



ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DES PERFORMANCES HYDRAULIQUES D'UN SOL RECONSTITUÉ À L'ÉTAT COMPACT (SABLE-BENTONITE)

EXPERIMENTAL STUDY OF THE HYDRAULIC PERFORMANCE OF A SOIL RECONSTITUTED IN A COMPACT STATE (SAND-BENTONITE)

Réception : 10/09/2018

Acceptation : 07/11/2018

Publication: 08/01/2019

DEBIECHE Messaouda¹, KAOUA Farid²

¹Laboratoire d'Environnement, Géotechnique et HYDraulique (L.E.G.HYD), Faculté de génie civil, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (USTHB), Algérie, mdebiche2015@gmail.com

²Laboratoire d'Environnement, Géotechnique et HYDraulique (L.E.G.HYD), Faculté de génie civil, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (USTHB), Algérie, fkaoua@yahoo.fr

Résumé - Ce travail rentre dans le cadre de la valorisation des matériaux locaux afin d'une utilisation éventuelle dans le domaine géotechnique et plus précisément dans l'imperméabilisation des ouvrages en génie civil. De ce fait, deux types de bentonite situés à l'ouest de l'Algérie ont été utilisés en mélange avec le sable de Baghliia à l'état compact et cela à différentes concentrations dans le but d'atteindre un dosage optimal assurant une bonne performance hydraulique en terme de conductivité hydraulique et de pérennité.

Cette étude expérimentale a montré finalement qu'un mélange de sol reconstitué à l'état compact avec du sable et 6% de bentonite sodique peut jouer le rôle d'un système d'étanchéité fiable des ouvrages géotechniques (sol d'assise des ouvrages routiers, barrière étanche pour les centres d'enfouissement technique, etc.).

Mots - clés : Imperméabilisation Sol reconstitué Sable/Bentonite compacté, Performance hydraulique, Conductivité hydraulique, Pérennité, Barrières étanches.

Abstract- This work comes within the framework of the valorization of the local materials for a possible use in the geotechnical field and more specifically in the waterproofing of works in civil engineering. As a result, two types of bentonite located in western Algeria were used in combination with Baghliia sand in a compact state and at different concentrations to achieve an optimal dosage ensuring good hydraulic performance. in terms of hydraulic conductivity and durability. This experimental study has finally shown that a mixture of reconstituted soil in a compact state such as sand and 6% sodium bentonite can act as a reliable sealing system for geotechnical structures (soil of road works, watertight barrier for landfill sites, etc.).

Keywords: Waterproofing, Reconstituted Soil, Compacted Sand / Bentonite, Hydraulic Performance, Hydraulic Conductivity, Durability, Watertight Barriers

1-Introduction

L'intérêt primordial pour la protection de l'environnement augmente la demande des systèmes d'étanchéité fiables et de haute qualité dont les principales caractéristiques recherchées sont :

- Une densité sèche maximum des mélanges compactés sable/bentonite ;

- Une faible conductivité hydraulique pour minimiser les fuites en utilisant un faible pourcentage de bentonite ;
- La pérennité du mélange doit être vérifiée vis-à-vis des variations climatiques des propriétés d'hydratation consécutives au cours du temps (cycles humidification-dessiccation) ;

De nos jours, l'utilisation des géosynthétiques bentonitiques dans l'imperméabilisation des sols est la technique la plus utilisée à travers le monde.

Même s'il existe de nombreux travaux de recherche réalisés sur les performances hydrauliques des bentonites à travers le monde, il en existe très peu sur la bentonite algérienne.

En Algérie, les gisements bentonitiques les plus importants se trouvent à l'ouest de l'Algérie, Fig.1. Ils ont été exploités depuis les années 1950, Réf. [1].

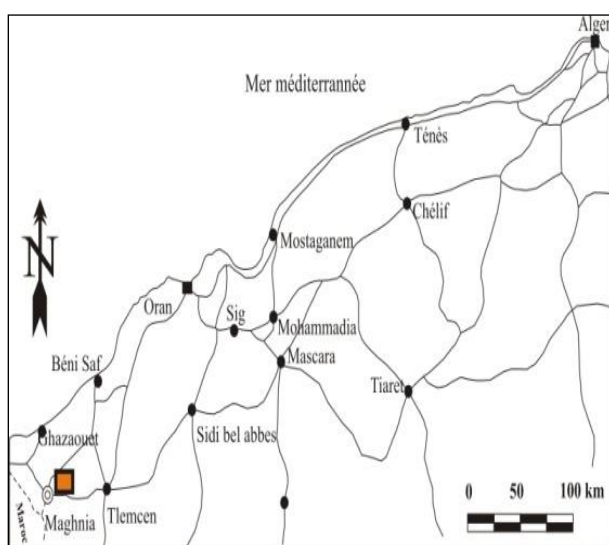


Figure.1 : Carte de situation des gisements de bentonite en Algérie

Figure 1: Location map of the bentonite deposit in Algeria

Dans cette optique, une campagne expérimentale est menée afin de déterminer, en premier lieu, la concentration en bentonite nécessaire pour obtenir une faible perméabilité, des caractéristiques de compactage et une éventuelle variation de K permettant d'étudier la pérennité (durabilité) du mélange.

2-Matériaux utilisés

Deux types de bentonites ont été utilisés dans cette étude. Il s'agit de :

- la bentonite de Mostaganem de couleur grisâtre ;
- la bentonite de Maghnia (Roussel1) de couleur blanchâtre.

Ces deux bentonites sont commercialisées par l'Entreprise Nationale des Produits Miniers Non Ferreux Bental (ENOF) et destinées à la fonderie, l'industrie de la céramique ou le forage pétrolier et hydraulique.

Quant au sable utilisé, il provient du dépôt alluvionnaire de Baghlia au Nord Est de l'Algérie, utilisé souvent dans la confection du béton.

