

ETUDE ET VALORISATION DES SEDIMENTS DE DRAGAGE DU BARRAGE DE KHERRATA DANS LE NORD DE L'ALGERIE

STUDY AND VALORISATION OF DREDGING SEDIMENTS OF KHERRATA DAM IN THE NORTHERN ALGERIA

Brahim BANOUNE¹, Frédéric ROSQUOET², Bachir MELBOUCI³, Thierry LANGLET²

¹ Département de Génie Civil, Université de Béjaïa, 06000 Béjaïa, Algérie

² Laboratoire des Technologies Innovantes, Université de Picardie Jules Verne

³ Laboratoire de Géomatériaux, Environnement et Aménagement

RÉSUMÉ - La gestion des quantités importantes de sédiments de dragage constitue un enjeu environnemental et économique important. Nous proposons une étude sur les sédiments du barrage de Kherrata. Après une caractérisation physique et mécanique, nous étudierons l'impact du traitement à la chaux sur les paramètres de portance et la résistance à la compression simple.

ABSTRACT – The management of large quantities of dredged sediment is an environmental and economic challenge. We propose a study of Kherrata dam sediments. After characterization, we study the impact to stabilize the sediment and get better physical and mechanical characteristics.

1. Introduction

L'opération de dragage est une phase importante dans la récupération et la préservation des volumes utiles de stockage des barrages. Mais le devenir des quantités importantes de sédiment récupérées constitue un enjeu environnemental et économique de taille (Levacher *et al.*, 2006).

Plusieurs réflexions sont donc menées dans le sens d'une utilisation de ces sédiments dans différents domaines, notamment dans le secteur de la géotechnique et plus particulièrement en couches de formes des corps de chaussée (Scordia, 2008; Rekik et Boutouil, 2011; Semcha, 2006; Zentar *et al.*, 2009; Wang, 2011; Dubois *et al.*, 2009; Anger, 2014).

Avant d'aborder l'utilisation des sédiments dragués du barrage de Kherrata, nous avons effectué une série d'essais physiques, minéralogiques et mécaniques, dans le but d'étudier leur emploi comme matériaux routiers. Cette première étude a révélé la prédominance de particules fines avec un faible pourcentage d'argile et une présence importante de matières organiques. Le comportement physique et mécanique du matériau ne répond pas aux critères imposés par les réglementations en vigueur pour une utilisation en techniques routières GTR (LCPC et SETRA 2000a). Un traitement de ces sédiments par des liants s'avère nécessaire pour améliorer les caractéristiques physiques et mécaniques des sédiments naturels et envisager leur valorisation en couche de forme pour les structures de chaussée. Pour cela, une stabilisation à base de chaux seule ou avec des additifs a été réalisée en faisant varier dans un premier temps le taux de chaux dans les sédiments et dans un second temps en associant des fines de carrière.

2. Site de prélèvement

La vase étudiée a été prélevée en amont de la retenue du barrage de Kherrata (figure 1), situé au Sud Est de la ville de Bejaia au Nord de l'Algérie.



Figure 1. Lieux de prélèvement.

3. Caractérisation des sédiments

3.1. Caractéristiques physiques et minéralogiques

L'emploi des sédiments récupérés lors d'opération de dragage, à l'état naturel ou après traitement, ne peut être discuté qu'après une étude approfondie de leur nature et leurs caractéristiques mécaniques (Banoune *et al.*, 2015).

D'un point de vu minéralogique, le matériau est composé essentiellement de quartz et de calcite (tableau 1).

Tableau 1 Composition minéralogique du sédiment (diffraction aux rayons X).

Sédiments	Composition minérale (%)			Principaux minéraux
	Quartz	Calcite	Micas	
Kherrata (K)	45 – 50	40 – 45	5 - 10	Quartz, calcite et Micas

La composition granulométrique d'un sédiment peut s'étendre des cailloux ($d > 20$ mm) aux argiles ($d < 2$ μ m). Notre sédiment est composé essentiellement de fraction avec plus de 70 % des particules qui ont un diamètre inférieur à 80 μ m (figure 2).

