

CARACTÉRISATION ET COMPORTEMENT MÉCANIQUE D'UN SÉDIMENT DE DRAGAGE D'UN BARRAGE EN VUE D'UNE RÉUTILISATION

CHARACTERIZATION AND MECHANICAL BEHAVIOR OF SEDIMENT DREDGING OF A DAM SEEN REUSE

O. SEKLAOUI-OUKID¹, A. BOUHERAOUA¹, D. RANGEARD², R. JAUBERTHIE²

¹ Laboratoire LaMoMS de génie civil, Université de Tizi-Ouzou, Algérie

² Laboratoire GCGM: matériaux EA 3913, INSA de Rennes, France
oseklaoui@yahoo.fr ; abouheraoua@yahoo.fr ; Damien.Rangeard@insa-rennes.fr ;
Raoul.jaubertie@insa-rennes.fr

1. INTRODUCTION

L'envasement des retenues de barrages en Algérie a pris une ampleur importante, limitant ainsi leur capacité (diminution importante du volume d'eau stockée). Le désenvasement est un moyen de lutte contre l'envasement néanmoins les conséquences engendrées sont le devenir du dépôt sédimentaire et les problèmes liés à son stockage.

L'objectif de ce travail est de proposer une solution au dépôt sédimentaire issu du dragage du barrage de Merdja

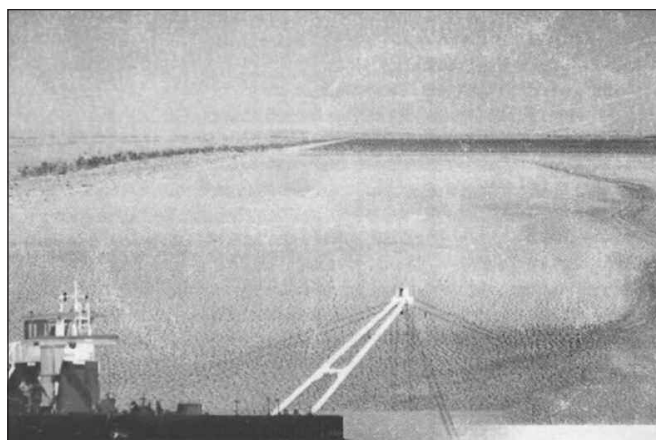
Sidi Abed et de tester la possibilité de réutiliser les sédiments dans le domaine des travaux publics, notamment en utilisant ces matériaux comme une solution de remplacement aux matériaux de base.

Les projets d'infrastructures dans le domaine des travaux publics nécessitent d'importantes quantités de matériaux. En Algérie, les matériaux naturels se font rares et coûteux, en effet, dans le but de protéger les nappes phréatiques, le gouvernement a pris des mesures très strictes pour l'extraction de sable de rivières. Afin de répondre aux demandes importantes de matériaux pour la mise en place des nou-

a) Carte de localisation du barrage



b) Etat d'envasement de la retenue

**Figure 1 : Présentation du barrage de Merdja Sidi Abed.**

velles infrastructures routières (notamment l'autoroute Est-Ouest), il devient nécessaire de trouver des sources de matériaux de remplacement (des matériaux traités sont introduits sur des tronçons de l'autoroute Est-Ouest).

Le barrage de Merdja Sidi Abed à l'origine était un lac alimenté à partir d'une rivière par une station de pompage. Les sédiments dragués sont constitués d'un dépôt de particules fines [1].

Les caractéristiques géotechniques de ce matériau sont trop faibles pour envisager leur utilisation directe. Un traitement est nécessaire afin d'obtenir des caractéristiques mécaniques minimales permettant leur utilisation, par exemple en couche de forme dans le domaine routier. L'efficacité d'un traitement est fonction de nombreux paramètres : le temps après la mise en place [2], la température qui modifie la cinétique, [3] ou bien certains ajouts [4] ou minéraux contenus dans le sol [5].

Dans un premier temps, une caractérisation géotechnique et minéralogique du matériau est réalisée. L'analyse minéralogique (diffraction X, MEB) permet de définir le type d'éléments présents dans le matériau. On met notamment en évidence la présence d'argile gonflante. Les essais géotechniques classiques (analyse granulométrique au laser, limites d'Atterberg, valeur au bleu et teneur en matières organiques) permettent de classer le matériau dans son état naturel. L'influence du type d'argile est particulièrement mise en évidence sur le comportement au retrait du matériau. Ensuite, on étudie la possibilité d'un traitement au ciment afin d'améliorer les caractéristiques mécaniques du matériau. Des éprouvettes sont confectionnées pour un dosage en ciment (CPJ 42,5) d'abord avec une teneur en eau correspondant à l'optimum Proctor, ensuite, en fait varier la teneur en eau. L'amélioration apportée est évaluée à partir des résultats d'essais de compression et de fendage réalisés après différentes durées de maturation.