3-Caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques des matériaux

Avant d'entamer l'étude des performances hydrauliques des sols pulvérulents par deux bentonites algériennes, il est indispensable de connaître les caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques des matériaux utilisés.

3.1-Composition chimique des bentonites algériennes étudiées

L'analyse chimique des deux échantillons de bentonite utilisée, préparés sous forme de pastilles, a été effectuée par un spectromètre de fluorescence de rayons X. L'acquisition des spectres et leur traitement mathématique sont réalisés par le logiciel SuperQ.

En vue d'une valorisation des produits locaux dans l'imperméabilisation des sols, les compositions chimiques des bentonites algériennes sont comparées à celles des bentonites commercialisées à travers le monde, Tab.1, Réf. [2].

Le tableau 1 indique que la bentonite de Maghnia possède des caractéristiques similaires aux bentonites du Wyoming et de la Grèce. Toutefois, celle de Mostaganem contient des taux plus faibles en alumine et plus élevés en calcium.

Tableau 1 : compositions chimiques en pourcentage d'oxydes des bentonites commercialisées à travers le monde et celles de l'Algérie.

Table 1: Comparison of chemical compositions of the worldwide and Algerian bentonites

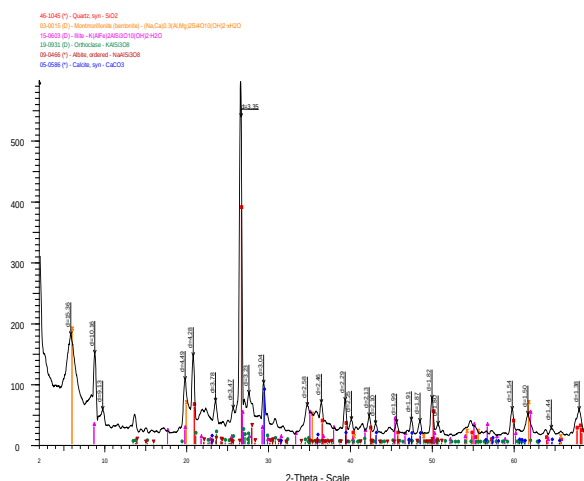
Quelques bentonites à travers le monde						Bentonite Algérie	
*	Kutch Inde %	S&B Grec %	Wyoming Federal %	Wyoming Black hill %	Sud USA %	Mostaganem %	Maghnia %
SiO ₂	45.43	60.83	58.14	66.12	59	60.49	64.98
Al ₂ O ₃	16.4	17.9	21.73	17.01	18.4	12,7	16.08
Fe ₂ O ₃	14.05	4.34	2.46	2.46	5.1	2,70	2.93
CaO	1.18	1.9	0.86	1.37	3.88	3,60	0.61
MgO	2.43	2.83	2.42	1.51	2.86	2,29	3.51
K ₂ O	0.13	1.98	0.52	0.54	0.78	2,28	2.02
Na ₂ O	3.1	2.96	2.08	2.02	0.41	1,55	3.88
TiO ₂	1.86	/	/	/	/	0,30	0.20
Perte au feu	13.28	6.44	5.3	7.3	8.31	13,8	6.07

Les résultats des analyses chimiques montrent que les deux argiles sont composées par un pourcentage plus élevé de SiO₂ que de Al₂O₃, Tab.1. En effet, le rapport de SiO₂/Al₂O₃ est respectivement 4.76 et 4.04 pour les bentonites de Mostaganem et de Maghnia. Cette valeur est l'indice d'une Montmorillonite, Réf.[3]. Au vue de la prépondérance du pourcentage de calcium sur celui de sodium dans la bentonite de Mostaganem indique que cette dernière est de type **calcique** ; par contre la prépondérance de sodium sur le calcium dans le cas de la bentonite de Maghnia indique montre qu'on est en présence d'une montmorillonite **sodique**, Réf.[2].

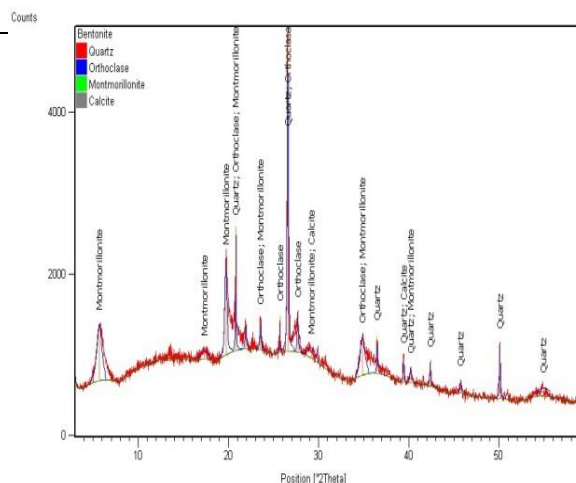
3.2-Analyse minéralogique des matériaux utilisés

- Analyse par diffraction aux rayons X des deux bentonites algériennes

Les méthodes d'investigation et de caractérisation minéralogique des argiles concernent essentiellement la diffraction aux rayons X et les analyses microscopiques (MEB).



2a : bentonite de Mostaganem



2b : bentonite de Maghnia

Figure 2 : Diagramme de diffraction X des deux bentonites sur un diffractomètre

Figure 2: X-ray diffraction patterns of the two bentonites.

Le diffractomètre utilisé est de marque Philips type PW1710, à la tension du générateur 45kV et 35mA. La longueur d'onde (λ) utilisée est fixée à $1.54\text{\AA}$ correspondant au tube à base en cuivre (Cu).