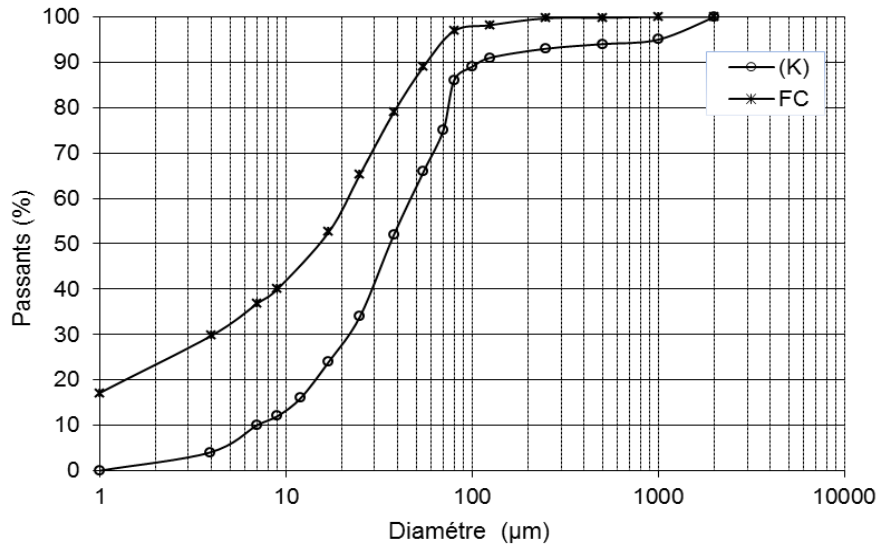


Figure 2. Courbes granulométrique, (K) : Sédiments de Kherrata, FC : Fines de carrière.

Nous nous sommes donc intéressés à l'argilosité de notre sédiment. Ce paramètre est d'une importance majeure pour le choix du traitement à apporter à notre matériau, notamment si on envisage leur utilisation en technique routière.

Le Guide du Traitement du Sol GTS (LCPC et SETRA 2000b) propose deux méthodes pour évaluer l'argilosité des sédiments. La première consiste à déterminer l'indice de plasticité IP et la seconde à estimer la valeur au bleu de méthylène VBS. L'indice de plasticité IP est déterminé après calcul des limites d'Atterberg selon les normes françaises NF P94-051 (AFNOR, 1993a). Cet essai nous a également permis de classier notre matériau selon Casagrande (Figure 3). Il s'agit d'un sol peu plastique. Ce résultat est conforté par l'essai au bleu de méthylène (Tableau 2). L'analyse granulométrique par tamisage de l'échantillon est complétée par une analyse sédimentométrique selon les normes NF P94-057 (AFNOR, 1992), plus appropriée pour les particules dont le diamètre est inférieur à 80 µm. La distribution granulométrique révèle une texture limoneuse avec une faible proportion de particules fines (< 2 µm). Le calcul des coefficients d'uniformité ($C_u > 2$) et de courbure C_c ($1 < C_c < 3$) révèle une granulométrie étalée.

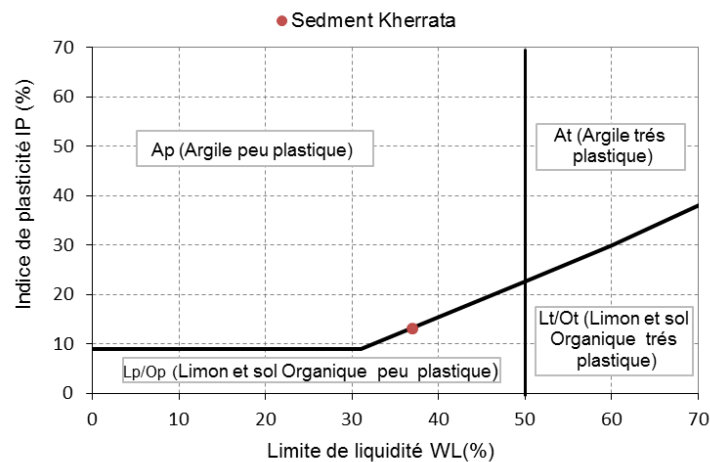


Figure 3. Classification des sédiments de Kherrata selon Casagrande.