2. PRÉSENTATION DU BARRAGE

Le barrage de Merdja Sidi Abed est situé dans la plaine de l'oued Chéliff dans la wilaya de Relizane région du Nord-Ouest de l'Algérie (figure 1 a) en bordure de la route nationale N° 04. C'est un réservoir alimenté depuis l'Oued

Chélif, d'une part par un canal gravitaire et d'autre part par une station de pompage.

Le barrage, mis en service en 1984 d'une capacité initiale de 54,9 Hm³, est parmi les ouvrages programmés dans le cadre du désenvasement dont le volume de sédiment à draguer est de 5 millions de m³, les opérations de dragage ont été lancées en 2004. La figure 1b montre l'état d'envasement de la retenue.

3. CARACTÉRISATION PHYSIQUE ET CHIMIQUE DES SÉDIMENTS

3.1. Analyse granulométrique

Compte tenu de la nature fine des sédiments, la courbe granulométrique est obtenue à partir d'un granulomètre laser. Le matériel utilisé est un granulomètre Cilas 1180 par diffraction laser intégrant l'approximation de Fraunhofer et la théorie de Mie.

Les résultats, en termes de courbe granulométrique, sont présentés sur la figure 2. Ils mettent en évidence, une granulométrie fine, avec un diamètre maximal de 20 μm et un diamètre moyen D50 de 3 μm . Le sédiment est composé essentiellement d'argile (39,1 %) et de limons (59 %).

3.2. Analyse par diffraction X

Les diagrammes de diffraction X sont réalisés sur un diffractomètre Philips XPERT en géométrie Bragg-Brentano avec une anode Cu. L'analyse par diffraction X montre que le matériau contient du quartz, de la calcite et différents types d'argiles (figure 3). Pour déterminer les minéraux argileux, des analyses par diffraction X sont réalisés après traitement à 550 °C pendant 1h et par glycérolage. En effet les raies caractéristiques du kaolin disparaissent par chauffage, alors que l'illite reste stable en température et par traitement au glycérol. Les résultats montrent ainsi que les éléments argileux présents sont de l'illite (en petite quantité), de la chlorite et de la smectite (gonflante au glycérol dont la distance inter foliaire diminue par chauffage).

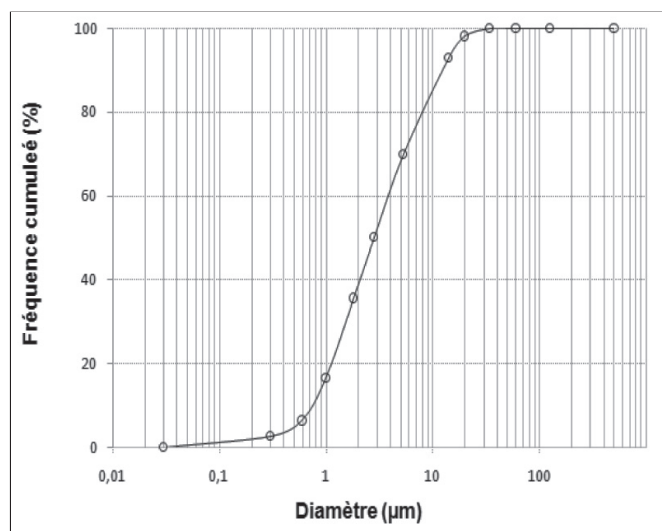


Figure 2 : Courbe granulométrique du sédiment.

3.3. Observation au microscope électronique

Des observations au microscope électronique à balayage ont été réalisées sur le sédiment de Merdja (figure 4). Elles ont été obtenues sur un appareil JEOL 6400 et, pour les observations à fort grossissement, avec un microscope électronique à effet de champ JEOL JSM 6301 FEG. Un dosage global par rapport aux argiles a mis en évidence la présence de silicium et d'aluminium, mais aussi de magné-

sium et de fer. Ces compositions minéralogiques confirment l'analyse X et notamment la présence de smectite et/ou de chlorites (Mg et Fe).

4. CARACTÉRISATION GÉOTECHNIQUE

Dans un premier temps, la teneur en matières organiques a été déterminée par calcimétrie, la valeur obtenue est de l'ordre de 3%, correspondant à une quantité de matière organique contenue dans le sol relativement faible.

Afin de vérifier l'influence de la présence d'argile gonflante au sein du matériau, des essais de mesures de la quantité et de l'activité de la fraction argileuse par l'essai à la tache ont été réalisés selon NF P94-068 [6]. Le résultat de l'essai au bleu (VBS) est directement lié à la surface spécifique des particules du sol. Les résultats obtenus sont synthétisés dans le tableau 1. On note une valeur importante (7,5g/100g de sol), confirmant ainsi la présence d'argile gonflante qui a toujours une surface spécifique très nettement supérieure à celle des autres types d'argile.

4.1. Limite d'Atterberg

Les limites de liquidité et de plasticité du sédiment ont été déterminées respectivement à la coupelle de Casagrande et au cône tombant [7]. Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau 1. L'indice de plasticité est de 39%, valeur traduisant une plage étendue de sensibilité à l'eau.