Les diffractogrammes des deux bentonites utilisées, présentés sur les figures 2a et 2b, montrent la présence de montmorillonite (traduite par le pic correspondant à une distance réticulaire de $15.36\text{\AA}$ dans la bentonite de Mostaganem). De plus l'apparition de l'illite, du quartz, de la calcite et des traces de feldspaths (orthoclase et albite) est constatée, Fig.2a. Quant à la bentonite de Maghnia, la montmorillonite est prépondérante comparativement aux impuretés comme le quartz, l'orthoclase et des traces de calcite, Fig.2b.

- Analyse par diffraction au rayon X du sable utilisé

L'analyse par DRX du sable étudié révèle la présence d'atome de Si et O_2 , ce qui correspond à la présence de l'espèce SiO_2 (silice). De plus le pourcentage atomique important de Si indique que SiO_2 est l'élément prépondérant. Les pourcentages atomiques des autres espèces tels que l'espèce ferrique, magnésique et calcique se trouvent sous forme de traces par rapport au SiO_2 Fig.3.

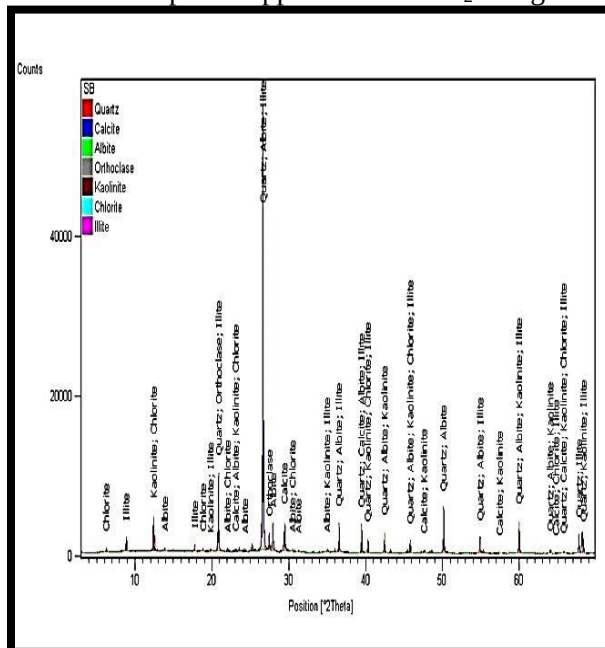


Figure 3 : Diagramme de diffraction X du sable

Figure 3: X-ray diffraction patterns of sand

3.3-Analyse à l'aide du microscope électronique à balayage (MEB) des matériaux utilisés

- Analyse par microscopie électronique à balayage (MEB) des bentonites algériennes

Les résultats de la diffraction aux rayons X sont confirmés par les analyses microscopiques (microscopie polarisante classique, microscopie électronique à transmission, à balayage, etc.).

Le microscope électronique à balayage (MEB) est un appareil d'analyse pouvant fournir rapidement des informations sur la morphologie et la composition chimique d'un objet solide.

Sa grande commodité d'utilisation, sa souplesse pour visualiser des champs d'extension très variables sur des échantillons massifs, l'étendue de sa profondeur de champ font du MEB un outil indispensable dans l'exploration du monde microscopique.

L'analyse par photographies prises au microscope électronique à balayage de type JEOL JSM 6830 au laboratoire des Sciences et Génie des Matériaux de la Faculté de Génie Mécanique et de Génie des Procédés de l'USTHB est illustrée dans la figure 4.

Les images successivement ($\times 600$) pour la bentonite de Mostaganem et ($\times 900$) pour la bentonite de Maghnia, présentées dans la Figure. 4, montrent que les deux bentonites sont constituées d'agrégats argileux, par assemblage des particules de montmorillonite de dimensions variées. Cet assemblage est accompagné par une apparition de microcavités de faibles tailles dans la bentonite de Mostaganem comparativement à celle de Maghnia indiquant la présence d'une certaine porosité.

En agrandissant les images successivement, la microstructure des deux bentonites traitées apparaît logique. Elle est constituée par des agrégats argileux de dimensions variées atteignant 2 microns. Ces agrégats sont disposés d'une manière complètement aléatoire, reliant entre elles des microcavités de diamètre 10 microns et même plus. Ces microcavités représentent des pores inter-agrégats.

Les agrégats argileux sont constitués par l'assemblage de particules de montmorillonite.

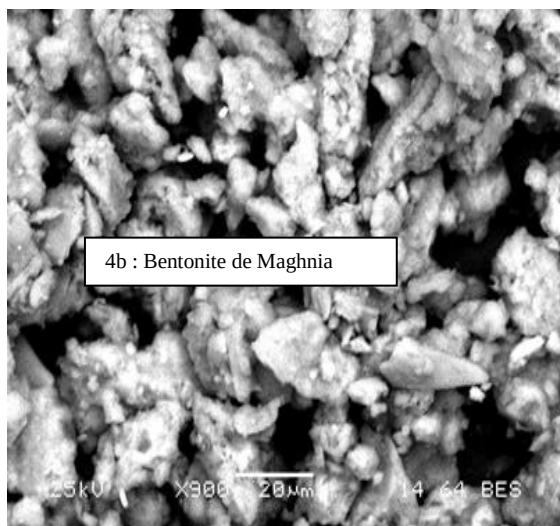
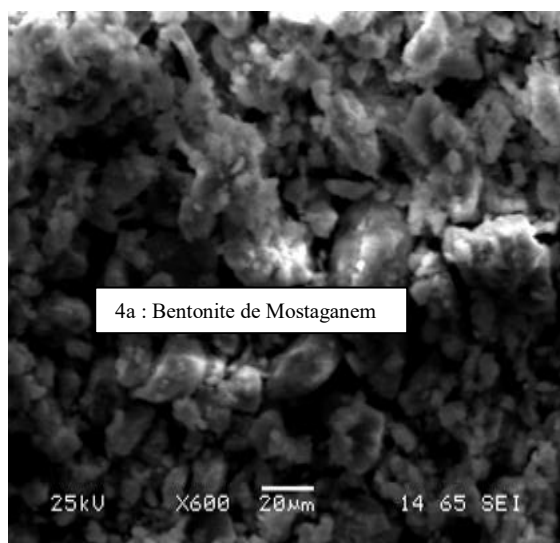