Le tableau 2 regroupe les principales caractéristiques physiques mesurées.

Tableau 2. Caractéristiques physiques des sédiments

Paramètres	Sédiments de Kherrata
% < 2 μm (Argile)	2 %
2 μm < % < 63 μm (Limon)	69 %
% > 63 μm (Sable fin)	29 %
2 <%< 50 μm	62%
% < 80 μm	70%
ρ_s (g/cm ³)	2,77
Coefficient d'uniformité Cu	6,57
Coefficient de courbure Cc	1,5
VBS	2,55
% MO par perte au Feu	4,3
W _l (%)	36,8
W _p (%)	22,9
IP (%)	13,9

La présence de matières organiques en quantité notable, modifie considérablement le comportement des sols et remet en cause leurs stabilités volumiques dans le temps (Walid et Ben Abdelghani, 2014).

3.2. Caractéristique mécanique

En techniques routières la nature des sédiments et la quantité d'argile contenue dans un matériau sont les principaux paramètres qui interviennent dans le choix du traitement. La caractérisation de notre sol selon le GTR (LCPC and SETRA 2000a) montre que les sédiments sont de types A₂. Cette catégorie regroupe les sols limoneux peu plastiques à faible taux d'argile. Cette classification montre qu'il est possible d'utiliser ce matériau en structure de chaussée. Toutefois, la détermination des conditions de mise en œuvre est nécessaire. A partir de l'essai Proctor normal réalisé selon la norme française NF P94-093 (AFNOR, 1999), nous avons déterminé les teneurs en eau et densités correspondantes de chaque formulation. Les indices de portance immédiats (IPI) et les indices CBR après immersion (I_{CBR}) des sédiments avant traitement sont obtenus par poinçonnement selon la norme française NF P94-078 (AFNOR, 1997). On constate (tableau 3) que les résultats sont inférieurs aux normes exigées dans le domaine routier (LCPC et SETRA 2000b). Cependant ces sédiments pourront être stabilisés par traitement à la chaux.

Tableau 3. Caractéristiques mécaniques des sédiments de Kherrata.

	Mesure	Valeur seuil
$\rho_{d \text{ opt}}$ (g/cm ³)	1,96	-
W _{opt}	12	-
IPI (opt)	21,2	15
$I_{\text{CBR ap Im}}$	12,1	20
I_{CBR}/IPI	0,57	1

4. Valorisation en techniques routières

L'étude menée pour déterminer les caractéristiques mécaniques des sédiments bruts pour une utilisation dans le domaine des travaux routiers a montré une faible capacité portante et de médiocres caractéristiques mécaniques. Afin de valoriser notre matériau un traitement à la chaux sera réalisé afin d'accroître les performances mécaniques. Les

sédiments, de teneur en eau initiale élevée ont été séchés à l'air libre puis à l'étuve à 40°C pour éviter toute modification ou altération de leurs caractéristiques en particulier les matières organiques. A la fin du séchage, il est nécessaire de fragmenter et de tamiser pour obtenir une classe granulaire de 0/2 mm. Cette fraction sera utilisée et considéré comme sédiment brut.

Pour visualiser l'apport du traitement on a étudié la variation de trois paramètres : la variation de la résistance à la compression simple (R_c), l'indice de portance immédiat (IPI) et indice CBR après immersion (I_{CBR}). Enfin, pour compléter notre étude nous avons fait le choix d'ajouter, en plus du traitement à la chaux, un correcteur granulométrique sous la forme de fine de carrière.

Nous avons fait variés les teneurs en chaux (Ch) entre 2 % et 12 % de la matière sèche. Ensuite nous nous sommes fixé une teneur en chaux de 2 % et avons fait varier la teneur en fines de carrière entre 5 et 25 %.

4.1. Traitement à la chaux

Les paramètres de compactage (W_{opt} et ρ_{dopt}) sont déterminés pour chaque formulation par l'essai Proctor normal. L'indice de portance immédiat IPI et indice CBR après immersion I_{CBR} sont ensuite déterminés.