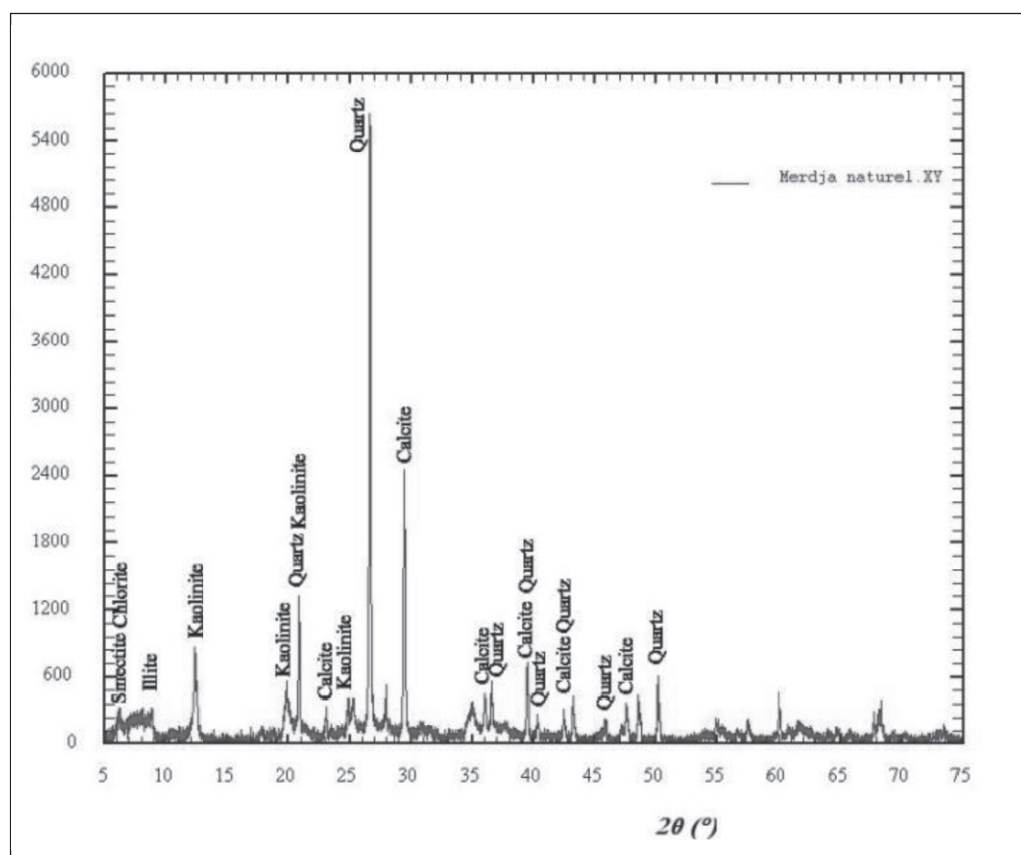


Figure 3 : Diagramme de diffraction X du sédiment de Merdja ($K\alpha$ Cu filtré).

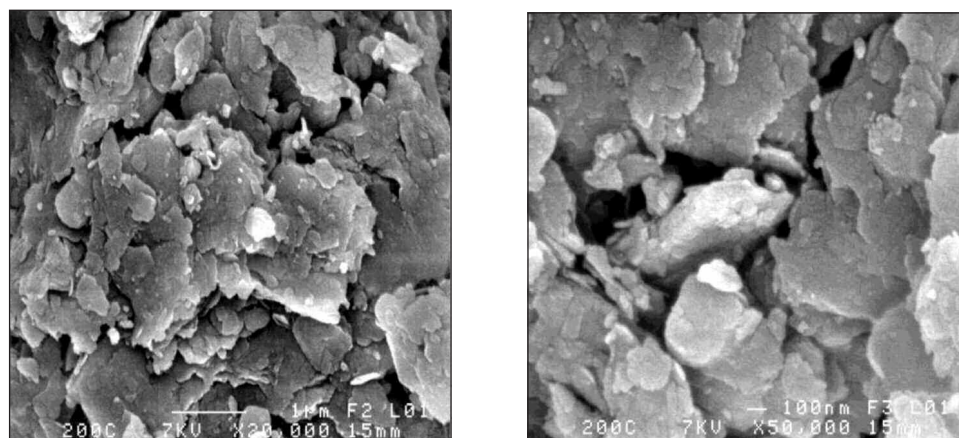


Figure 4 : Observations MEB (à gauche x20000 ; à droite x50000).

VBS	WL (%)	WP (%)	IP(%)
7,5	65	26	39

Tableau 1 : Valeur au bleu (VBS) et Limites d'Atterberg.

4.2. Limite de retrait

De manière à mettre en évidence le rôle des argiles gonflantes, des essais de mesure du retrait ont été effectués [8], [9]. La limite de retrait W_R d'un matériau est définie comme la teneur en eau pondérale en dessous de laquelle le volume de l'échantillon reste constant et pour laquelle le matériau reste quasi saturé. La limite de retrait d'un sol est classiquement déterminée sur le passant à $400\mu\text{m}$ du matériau suivant la norme française [10]. La limite de retrait conventionnelle W_R est déterminée à partir de l'expression (1). Cette limite de retrait correspond à une limite de retrait volumique.

$$W_R = \frac{m_h - \rho_w(V_0 - V_d)}{m_d} - 1 \quad [1]$$

Avec :

M_h : la masse humide initiale de la prise d'essai,

m_d : la masse sèche de la prise d'essai,

V_0 : le volume initial de la prise d'essai,

V_d : le volume de la prise d'essai après dessiccation complète.