Figure 4 : photographie des microstructures des matériaux utilisés analysés par le MEB

Figure 4: The photographs of the microstructures of the used materials, analyzed by SEM

- Analyse par microscopie électronique à balayage (MEB) du sable utilisé

La photographie prise au microscope électronique à balayage (MEB) de type JEOL JSM 6830 au laboratoire des Sciences et Génie des Matériaux de la Faculté de Génie Mécanique et de Génie des Procédés de l'USTHB est montrée dans la figure 5. Elle révèle, en agrandissant l'image x 500, que le sable de Baghlia présente des grains de formes arrondies avec de faible angularité.

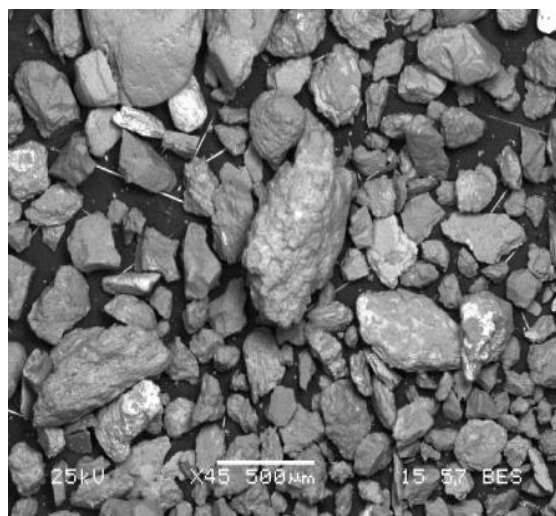


Figure 5 : photographie de la microstructure du sable utilisé par le MEB

Figure 5: The photography of the microstructure of the used sand by SEM

3.4-Caractéristiques physiques

Les caractéristiques physiques ont été déterminées à partir des essais de laboratoires standards, selon les normes en vigueur, comme présenté dans les tableaux 2 et 3.

La distribution granulométrique du sable ainsi que les deux bentonites est représentée dans la figure 6.

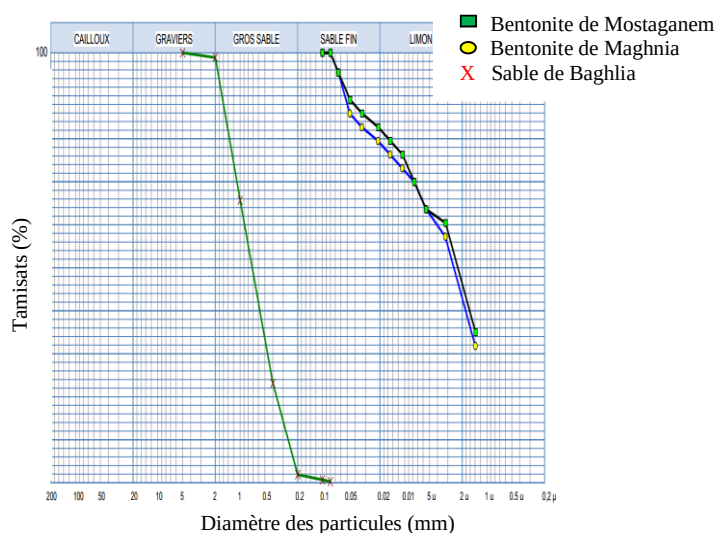


Figure 6 : Courbe granulométrique (par tamisage) des matériaux utilisés

Figure 6: Grain-Size Distribution curves of three materials used in this study

Tableau 2 : Résultats des essais d'identification des deux bentonites étudiées, Réf. [2]**Table 2:** Results of identification tests of the two studied bentonites, Réf. [2]

Identification \ Désignation	Bentonite Mostaganem	Bentonite Maghnia
Teneur en eau naturelle (%) ⁽¹⁾	9	8,5
Densité spécifique des grains solides G _s ⁽²⁾	2.70	2.72
Pourcentage des particules < à 80µm ⁽³⁾	100	100
Pourcentage des particules C2< à 2µm ⁽³⁾	46.5	42.5
Limite de liquidité W _l (%) ⁽⁴⁾	187	240
Limite de plasticité W _p (%) ⁽⁴⁾	45	43
Indice de plasticité I _p (%) ⁽⁴⁾	142	197
Indice de consistance I _c (%) ⁽⁴⁾	1.25	1.18
Limite de retrait L _r (%) ⁽⁵⁾	13	10.24
Indice de retrait I _r (%) ⁽⁵⁾	174	229.76
Activité(%) A _c ⁽⁶⁾	3.89	6.06
Gonflement libre (ml) ⁽⁷⁾	23	35
Valeur au bleu ⁽⁸⁾	8.25	18.75
Surface spécifique (m ² /g) ⁽⁹⁾	168	394
pH ⁽¹⁰⁾	8.6	10.3

Tableau 3 : Résultats des essais d'identification du sable étudié. Réf. [2]**Table 3:** Results of identification tests of the studied sand. Réf. [2]

Identification \ Désignation	Sable de Baghlia
Pourcentage des particules < à 80µm ⁽³⁾	0.25
Densité spécifique des grains solides G _s ⁽²⁾	2.65
Diamètre effectif (mm) D ₁₀ ⁽³⁾	0.26
Coefficient d'uniformité C _u ⁽³⁾	3.46
Coefficient de courbure C _c ⁽³⁾	0.98
Equivalent de sable E _S (%) ⁽¹¹⁾	97
Valeur au bleu ⁽⁸⁾	0.012