On note une nette amélioration de la portance et du rapport I_{CBR}/IPI en fonction du dosage en liant (tableau 4). Ceci témoigne de l'efficacité du traitement du point de vue portance. Celle ci est nettement améliorée après 4 jours d'immersion. Ainsi, le risque de perte de cohésion en cas de saturation hydrique de la couche est écarté, et les rapports (I_{CBR}/IPI) sont tous nettement supérieurs à 1, ce qui est un critère de pérennité des traitements envisagés (LCPC et SETRA 2000b).

Tableau 4. Caractéristiques mécaniques des sédiments en fonction du taux de chaux.

Dosage en chaux (%)	0	2	4	6	8	10	12
$\rho_{dopt}(g/cm^3)$	1,96	1,92	1,87	1,73	1,68	1,64	1,59
W_{opt}	12	12,2	12,41	12,6	12,77	13,08	13,29
IPI (opt)	21,2	30,2	30,5	31,1	32	32,2	32,5
I_{CBR} ap 1m	12,1	32	34,4	36,1	37,3	38,5	39,3
I_{CBR}/IPI	0,57	1,06	1,13	1,16	1,17	1,20	1,21

Pour la campagne d'essais en compression simple, des éprouvettes d'élançements 2 (diamètre 5 cm et hauteur 10 cm), sont confectionnées à l'optimum Proctor, selon la norme française NF P98-230-2 (AFNOR, 1993b). Elles sont conservées dans les conditions d'une cure normale à l'air libre à la température du laboratoire soit 20 à $\pm 2^\circ C$. Ils sont testés à 7, 14, 21, 28,60 et 90 jours. Les résultats sont représentés sur la figure 4.

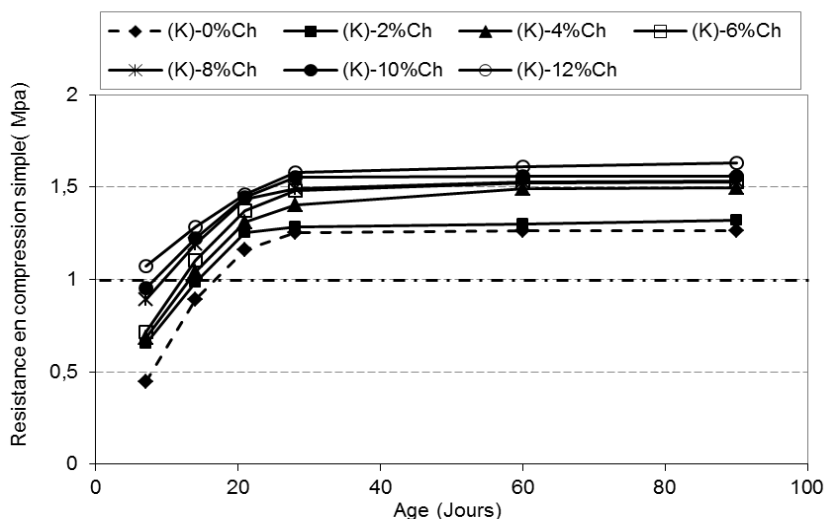


Figure 4. Evolution de la résistance à la compression simple (R_c) des sédiments de Kherrata à différents dosages en chaux.

Les résistances en compression simple évoluent avec l'augmentation du taux de chaux. Pour 4% de chaux l'augmentation est notable à partir de 28 jours, âge à partir duquel les résistances obtenus tendent à se stabiliser pour toutes les formulations testées.

Le critère de traficabilité est jugé satisfaisant dès lors que la résistance en compression simple (R_c) est supérieure à 1 MPa (LCPC et SETRA 2000b), cette condition est satisfaite dès 14 jours de cure. Ceci peut être expliqué par la réaction pouzzolanique provoqué par l'ajout de la chaux induisant une cristallisation à long terme.