Dans cette étude, on détermine également une limite de retrait à partir d'essais de retrait linéique horizontal décrits dans les normes anglo-saxonnes [11], [12]. L'essai consiste à mesurer, après dessiccation complète, la longueur d'une éprouvette de matériau mise en place dans un moule formé d'un demi-cylindre. Le moule utilisé dans cette étude a un diamètre de 50 mm et une longueur l_0 de 250 mm. L'exploitation de l'essai consiste à mesurer, après dessiccation complète, la longueur l_d de l'échantillon. Le retrait linéaire LS est alors défini conventionnellement par :

$$LS = \left(1 - \frac{l_d}{l_0}\right) \cdot 100 \quad [2]$$

avec : l_0 la longueur initiale de l'éprouvette

l_d la longueur de l'éprouvette après dessiccation complète

Cette valeur correspond à la déformation longitudinale de l'éprouvette après dessiccation. La méthodologie décrite dans [13] permet également, à partir de cet essai, d'obtenir une courbe de dessiccation complète et de déterminer une limite de retrait, cette dernière est obtenue par l'intersection des deux segments de la courbe de dessiccation.

La courbe de dessiccation obtenue pour la limite de retrait horizontal est présentée en figure 5. Les valeurs des limites de retrait identifiées à partir des deux méthodes expérimentales et le retrait linéaire total sont synthétisés dans le tableau 2. On note une bonne concordance entre les résultats obtenus par chacune des deux méthodes d'essais.

On remarque également l'influence marquée de la nature des argiles sur le retrait. La présence d'argile gonflante est la cause de l'étendue de la plage de sensibilité à l'eau.

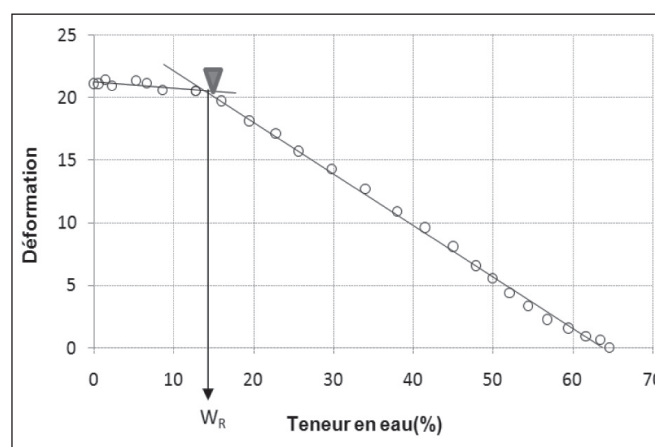


Figure 5 : Courbe de dessiccation (retrait linéique horizontal, Le triangle sur la courbe représente la valeur du retrait volumique).

Limite de retrait W_R (%)	Volumique	Horizontal	LS (%)
Sédiment de Merdja	14,8	14	20,5

Tableau 2 : Limites de retrait.

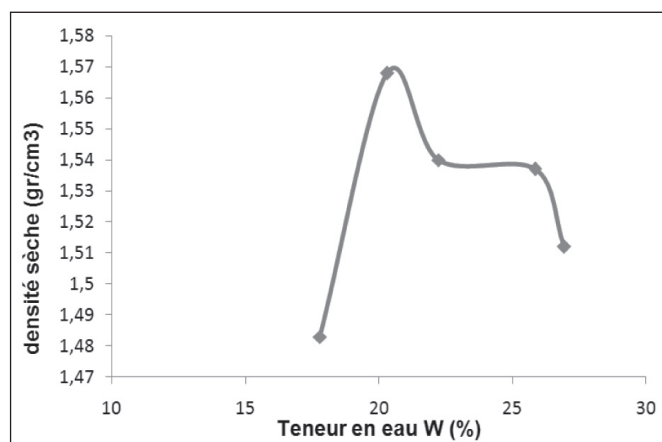


Figure 6 : Courbe Proctor Normal du sédiment de Merdja.

4.3. Caractéristiques de compactage

Le compactage sert à densifier un sol, et ainsi à améliorer le comportement mécanique du matériau et ses propriétés hydrauliques. La teneur en eau optimale et la densité sèche maximale correspondante sont déterminées au laboratoire par l'essai Proctor (NF P 94-093).

La courbe Proctor Normal obtenue pour le sédiment de Merdja est présentée sur la figure 6.

La teneur en eau optimale est de 21%, la valeur du poids volumique sec associée est de 15,7 kN.m⁻³.

Un autre paramètre de compactage qui a son importance dans la caractérisation des matériaux de couche de forme est l'indice portant immédiat IPI. La mesure de l'IPI permet d'évaluer l'aptitude d'un sol à supporter la circulation des engins de chantier.