1 : Déterminé selon la procédure norme NF P 94-050

2 : Déterminé selon la procédure norme NF P 94-054

3 : Déterminé selon la procédure décrite dans la norme NF P 94-056 et NF P 94-057

www.enstp.edu.dz/revue

Editée sous licence CC BY-NC-ND

<http://creativecommons.fr>

4 : Déterminé selon la procédure norme NF P 94-051

5 : Déterminé selon la procédure norme ASTM D 427-61 et (XP P94-060-1)

6 : Déterminé selon la procédure norme NF P 94-051 Ac=Ip/C2 Skempton et al(1953), Seed and al.1962 Ac=Ip/C2-n où (n=5 si le sol est intact n=10 si le sol est remanié)

7 : Déterminé selon la procédure norme ASTM D 5890 et en projet en France NF P84-703

8 : Mesuré avec l'essai au bleu de méthylène (test à la tache) d'après norme NF P 94-068

9 : Déterminé selon la procédure norme ASTM C 204-89

10 : Déterminé sur une suspension de 20g de bentonite dans 400 ml d'eau distillée

11 : Déterminé selon la procédure norme NF P 18-0598

Les essais de caractérisation des bentonites montrent qu'elles sont des montmorillonites actives présentant, par conséquent, un potentiel d'adsorption d'eau assez important. Ceci leur donne la possibilité d'être utilisées dans la réduction de la perméabilité. La bentonite de Maghnia est sodique (notée **BS**), alors que celle de Mostaganem est calcique.(notée **BC**).

Quant au sable, son identification a révélé qu'il s'agit d'un sable propre mal gradué noté **Sm**, Réf. [2].

4-Etude des performances hydrauliques

Dans cette partie d'étude, nous nous sommes intéressés aux mélanges compactés composés du même sable et des bentonites avec des caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques différentes. Les teneurs en bentonites prises dans cette étude sont : 0%, 2%, 4%, 6% et 8%.

Le sable étudié a été préalablement lavé afin d'éliminer toutes les impuretés, Tab. 3, et séché à l'étuve à 105°C pendant 24 heures, alors que la bentonite a été étuvée à une température de 50°C pendant 48 heures.

Avant d'étudier les performances hydrauliques d'un sol, il est impératif d'évaluer la teneur en eau optimale conférant la densité sèche maximale de chaque mélange par l'essai Proctor normal (NF P 94-093) suivant la granulométrie du mélange et l'ouvrage auquel le mélange est destiné. Cet essai consiste à compacter le mélange, dont le diamètre des particules est inférieur à 5mm, avec une dame de 2.49kg de masse à une hauteur de chute de 30.5cm en trois couches de 40mm d'épaisseur environ, dans un moule normal de 102mm de diamètre et 117mm de hauteur avec une énergie de compactage relativement faible qui correspond à un compactage modéré et qui est

évaluée à 0.59 KJ/dm^2 (à raison de 25 coups par couche). Cette procédure a été répétée pour différents pourcentages en bentonite.

Le mélange est préparé à l'aide d'un malaxeur (de 5 litres composé d'un récipient en acier inoxydable et d'un batteur rotatif en alliage léger tournant à une vitesse de 139 tr/min) dans lequel on introduit le sable sec et la quantité nécessaire de bentonite, puis on rajoute de l'eau. Le mélange est malaxé vigoureusement de manière à obtenir un mélange homogène.

Les mélanges sont conservés dans des sacs hermétiques à température ambiante pendant au moins 24 heures, Réfs. [4 & 5]. Cette étape est nécessaire afin de conserver l'humidité du mélange. De par sa sensibilité à l'eau, la bentonite nécessite un temps plus long d'homogénéisation.

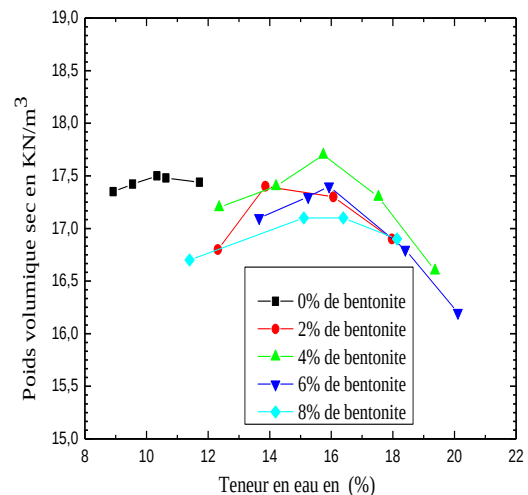


Figure 7b : Poids volumique en fonction de la teneur en eau (Sable+Bentonite de Maghnia)

Figure 7b : Weight volumic dry versus the water content (Sand-Bentonite of Maghnia)

5- Résultats des essais de compactage

Les résultats se présentent sous forme d'une courbe de variation de la densité sèche en fonction de la teneur en eau. L'optimum Proctor est déduit comme présenté sur les figures 7a, 7b.

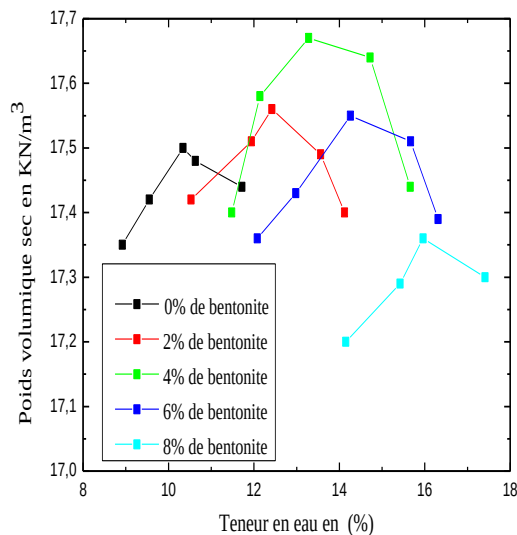


Figure 7a : Poids volumique en fonction de la teneur en eau (Sable+Bentonite de Mostaganem)

