

Caractérisation des propriétés mécaniques et environnementales de granulats provenant de résidus de dragage

Mélanie Cyr, Gérard Ballivy et Roland Leduc

Département de Génie Civil, Université de Sherbrooke,
2500, boulevard de l'Université, Sherbrooke (Québec) Canada J1K 2R1
Melanie.Cyr@USherbrooke.ca, Gerard.Ballivy@USherbrooke.ca, Roland.Leduc@USherbrooke.ca

Résumé

Afin de stabiliser l'érosion littorale, la valorisation des résidus de dragage pour le remblaiement des berges représente une option intéressante. Afin d'en évaluer le potentiel, des granulats à base de résidus de dragage ayant différentes proportions eau/ciment ont été confectionnés. La visée de ce projet est donc de caractériser les propriétés mécaniques et environnementales de ces granulats. Les sédiments proviennent du port de Dunkerque en France et, selon la législation française, ne sont pas considérés comme étant pollués. Ces derniers ont une forte teneur en eau, se chiffrant de 150 à 200 %. La première étape est donc d'en réduire la teneur en eau à l'aide d'un procédé de décantation jusqu'à la limite de liquidité, soit 110 %, pour faciliter les manipulations ultérieures. Ensuite, les sédiments sont malaxés en ajoutant une proportion de ciment prédéterminée afin d'obtenir six formulations ayant un rapport eau/ciment variant de 1 à 4. La troisième étape est la confection des granulats par le biais d'une extrudeuse produisant des boudins de sédiments qui sont ensuite coupés pour en faire des granulats d'environ 30 mm de diamètre. Ces granulats reposent en salle climatisée, afin de conserver leur humidité, pour une cure de 7 et 90 jours. Après ce murissement, les granulats sont soumis à quatre essais mécaniques selon les normes françaises : l'essai de fragmentabilité, de Los Angeles, Micro-Deval et de dégradabilité. Une analyse des métaux est aussi effectuée sur les cinq premières formules de granulats afin de les comparer aux critères de rejet français et canadiens. Ces tests permettent de constater qu'à sept jours, le comportement mécanique des différentes formulations étudiées est dépendant du rapport eau/ciment. Les formules ayant un rapport eau/ciment de 3 et 4 n'ont pas développé de résistance en 7 jours. À 90 jours, les valeurs des résultats des différents essais ne varient pratiquement plus en fonction de la proportion de ciment dans les sédiments. À la lumière des résultats obtenus, le matériau est considéré peu fragmentable et peu dégradable. Selon les normes en vigueur, les granulats de résidus de dragage pourront être valorisés sur les berges en France, mais une telle valorisation n'est légalement pas envisageable au Québec selon la réglementation actuelle.

Mots clés : Résidus de dragage, sédiments marins, Los Angeles, Micro-Deval, dégradabilité, fragmentabilité, métaux.

I. Introduction

Beaucoup de rivières navigables situées dans des zones habitées ou à l'embouchure des estuaires sont l'objet de phénomènes importants de sédimentation. Afin de maintenir un tirant d'eau sécuritaire pour les navires, draguer le fond marin représente un entretien primordial pour les ports. Les sédiments dragués peuvent contenir une concentration importante de divers contaminants provenant d'affluents industrialisés, de déversements, de zones agricoles du bassin versant ainsi que de bien d'autres sources.

En se basant sur les conséquences et les causes, l'érosion du littoral se divise en deux types : l'érosion naturelle et l'érosion accélérée [Tremblay, 1998]. L'érosion naturelle dépend de facteurs climatiques, hydrodynamiques et de la sédimentologie [Aernouts et Héquette, 2006 ; Foucher, 2005 ; Otten et al, 2006 ; Savard, 2006]. Ce type d'érosion a pour conséquence de modeler le relief global des berges. L'érosion accélérée est associée aux activités humaines qui ont modifié le couvert du sol et son état.