4.2. Traitement avec incorporation de correcteurs granulométriques

Dans une deuxième série d'essais, le taux de chaux a été maintenu à 2%, et la granulométrie des sédiments a été modifiée à l'aide de fines de carrière dans des proportions allant de 5% à 25%. L'impact recherché par cet ajout est l'amélioration des résistances mécaniques par la modification du squelette granulaire et réduction du taux des matières organiques dans le mélange, sachant que ces apports sont inorganiques.

Sur la figure 5, il apparait une nette amélioration de R_c à court et long termes après ajout des fines de carrière avec des résistances supérieures au seuil de 1 MPa requis dès le 7ème jour, dépassant même 2,5 MPa à 28 jours. On peut conclure que l'effet de la poudre de carrière est stabilisateur. Ceci peut s'expliquer par la granulométrie bien étalée et par la finesse des fines de carrière, ce qui améliore la cohésion au sein du sédiment. Toutefois, des résistances moindres sont obtenues pour des pourcentages élevés en fines de carrière. Cela peut être dû à la quantité importante de fine dans le produit final. Sachant que les fines de carrière sont constituées de 25 % de particules de moins de 2 μ m.

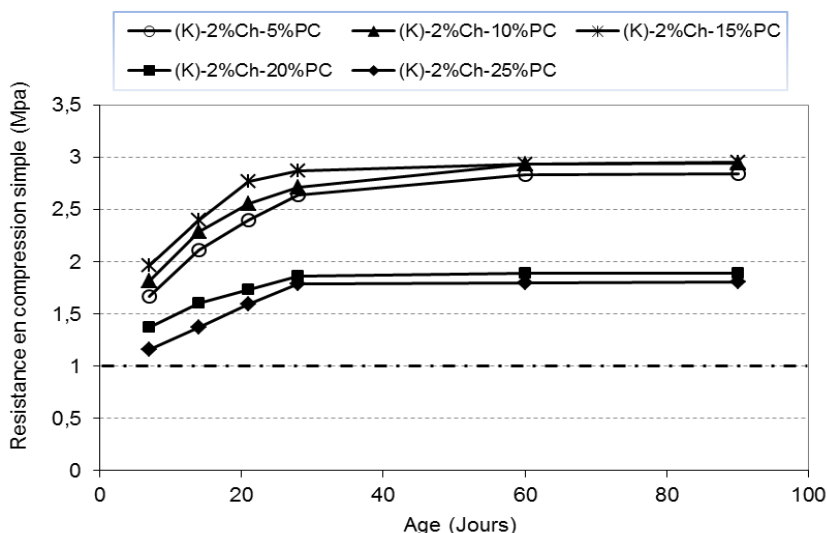


Figure 5. Evolution de la résistance à la compression simple (R_c) des sédiments à différents dosages en fines de carrière.

5. Conclusion

L'objectif de cette étude est de mettre en avant les principaux avantages d'un traitement à la chaux et de la modification de la granulométrie des sédiments de dragage afin de les valoriser dans le domaine routier.

L'étude minéralogique révèle que le matériau était composé majoritairement de quartz et de calcite. Les principales caractéristiques physiques mesurées montrent que la proportion de fines est prédominante avec plus de 70% de tamisât à 63 μm . Un faible pourcentage d'argile et une présence significative de matières organiques. Toutefois, ce faible pourcentage d'argile présent dans les sédiments favorise leur utilisation en géotechnique. La classification selon le Guide technique (LCPC and SETRA 2000a) confirme cette réflexion (matériau de classe, A_2). Néanmoins, à l'état brut, les performances mécaniques des sédiments montrent que l'indice de portance après immersion est en dessous des normes requises pour les matériaux routiers.

Afin d'obtenir les performances souhaités une stabilisation de ces sédiments par la chaux a été réalisée.

Les résultats obtenus sur les différentes formulations étudiées sont prometteurs et montrent que l'ajout de chaux dans les sédiments influe favorablement sur les paramètres géotechniques. Ainsi la portance du nouveau matériau est nettement améliorée, notamment après 4 jours d'immersion dans l'eau. Les résistances en compression simple R_c obtenues ont augmentée comparée aux sédiments bruts, dépassant le seuil requis de 1 MPa permettant leurs utilisations comme couche de forme pour une structure de chaussée (LCPC et SETRA 2000b).