Figure 7a : Weight volumic dry versus the water content (Sand+Bentonite of Mostaganem)

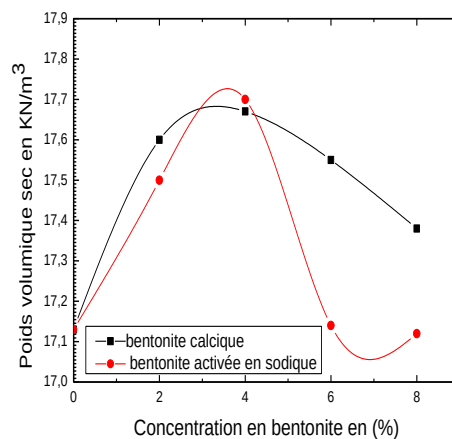


Figure 8 : Evolution de poids volumique optimum en fonction du pourcentage de la bentonite

Figure 8 : Evolution of dry volumic weight versus bentonite concentration

On constate, à partir de la figure 8, qu'à faible concentration en bentonite, les particules de cette dernière sont plutôt chassées entre les grains de sable, créant ainsi des surfaces de contact grain-à-grain de sable. Alors qu'au-delà de 4%, les particules de bentonite enrobent plutôt celles du sable, ce qui traduit la diminution de la densité sèche du mélange, Réfs. [5, 6, 7, 8].

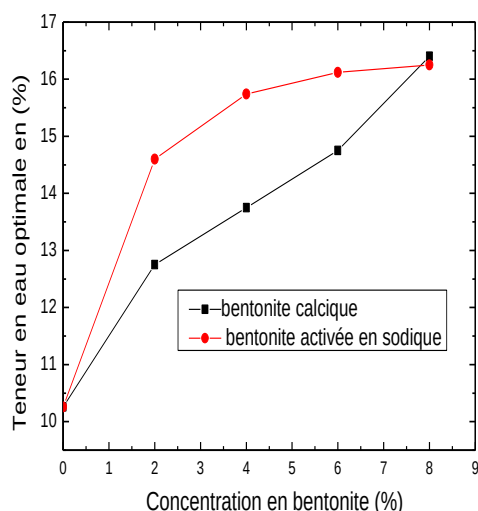


Figure.9 : Teneur en eau optimale en fonction du pourcentage de la bentonite

Figure.9 : Optimal water content versus bentonite concentration

De plus, les teneurs en eau optimales des mélanges à base de bentonite sodique sont plus élevées que celles des mélanges à base de bentonite calcique. Ceci est expliqué par une grande surface spécifique, un indice de plasticité assez élevé et un taux de gonflement important de la bentonite sodique de Maghnia, Tab. 2 et donc une capacité d'adsorption plus importante que celle de la bentonite calcique de Mostaganem, Fig.9, Réf. [9].

6-Essais de perméabilité

La détermination des coefficients de perméabilité à l'eau dans les sols et plus généralement dans les milieux poreux, repose sur la mesure d'un débit percolant à travers la structure poreuse microscopique, sous l'action d'un gradient de charge hydraulique positive ou négative. L'eau libre et l'eau capillaire ont un

transfert gouverné par un mécanisme assez bien reproduit par la loi de Darcy, Réf. [10].

Etant donné que nous nous intéressons à l'imperméabilisation du mélange compacté, tous les échantillons confectionnés pour les essais de perméabilité seront compactés du côté humide et donc les essais de perméabilité ont été réalisés à des teneurs en eau égales à : $\omega = \omega_{opt} + 2\%$, Réf. [11]

La mesure directe de la perméabilité des sols (NF P 94-512-11) s'effectue selon deux procédures dites « à charge constante » pour les sols de forte perméabilité ou « à charge variable » pour les sols à faible perméabilité.

Une fois l'optimum obtenu à partir de la courbe Proctor, on déduit la masse sèche et la teneur en eau à ajouter. Un autre essai de compactage est réalisé, cette fois-ci, dans le moule Proctor du perméamètre à l'optimum +2%.

Les essais ont été réalisés sous les conditions suivantes :

- maintient d'un gradient hydraulique (noté i) faible pendant la phase de saturation ($i=1$);
- validité de la loi de Darcy;
- mesure de la perméabilité après saturation et surtout après avoir permis à la bentonite de gonfler totalement;
- température ambiante réglée à 20°C, sinon des corrections doivent être apportées, Réf. [12].

Le dispositif est constitué d'un perméamètre permettant la réalisation d'essais à charge constante et à charge variable.

Il comprend, Fig. 10.

- Quatre cellules de perméabilité de 102 mm de diamètre et une hauteur de 117 mm ;
- Un panneau de quatre tuyaux en verre de 17 mm de diamètre reliés à quatre cellules pour l'essai de perméabilité à charge variable ;
- Un réservoir d'eau sert à maintenir le spécimen dans la cellule libre d'air ;
- Un réservoir sert à remplir les quatre tubes pour un niveau précis (h_1);
- Quatre règles métalliques graduées collées au panneau au voisinage des tubes pour noter les différents niveaux de l'eau (h_2).

• Essai à charge variable

Pour l'essai à charge variable, la perméabilité est donnée par:

$$K(m/s) = 2,3 \frac{a.L}{A.T} \cdot \text{Log} \frac{h_1}{h_2} \quad (2)$$

Avec :

K : La perméabilité (cm/s)

a : section du tube piézométrique (cm²)

A : section de l'échantillon en (cm²)

L : longueur du moule (cm)

T : temps pour passer de h₁ à h₂ (s)

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



Figure10 : Photographie du dispositif de l'essai de perméabilité avec un perméamètre de compactage

Figure 10 : Photography of the device of the permeability test with a permeameter of compaction.