Description des sédiments

Les sédiments dragués peuvent renfermer des substances nutritives (azote et phosphore), des métaux lourds (mercure, argent, cuivre, zinc, cadmium, chrome, nickel, plomb, etc.), des substances organiques persistantes, des organismes bactériens et viraux, de même que des substances radioactives naturelles ou artificielles [Legouevic, s.d. ; Ménard, 2003]. Une des grandes problématiques des sédiments marins est leur forte teneur en eau, pouvant atteindre de 150 à 200 % [Dubois, 2001 ; Grégoire, 2004]. En plus ils contiennent généralement une portion non négligeable de matière organique. Cette dernière influence le comportement du matériau en augmentant sa plasticité. Elle peut être d'origine naturelle (MON) ou urbaine (MOU) [Marcoux, 2008]. La MON provient de la production, de la consommation et de la décomposition des bactéries, plantes et animaux. La nature de la matière organique influence les propriétés géotechniques des sols. Afin de stabiliser chimiquement les sols organiques, la cimentation s'avère une solution efficace [Wareham et Mackechnie, 2006].

Gestion

La plus récente réglementation nationale et internationale

[arrêté du 14 juin 2000 ; OSPAR, 1992], plus sévère que la précédente, considère maintenant les sédiments marins comme des déchets en France. La gestion de ces résidus mène aux alternatives de la mise en dépôt, l'enfouissement dans un lieu d'enfouissement technique ou sanitaire et leur valorisation [Boutin, 1999 ; Grégoire, 2004 ; PRE-DIS, 2006]. Récemment, des études ont démontré un intérêt pour la valorisation de ces vases. Cette option se fait dans quelques domaines tels que l'agriculture, l'environnement et le génie civil, particulièrement pour des applications de remblaiement [Dubois, 2001], de recharge de plages et de berges [Aernouts et Héquette, 2006 ; Brakni et al, 2007], des digues et des barrages ainsi qu'en tant que matériaux de construction.

Dans cet article, l'utilisation des sédiments dans le domaine du génie civil sera étudiée et particulièrement la stabilisation des littoraux pour contrer l'érosion à l'aide de résidus de dragage consolidés avec du ciment.

2. Méthodologie

Les résidus de dragage d'origine marine proviennent du port de Dunkerque et sont considérés comme étant non pollués selon la législation française.

Décantation

Pour l'utilisation de ces sédiments dans la confection de granulats, la teneur en eau doit être réduite afin de s'approcher de la limite de liquidité, soit environ 110 % [Brakni et al, 2007]. En effet, des mélanges pré-effectués démontrent qu'en dessous de cette limite, les mélanges sont difficilement malléables après l'ajout du liant hydraulique. Au-dessus de cette limite, les mélanges restent trop liquides, les quantités de ciment nécessaires pouvant devenir très importantes. La décantation naturelle des sédiments est préférable pour réduire la teneur en eau du matériau. Cette méthode reflète davantage les conditions réelles de chantiers. Dans le cadre du projet, la décantation ou l'évaporation ont été utilisées comme prétraitement. Un bac situé à l'extérieur, à l'air libre et protégé des pluies éventuelles, permet la décantation des sédiments (Figures 1 et 2). L'eau décantée est recueillie à la base de ce bac dans deux sacs de chaque côté pour des analyses subséquentes. Les sédiments sont homogénéisés dans un fût.



Figure 1 - Bac de décantation fermé



Figure 2 - Sédiment décanté

Confection des granulats

La confection des granulats comporte plusieurs étapes. En premier lieu il y a la consolidation, puis la stabilisation des sédiments [Bennert et al, 2000 ; Boutouil, 1998 ; Zhu et al, 2005], c'est-à-dire le malaxage des sédiments et du ciment. Suivent la confection de granulats et enfin leur mûrissement. Quatre formulations (F1, F2, F3 et F4) pour la confection des granulats ont été étudiées à 7 jours et à 90 jours de mûrissement. Ces formulations se distinguent par leur rapport pondéral eau/ciment (e/c) compris entre 1 et 2,5. Deux autres formulations (F5 et F6) à 7 jours ont également été élaborées avec des rapports e/c respectifs de 4,0 et 6,0. Exceptionnellement, les sédiments de la formulation 6 ont nécessité un séchage à l'étuve (105 °C) pendant quatre heures.