L'apport d'un correcteur granulométrique en faible proportion s'avère encore plus efficace en termes d'amélioration des résistances en compression simple R_c . Ces dernières augmentent substantiellement avec l'incorporation de la poudre de carrière en association avec 2% de chaux. Le critère de de traficabilité est largement satisfait

permettant même l'utilisation de couches de sédiments traitées à la circulation après seulement quelques jours.

6. Référence bibliographiques

- AFNOR (1992) Analyse granulométrique des sols-Méthode par sédimentation (NF P94-057). Norme expérimentale, France, 20 pages.
- AFNOR (1993a) Détermination des limites d'Atterberg-Limite de liquidité à la coupelle-Limite de plasticité au rouleau (NF P94-051). Norme expérimentale, France, 15 pages.
- AFNOR (1993b) Préparation des matériaux traités aux liants hydrauliques ou non traités-Fabrication des éprouvettes de sables ou de sols fins par compression statique (NF P98-230-2). Norme expérimentale, France, 12 pages.
- AFNOR (1997) Indice CBR après immersion-Indice CBR immédiat-Indice portant immédiat (NF P94-078). Norme expérimentale, France, 12 pages.
- AFNOR (1999) Détermination des références de compactage d'un matériau-Essai Proctor normal-Essai Proctor modifié (NF P94-093). Norme expérimentale, France, 20 pages.
- Anger B. (2014). Caractérisation de sédiments fins de retenues hydroélectriques en vue d'une orientation vers des filières de valorisation matière. Thèse de doctorat, Université de Caen, France, 316 pages.
- Banoune B., Bachir M., Rosquoët F., Langlet T. (2015). Treatment of river sediments by hydraulic binders for valorization in road construction. *Bull Eng Geol Environ*, (en ligne).
- Dubois V., Abriak N.E., Zentar R., Ballivy G. (2009). The use of marine sediments as a pavement base material. *Waste Management*, vol. 29, pp. 774–782.
doi: 10.1016/j.wasman
- LCPC, SETRA. (2000a). Réalisation des remblais et des couches de forme, guide technique. Fascicule II-Annexes techniques, 2ème édition, Paris, 211 pages.
- LCPC, SETRA. (2000b). Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques-Application à la réalisation des remblais et des couches de forme, guide technique, Paris, 246 pages.
- Levacher D., Colin D., Carina A., Duan Z., Sun L. (2006). Recyclage et valorisation de sédiments fins de dragage à usage de matériaux routiers. *IXème journées nationales Génie Civil- Génie Côtier*, Brest, pp.603-612, doi: 10.5150/jngcgc.2006.058-L
- Rekik B., Boutouil M. (2011). Geotechnical properties of dredged marine sediments treated at high water/cement ratio. *Geo-Marine Letters*, vol. 29, pp. 171–179.
doi: 10.1007/s00367-009-0134-x
- Scordia P. (2008). Caractérisation et valorisation de sédiments fluviaux pollués et traités dans les matériaux routiers. Thèse de Doctorat, Ecole centrale de Lille, 202 pages.
- Semcha A. (2006). Valorisation des sédiments de dragage : Applications dans le BTP, cas du barrage de Fergoug. Thèse de Doctorat, Université de Reims, France, 175 pages.
- Walid M., Ben Abdelghani F. (2014). Dredged marine raw sediments geotechnical characterization for their reuse in road construction. *Engineering Journal*, vol. 18, n°4, pp.27-37. doi: 10.4186/ej.2014.18.4.27
- Wang D. (2011). Solidification et valorisation de sédiments du port de Dunkerque en travaux routiers. Thèse de Doctorat, Ecole des Mines de Douai et Université Lille 1, France, 174 pages.
- Zentar R., Abriak N.E, Tran N. (2009). Caractérisation et étude de l'impact sur l'environnement de sédiments dragués dans le nord de France. *Revue Paralia*, vol. 2, pp. 4.1- 4.12.