• Essai à charge constante :

Pour un essai à charge constante, la perméabilité est donnée par:

$$K = \left(\frac{Q}{Ai} \right) \quad (1)$$

Avec :

- K : La perméabilité (cm/s)
- Q : Volume d'eau ayant traversé l'échantillon pendant le temps t
- A : section de l'échantillon (cm²)
- i : gradient hydraulique ($\Delta H/L$) avec ΔH maintenue constante et L hauteur du moule

7-Influence de la concentration en bentonite sur la perméabilité

Des essais de perméabilité à l'eau ont été réalisés sur des mélanges compactés de sable+bentonite, pour les pourcentages en bentonite suivants : 0%, 2%, 4%, 6%, et 8%. Pour chaque pourcentage, deux essais ont été réalisés en notant la date, l'heure, la température et le pH. La durée moyenne d'un essai est évaluée à une vingtaine de jours.

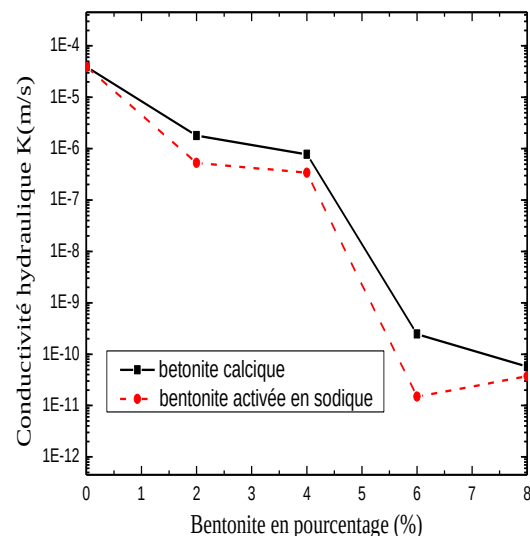


Figure 11 : Conductivité hydraulique en fonction du pourcentage de la bentonite

Figure 11 : Hydraulic conductivity versus the bentonite content

La figure 11 donne l'évolution du coefficient de perméabilité en fonction des concentrations de bentonite. En effet, l'ajout de la bentonite au mélange diminue la perméabilité. Arrivé à un certain pourcentage de bentonite, le coefficient de perméabilité varie peu. Les résultats trouvés à partir d'une série d'essais révèlent que pour un même sable, la perméabilité est plutôt influencée par le pourcentage de bentonite, autrement dit, la perméabilité est inversement proportionnelle à la concentration en bentonite. Cette figure illustre l'aptitude de la bentonite à la réduction de la perméabilité. Par ailleurs, pour les mélanges étudiés, la plus faible perméabilité est obtenue pour une concentration de 8% de la bentonite de Mostaganem et 6% de celle de Maghnia. Cette figure montre que pour une perméabilité de départ de $3.93 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ du sable compacté à l'optimum +2%, l'ajout de 8% de bentonite calcique ramène la perméabilité du mélange à $5.69 \cdot 10^{-11} \text{ m/s}$, alors qu'une perméabilité de $1.21 \cdot 10^{-11} \text{ m/s}$ est atteinte avec 6% seulement de bentonite sodique. Ce résultat est en accord avec la littérature, Réfs. [13 & 14].

8-Essais cycliques humidification-dessiccation

Afin de vérifier la pérennité du mélange vis-à-vis des variations climatiques, les deux variantes de sols ayant donné la plus faible perméabilité à savoir 6% de bentonite sodique et 8% de bentonite calcique, ont été soumis à quatre cycles d'humidification-dessiccation et ce, en mesurant la perméabilité avant et après chaque étuvage selon la méthode décrite précédemment. Le séchage est établi par passage à l'étuve à 50°C (température choisie arbitrairement en l'absence de norme et en se basant sur les variations saisonnières de notre pays) jusqu'à masse constante.

La figure 12 montre que la bentonite de Mostaganem perd sa capacité d'adsorption et, par conséquent, sa perméabilité augmente durant les cycles humidification-dessiccation. Ceci est expliqué par la nature calcique de celle-ci, Réf. [15]. Entre autre, l'échange partiel des ions de sodium par des ions de calcium, présents en solution dans le liquide d'hydratation, conduit à une dégradation des propriétés de gonflement et d'imperméabilisation, Réf. [16]. En effet, le séchage de la bentonite calcique conduit à une agrégation quasi-irréversible face à face des

particules. La bentonite de Maghnia, à caractère sodique, ne perd pas sa capacité d'adsorption sous l'effet cyclique. En effet, les échantillons dont le mélange est formé par la bentonite sodique et soumis à des cycles répétés d'humidification-dessiccation montrent une augmentation du coefficient de perméabilité au bout du premier cycle mais au-delà, la perméabilité commence à diminuer.

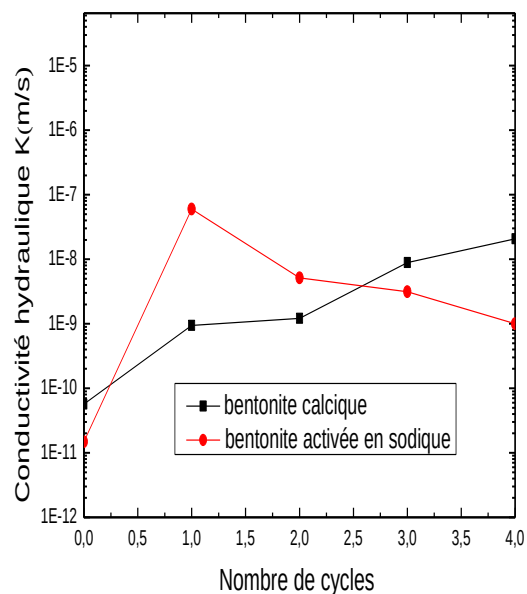


Figure 12 : Effet cyclique du mélange sable-bentonite

Figure 12 : The effect of cycles of climatic variation on sand-bentonite mixtures.

