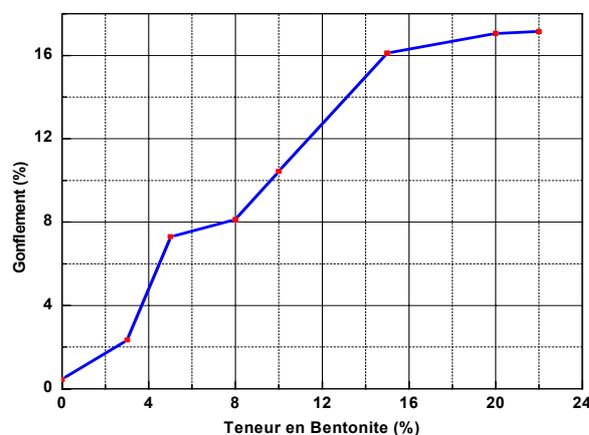


Figure 11 : Gonflement des mélanges sable bentonite en fonction de la teneur en Bentonite

CONCLUSIONS

Ce travail a permis d'étudier expérimentalement la conductivité hydraulique, la résistance au cisaillement et la densité sèche maximale de différents mélanges de sable bentonite (3%,5%,8%,10%,15%,20% et 22%). La bentonite utilisée dans les mélanges vient des bassins volcaniques du Tertiaire de l'Ouest du pays. Les principales observations à retenir de la série d'essais menées sur les différents mélanges sont :

1. Les résultats expérimentaux montrent que les conductivités hydrauliques des mélanges sont situées dans un intervalle de 7.03×10^{-6} à 1.09×10^{-9} cm/s pour une teneur en bentonite variant entre 3 et 22% et sont de 8.17×10^{-9} à 5.75×10^{-9} cm/s pour les teneurs 8 -10 % en bentonite.
2. D'autre part, les résultats des essais de compactage montrent que les densités sèches maximales passent de 18.69 kPa/cm^3 à 14.60 kPa/cm^3 pour une teneur en bentonite qui varie entre 3 et 22% et les teneurs en eau optimale correspondantes augmentent respectivement de 8.33% à 23%.
3. On observe également à partir des résultats de l'essai de cisaillement que en variant la pourcentage de bentonite de 3 à 22 % dans les mélanges sable bentonite, l'angle de frottement interne de ces derniers chute d'une manière drastique de 36° (très dense) à 19° (lâche), avec des valeurs de 27° et 25° pour les teneurs en bentonite de 8 et 10% des mélanges respectives.
4. La conductivité hydraulique des mélanges sable bentonite est liée au gonflement de ces derniers. L'accroissement du gonflement s'accompagne d'une diminution de la conductivité hydraulique. Cependant l'utilisation d'un pourcentage de bentonite supérieur à 10% n'apporte pas une réduction significative de la conductivité hydraulique des mélanges. Par contre l'ajout de plus de 10% de bentonite provoque une diminution de la résistance au cisaillement et un plus grand gonflement des mélanges.

Sur la base des conclusions suggérées par les résultats expérimentaux, cette étude montre qu'un mélange sable bentonite avec une teneur de 10% de bentonite et compacté à environ 2% du coté humide de l'optimum proctor soit une teneur en eau de 15% est qualifié pour servir à la réalisation d'un CET qui répond aux normes concernant la conductivité hydraulique avec en même temps des casiers qui bénéficient d'une bonne stabilité (angle de cisaillement interne du mélange relativement élevé 25°). Il reste cependant à évaluer les performances de ce mélange mis en contact avec un lixiviat issu de déchets solides ménagers afin de connaître les effets de ce dernier sur les paramètres de conductivité hydraulique et de résistance et plus particulièrement sur ses effets dans le long terme sur ces mêmes paramètres. Ce volet de la recherche constitue le complément de cette 1^{ère} partie sur les possibles utilisations de la bentonite sodique de Maghnia dans les applications pour la réalisation de centres d'enfouissements techniques de déchets solides en Algérie.

REFERENCES

- [1]- Tay, Y.Y., Steward D.I., Cousens, T.W., 2001. Shrinkage and desiccation cracking in bentonite –sand landfill liners. *Engineering Geology* 60 (2001) 263-274.
- [2]- Mate. 2006. Programme National de Gestion des Déchets Ménagers (PNGDM). Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement. Alger.
- [3]- Sallfors, G., Connant., L. 1995. Determination of Hydraulic Conductivity of Engineering, Chalmers University of Technology. Compacted Sand-Bentonite Mixture. Internal report. Department of Geotechnical.
- [4]- Steward, D.I., Studds, P.G., and Cousens, T.W., 2003. The factors controlling the engineering properties of bentonite-enhanced sand. *Applied Clay Science* 23(2003) 97-100.
- [5]- Abichou, T., Craig, H., Benson, C.H., and Edil, T.B., 2004. Network model for hydraulic conductivity of sand-bentonite mixtures. *Canadian Geotechnical Journal*. 41: 698-712.
- [6]- Chalermyanont, T., and Arrykul, S. 2004. Compacted sand-bentonite mixtures for hydraulic containment liners. *J. Sci. Technol.*, 27(2): 313-323.
- [7]- Kleppe, J.H., Olson, R.E., 1985. Desiccation cracking of soil barriers. *Hydraulic Barriers in Soil and Rock ASTM STP 874*. Philadelphia pp 263-275.
- [8]- Chapuis, R.P., and all 1990. Sand – Bentonite liners: predicting permeability from laboratory tests. *Canadian Geotechnical Journal*, 27: 47-57.
- [9]- Benson, C.H., 1993 Report of workshop on GCLS .August 1993, US.EPA /600/R693/171. Risk Reduction Eng. Labo, Cincinnati, Ohio, USA.
- [10]- Cowland, J.W., Leung, B.N., . 1990. Bentonite landfill liner. *Waste Management & Research*, 9 277 – 291.
- [11]- Mollins, L, Steward and Cousens, T.W. 2000. Predicting the properties of bentonite- sand mixtures .*Clay Minerals*, 31, 243-252.
- [12]- Komine, H., 2004. Simplified evaluation on hydraulic conductivities of sand-bentonite mixture backfill. *Applied Clay Science* 26 (2004) 13-19.
- [13]- Grim, R., and Guven, N.1978. *Bentonite: Geology, Mineralogy, Properties, and Uses*, Elsevier Science Publishing, New York.
- [14]- Daniel, D.E.1994. State of the art: Laboratory hydraulic conductivity tests for saturated soils, hydraulic conductivity and waste containment transport in soil, *ASTM STP1142*, ASTM, 30-78.
- [15]- Gleason ,M.H., Daniel,D.E., and Eykholt., G.R., 1997. Calcium and Sodium Bentonite for Hydraulic Containment Applications ,*Journal of Geotechnical and Environmental Engineering* , ASCE, 123(5): 438-445.
- [16]- Chapuis, R.P., 2002. Full – scale hydraulic performance of soil-bentonite and compacted clay liners. *Canadian Geotechnical Journal*. 39: 417-439.
- [17]- Mitchell, J.K. 1976 *Fundamentals of soil behaviour* .John Wiley & Sons, New York.
- [18]- Holtz, R.D., and Kovac, W.D. 1981. *An Introduction to Geotechnical Engineering* Prentice Hall, New Jersey.