En traçant la courbe IPI en fonction de la teneur en eau sur le même graphe que la courbe Proctor [14] (Figure 7), nous déduisons l'indice portant IPI correspondant à l'optimum Proctor. Celui-ci est de l'ordre de 13 % ce qui nous permet de classer le sédiment selon sa portance (classification des sols fins GTR) [15] dans la sous classe A3m correspondant à l'état hydrique moyen.

Des mesures de gonflement vertical G sont réalisées sur le sédiment. Il est déterminé par les essais d'immersion dans l'eau pendant 4 jours.

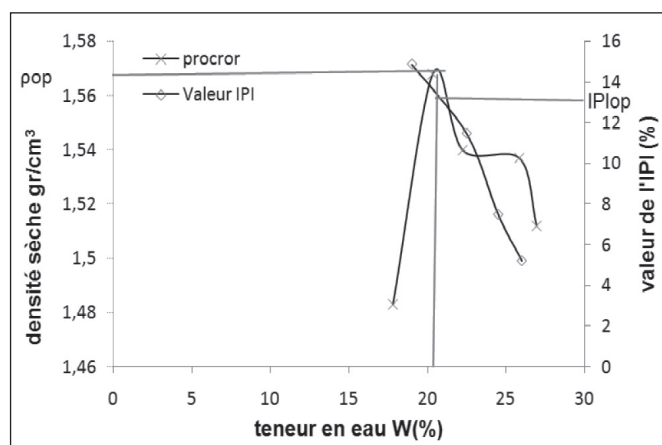


Figure 7 : Variation de la masse volumique sèche et IPI en fonction de la teneur en eau.

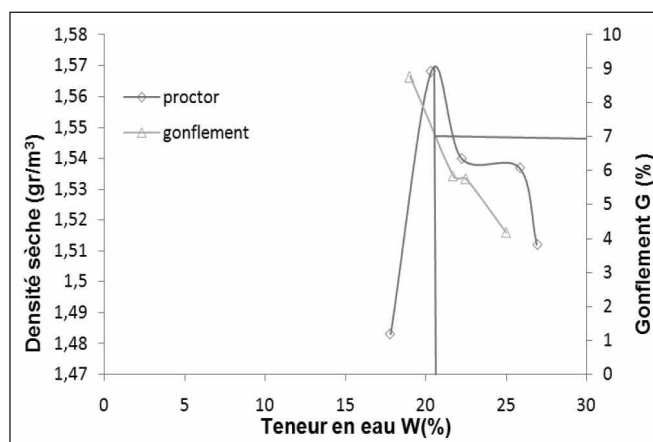


Figure 8 : Courbe gonflement - teneur en eau associée à la courbe Proctor.

Sachant que le sédiment de Merdja est un sol fin, plastique et sensible à l'eau (classe A3), le gonflement attendu sera important, ainsi nous avons procédé avec précaution pour avoir des résultats fiables.

De même que pour l'IPI, une courbe du gonflement linéaire en fonction des teneurs en eau est tracée (figure 8). Le gonflement G à l'optimum Proctor est déduit de la courbe, il est de l'ordre de 7%. C'est une valeur importante, et qui ne permet pas d'envisager une utilisation directe de ce matériau en couche de forme.

Les caractéristiques géotechniques du sédiment étudié ne satisfont pas les conditions d'utilisation des matériaux en couche de forme telles que indiquées dans les GTS [16] sans traitements.

5. TRAITEMENT AU CIMENT

5.1. Méthode expérimentale

Dans la suite de cette étude, l'influence d'un traitement au ciment (CEM II 42,5) est testée. Le dosage en ciment proposé est de 5% (par rapport à la masse sèche de sol). Cette quantité est choisie de telle sorte à avoir un rapport coût/bénéfice optimal pour une réutilisation en couche de forme qui ne nécessite pas une importante résistance en compression. Dans un premier temps, des éprouvettes sont confectionnées à une teneur en eau correspondant à l'optimum Proctor du matériau naturel. Cette démarche (compactage à teneur en eau optimale et à énergie Proctor) constitue une démarche conservatrice. En effet, l'ajout d'un liant hydraulique (chaux, ciment) modifie les caractéristiques de compactage du matériau : la teneur en eau optimale du matériau traité est supérieure à celle du matériau non traité et la densité sèche à l'optimum Proctor est systématiquement inférieure à celle du matériau non traité. Dans ces conditions, un compactage à la teneur en eau optimale du matériau non traité (donc inférieure à la teneur en eau du matériau traité) conduit à une densité sèche inférieure à la densité optimale que l'on peut attendre pour le matériau traité [17], [18]. La figure 9 montre un exemple de courbe Proctor pour un sol avant et après traitement et