Ceci est dû à plusieurs raisons parmi lesquelles, on peut citer la suivante : si le mélange est hydraté puis séché, des fissures de retrait peuvent apparaître, ce qui affecte la perméabilité (1^{er} cycle). Ces fissures apparaissent lors de la dessiccation et disparaissent pendant la phase de ré-hydratation. Le mélange en bentonite sodique ne perd pas totalement sa capacité de gonflement. Ceci a été confirmé à partir du deuxième cycle. Par conséquent, elle a le pouvoir d'auto-cicatrisation, Réf. [17].

Etant donné que la bentonite utilisée est sodique, durant le cycle humidification-dessiccation, celle-ci ne perd pas sa capacité d'adsorption dans le temps et par conséquent sa perméabilité est vérifiée selon la réglementation algérienne des différentes classes de décharge.



8-Conclusion

Ce travail a permis d'étudier expérimentalement la densité sèche maximale, la conductivité hydraulique et la pérennité de différents mélanges de sable+bentonite.

Les essais que nous avons effectués sur les mélanges sable+bentonite nous ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- La teneur en eau optimale des mélanges dépend de l'augmentation de la concentration en bentonite ;
- Une très faible valeur de perméabilité (de l'ordre de 10^{-11} m/s) est atteinte en introduisant 8% d'une bentonite calcique contre 6% seulement de bentonite sodique. Ceci est expliqué par une grande surface spécifique, un indice de plasticité assez élevé et un taux de gonflement important de la bentonite sodique de Maghnia et donc une capacité d'adsorption plus importante que celle de la bentonite calcique de Mostaganem ;
- Pendant les cycles « humidification-dessiccation », une augmentation de la perméabilité du mélange à base de bentonite calcique est constatée suite à la perte de la capacité de gonflement ainsi que la diminution du pouvoir de cicatrisation des bentonites calciques. Les mélanges à base de bentonite sodique présentent une bonne durabilité vis-à-vis des variations climatiques suite au pouvoir d'auto-cicatrisation de la bentonite sodique.

Références bibliographiques

- [1] BENTAL-ENOF : Etude technique et économique des gisements de M'Zila (Mostaganem) et Hammam Boughrara (Maghnia), Vol I Rapport Final, BUMIGENE INC., Montréal (Québec), Canada H3B 1P5, Mars 2010.
- [2] Debieche, M., "Imperméabilisation d'un matériau pulvérulent par ajout de bentonite à l'état compact en utilisant les métaux lourds". Thèse de Doctorat en Génie Civil, Département Géotechnique de la Faculté de Génie Civil. Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Alger, Algérie, 2015.
- [3] Grim R., and Guven, N., "Bentonite : Geology, Clay Mineralogy Properties and Users", Elsevier Science Publishing, New York, 1978.
- [4] Daniel, D. E., State of the art, Laboratory hydraulic conductivity tests for saturated soils, hydraulic conductivity and waste containment transport in soil, ASTM STP1142, ASTM, 30-78, 1994
- [5] Gleason, M.H., Daniel, D.E., Eykholt, G.R., "calcium and sodium bentonite of hydraulic containment application". In : journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering, vol. 123 N°5, pp 438-445, May, 1997.
- [6] Holtz, R.D., and Kovac, An introduction to Geotechnical Engineering Prentice Hall, New Jersey, 1981.
- [7] Ait Saadi Lotfi., Méthodologie de contrôle de l'homogénéité et de la perméabilité des barrières argileuses. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2003.
- [8] Moussai, B., Etude en laboratoire du compactage statique et de la perméabilité des sols fins argileux. Thèse de doctorat de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1993.
- [9]. Debieche, M. et Kaoua, F., Hydro-mechanical behavior of a compacted mixture (sand/bentonite) used in landfill sites, 4th International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Near East University, Nicosia, North Cyprus, 2-4 June 2016.
- [10] Robinet, J.C. and Rhattas, M., Détermination de la perméabilité non saturée des matériaux argileux à faible porosité, Can. Geotech. J., vol.32, pp. 1035-1043, 1995.
- [11] SETRA/LCPC., Réalisation des remblais et des couches de forme – Fascicule I : Principes généraux. Guide technique du Ministère de l'Équipement, du Logement et des Transports, 1992.
- [12] Jaynes, D.B., Temperature Variations Effect on Field-Measured Infiltration, Soil Sci. Soc. Am. J., vol. 54, N° 2, pp. 305-312, 1990.



[13] Didier, G. et Cavalcante Rocha, J., Définition des conditions optimales de traitement en place d'un sol perméable en vue de son imperméabilisation, Rap. Subvention N° 90012, Min. de l'Environnement, Direction Générale de l'Administration et du Développement, Service de la Recherche et des Affaires Economiques, 215 p, 1998.

[14] Komine, H., 28 February : Simplified evaluation on hydraulic conductivities of sand-bentonite mixture backfill., Department of Urban and Civil Engineering, Ibaraki University, 4-12-1 Nakanarusawa-cho, Hitachi, Ibaraki, 316-8511, Japan, Available online, 2004.

[15] Boardman, B.T., and Daniel, D.E., "Hydraulic conductivity of desiccated geosynthetic clay Liners." Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 122, N°3 pp.204-209, 1996.

[16] Lin, L.C., Benson, C.H. : Effect of Wet-Dry Cycling on Swelling and Hydraulic Conductivity of GCLs. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, vol. 123, N°. 5, pp. 402-410, 2000.

[17] Tessier, D., Etude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux. Hydratation, gonflement et structuration au cours de la dessiccation et de la ré-humectation. Thèse de doctorat, Université Paris VII, 361 p., INRA Versailles Ed , 1984.