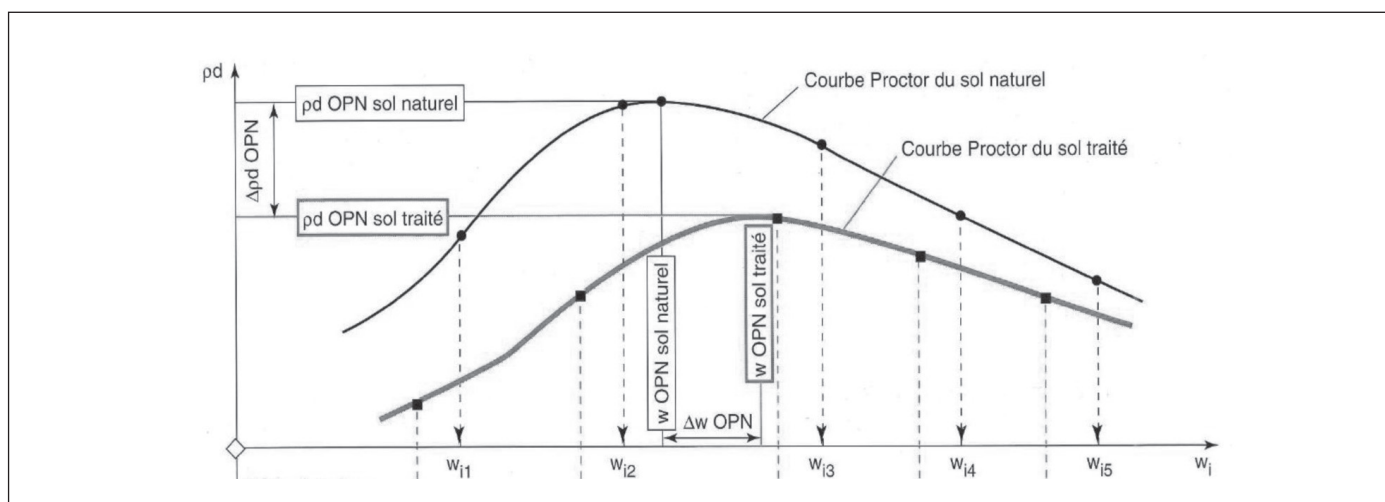


Figure 9 : Exemple de courbes Proctor d'un sol avant et après traitement [15].

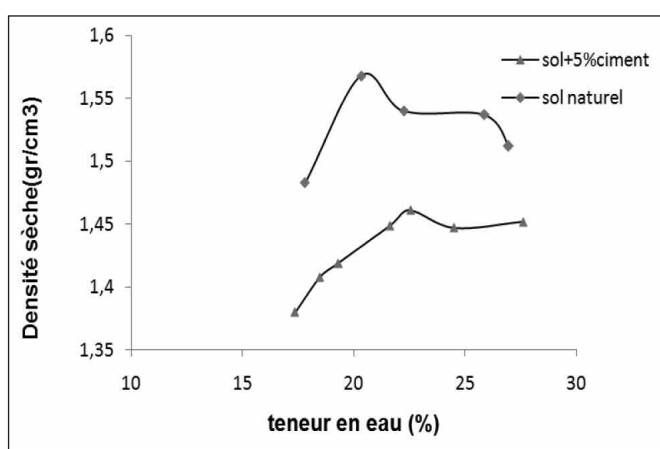


Figure 10 : Courbe Proctor du sédiment de Merdja avant et après traitement au ciment.

la figure 10 montre la courbe Proctor du sédiment de Merdja.

Des mesures de l'Indice Portant Immédiate IPI et du gonflement vertical G par les essais d'immersion du sédiment traité avec 5% de ciment ont été faites, les valeurs obtenues sont de 22,5% pour l'IPI et 1,12% pour le gonflement G. Par la suite des éprouvettes sont confectionnées pour la réalisation d'essais de compression et de traction par fen-

dage. Afin d'étudier l'influence de la teneur en eau sur les caractéristiques mécaniques du matériau, des éprouvettes sont confectionnées pour différentes valeurs de cette teneur en eau.

Des éprouvettes de diamètre 40mm et de hauteur 60mm (soit un élanement de 1,5) sont mises en place par compactage statique. Le malaxage du sol et le ciment est fait dans un malaxeur, ensuite l'eau est ajoutée au mélange, suivie d'un malaxage. Après confection, les éprouvettes sont conservées à l'air libre (figure 11).

5.2. Résultats des essais

Afin d'évaluer la résistance à la compression du sol naturel, des essais de compression simple ont été réalisés à différentes échéances : 7, 14, 28 et 90 jours. Les résultats sont présentés en figure 12. On constate que les résistances obtenues sont croissantes en fonction de la durée de maturation et continuent de croître au-delà de 28 jours. La résistance obtenue à 90 jours est relativement importante, elle est de l'ordre de 3,4MPa. On remarque également que les courbes présentent une pente proche, et donc un module d'élasticité proche.

Les figures 13 et 14, montrent les résultats d'essais de compression et de traction par fendage réalisés sur le sédi-

a) Moule pour confection



b) Conservation des éprouvettes

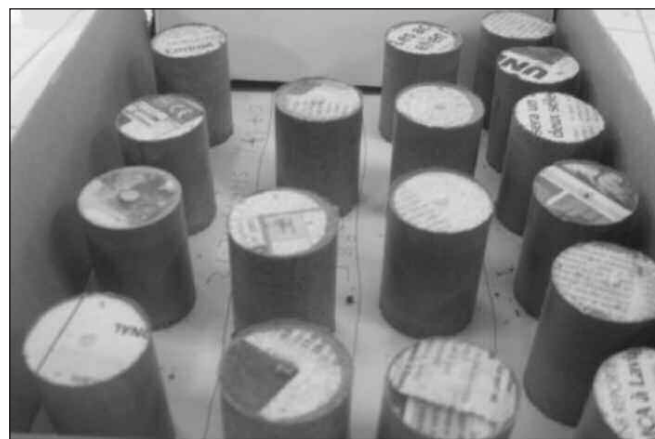


Figure 11 : Photographies des éprouvettes.

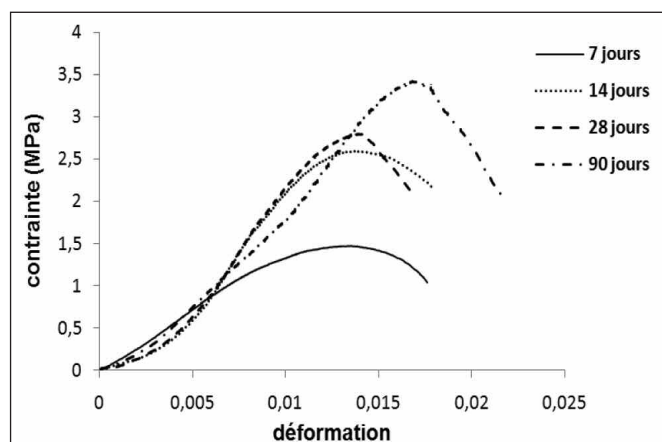


Figure 12 : Résistance à la compression du Sédiment naturel.

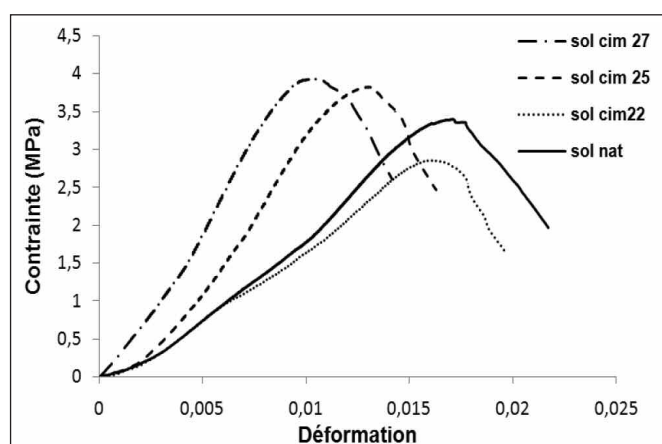


Figure 13 : Résultats des essais de compression à 90 jours pour le sol naturel et traité au ciment (5%) pour des teneurs en eau de 22, 25 et 27%.

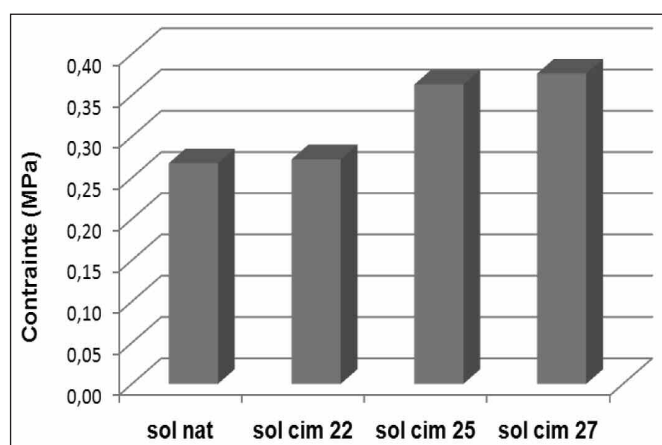


Figure 14 : Contraintes de traction par fendage à 90 jours pour le sol naturel et traité au ciment (5%) pour des teneurs en eau de 22, 25 et 27%.

ment de Merdja naturel à l'optimum Proctor (21%) et traité avec 5% de ciment pour différentes valeurs de teneur en eau. Les teneurs en eau utilisées sont de : 22, 25 et 27%. Les éprouvettes confectionnées avec ces dosages sont désignées par : sol cim 22, sol cim 25 et sol cim 27. On note que, pour une teneur en eau proche de l'optimum Proctor, la résistance en compression est plus faible que

celle du sol naturel, et la résistance en traction est du même ordre de grandeur que celle du sol naturel. En revanche, pour des teneurs en eau supérieures (sol cim 25 et sol cim 27), les valeurs de la résistance en compression et en traction sont plus élevées que celles du sol naturel et sont de même ordre de grandeur entre elles. Cette augmentation de résistance s'explique aisément par la quantité d'eau nécessaire à l'hydratation du ciment. On remarque également que leur module d'élasticité est plus important que celui du sol naturel et croissant en fonction de la teneur en eau.

6. CONCLUSION

L'analyse des sédiments prélevés dans la retenue du barrage de Merdja a permis de définir la composition chimique et minéralogique de ce matériau. Les éléments minéraux composant le matériau sont principalement du quartz, de la calcite et de l'argile sous forme de kaolinite et de smectite.

Les essais de caractérisation géotechnique ont été réalisés sur ce sédiment. Il est classé dans la catégorie des sols fins non organiques selon la classification GTR. Les caractéristiques géotechniques du sédiment étudié notamment (IPI 13%, Ip 39% et VBS 7,5, G 7%) ne satisfont pas les conditions d'utilisation des matériaux en couche de forme telles qu'indiquées dans les GTR. Un traitement est donc nécessaire.

Un traitement au ciment a été testé. Les caractéristiques géotechniques et mécaniques sont nettement améliorées. La résistance en compression augmente en fonction de la durée de maturation et de la teneur en eau. Le sédiment traité avec 5% de ciment CEM II présente des résistances en compression largement supérieures à celles recommandées en couche de forme et ceci malgré la présence d'argiles gonflantes. Le traitement et le dosage suggéré sont donc particulièrement préconisés et afin d'optimiser le traitement, la quantité d'eau recommandée doit être supérieure à l'optimum Proctor.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient vivement le personnel des laboratoires GCGM de l'INSA de Rennes (France) et LaMoMS de l'université de Tizi ouzou pour toute l'aide apportée et les moyens matériels offerts pour la réalisation de ce travail.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Mekki L. Méthodologie d'étude et techniques d'identification des paramètres de comportement des sols fins soumis à des cycles de sécheresse prolongée (application aux argiles expansives de M'sila), Thèse de Magister, Université de Msila.
- [2] Khattab, A., Suhail, Al-Mukhtar, M., Fleureau, J.M., « Long-Term stability characteristics of a lime-treated plastic soil », Journal of Materials in Civil Engineering, vol 19, n° 4, 2007, p. 358-366.

- [3] Rao, M., Sudhakar, Shivananda, P., « Role of curing temperature in progress of lime-soil reactions », *Geotechnical and Geological Engineering*, vol 23, n°1, 2005, p. 79-85.
- [4] Jha, J.N., Gill, K. S., « Effect of rice husk ash on lime stabilization of soil », *Journal of the Institution of Engineers (India): Civil Engineering Division*, vol 87, n° nov., 2006, p. 33-39.
- [5] Sivapullaiah, P. V., Sridharan, A., Ramesh, H. N., « Effect of sulphate on the shear strength of lime-treated kaolinitic soil », *Ground Improvement*, vol 10, n°1, 2006, p. 23-30.
- [6] NF P94-068. Mesure de la capacité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux, AFNOR 1998.
- [7] Zentar R., Abriak N.-E., Dubois V., « Effects of salts and organic matter on Atterberg limits of dredged marine sediments », *Applied Clay Science*, Vol 42, Issues 3-4, 2009.
- [8] Amy B. Cerato and Alan J. Lutenegeger, Shrinkage of clays, Unsaturated sols, 25 Nov 2009
- [9] K. Rasa, R. Horn, M. Rätty, M. Yli-Halla et L. Pietola, Shrinkage properties of differently managed clay soils, *soil Use and Management*, 25, June 2009, p 175-182
- [10] XP P94-060-01. Essai de dessiccation. Partie 1: détermination conventionnelle de la limite de retrait sur le passant à 400µm d'un matériau, AFNOR, 1997.
- [11] BS 1277:2. Methods of test for soils for civil engineering purposes. Classification tests, British Standard, 1990.
- [12] AS 1289.C4.1 Methods of testing soils for engineering purposes - Soil classification tests - Determination of the linear shrinkage of a soil - Standard method, Standards Association of Australia, 1977
- [13] Fall M., Rangeard D., Jaubertie R., Rendell F., Molez L., « Traitement de vase fluviale en vue d'une utilisation routière », 1st International Conference on Sustainable Built Environement Infrastructures in Developing Countries SBEIDCO, Oran (Algeria) - October 12-14, 2009
- [14] Scordia P-Y, Caractérisation et valorisation de sédiments fluviaux pollues et traités dans les matériaux routiers, thèse de doctorat, Ecole centrale de Lille, 2008
- [15] GTR. Guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme. Editions du SETRA-LCPC, Fascicules I & II, 2000
- [16] GTS. Guide du traitement des sols à la chaux et aux liants hydrauliques. Editions du SETRA- LCPC, 2000
- [17] Rogers C.D.F., Boardman D.I., Papadimitriou G., Stress path testing of realistically cured lime and lime/cement stabilized clay, *J. of mat. Civ. Eng., ASCE*, 18:2, pp. 259-266, 2006.
- [18] Consoli N.C., da Silva Lopes L., Heineck K.S., Key parameters for the strength control of lime stabilized soils, *J. of mat. Civ. Eng., ASCE*, 21:5, pp. 210-216, 2009.