Le ciment Portland CEM I 52,5 R HRS LA (CIBELCOR), utilisé dans ce projet, est approprié pour toutes les applications où de hautes résistances initiales sont nécessaires. Une de ses caractéristiques est de pouvoir être utilisé avec l'eau de mer. En plus, il résiste davantage aux eaux agressives.

La pâte cimentée est insérée à l'intérieur d'un canon à piston à air comprimé, nommé extrudeuse, pour confectionner des boudins qui sont ensuite coupés en petits segments (Figure 3). Des granulats d'environ 30 mm de diamètre (boulettes) sont alors confectionnés (Figure 4). Le mûrissement des granulats se fait en salle climatisée à la température ambiante de 20 °C afin d'en préserver l'humidité. Les boulettes sont conservées jusqu'aux essais mécaniques, soit à 7 et 90 jours.

Essais Mécaniques

Quatre essais sont réalisés afin de déterminer la résistance mécanique des granulats, soit des essais de fragmentabilité [NF P 94-066, 1992], de Los Angeles [NF P 18-573, 1990], de Micro-Deval [NF P 18-572, 1990] et de dégradabilité [NF P 94-067, 1992].

Caractérisation environnementale

La concentration de substances inorganiques (métaux) dans les granulats est obtenue. Les différentes formulations utilisées pour la confection des granulats sont toutes analysées. D'un diamètre d'environ 30 mm, les granulats

sont finement broyés (inférieurs à 180 μm) pour la digestion. En les concassant finement, le pire état de détérioration dans lequel ils pourraient se trouver lors de leur utilisation sur les berges est alors simulé. Afin de comparer les résultats d'analyse aux critères français (critères des résidus de dragage), les métaux totaux sont considérés. L'extraction se réalise à l'aide d'une méthode rapide et raisonnablement précise – une digestion d'une heure avec de l'acide fluorhydrique et de l'eau ionisée dans un contenant en Téflon. La concentration des métaux est déterminée par spectrométrie de masse couplée à une source d'émission au plasma d'argon (ICP-MS, ELAN DRC II, Perkin-Elmer).



Figure 3 - Boudins de sédiments cimentés



Figure 4 - Granulats de sédiments cimentés

3. Résultats

Fragmentabilité

Les résultats des essais de fragmentabilité illustrent qu'à 7 jours de mûrissement, plus le rapport e/c diminue, plus le coefficient de fragmentabilité (FR) augmente (Figure 5). À 90 jours, la différence des formulations a moins d'influence sur le comportement des granulats. On remarque que les valeurs des coefficients FR sont plus rapprochées d'une formulation à une autre. Comme la valeur des coefficients FR est toujours inférieure à 7, le matériau est considéré comme étant peu fragmentable. La formulation 6 n'est pas

présentée puisque les granulats n'ont acquis aucune résistance à 7 jours.

Los Angeles

Selon les résultats, le coefficient Los Angeles augmente avec le mûrissement des sédiments (Figure 6). La cimentation étant plus avancée, une résistance plus élevée à la fragmentation par chocs est obtenue. Les formulations 5 et 6 ne sont pas représentées sur ce graphique puisque l'essai n'a pas réussi, les granulats étant humides et mous à 7 jours.

Micro-Deval

Les granulats à 7 jours soumis à l'essai Micro-Deval en présence d'eau n'ont pas montré une résistance à l'usure élevée. Les coefficients Micro-Deval, pour un rapport e/c supérieur à 2, sont tous à 100 %, démontrant ainsi qu'aucune particule supérieure au tamis de 1,6 mm n'a été recueillie après les essais. Pour les granulats à 90 jours, les résultats sont un peu meilleurs mais restent peu satisfaisants. La sollicitation mécanique exercée sur les granulats pendant l'essai Micro-Deval est très sévère, d'autant plus qu'elle a eu lieu sur une fraction granulaire concassée, et non sur les granulats initiaux de diamètre 30 mm comme pour l'essai Los Angeles.

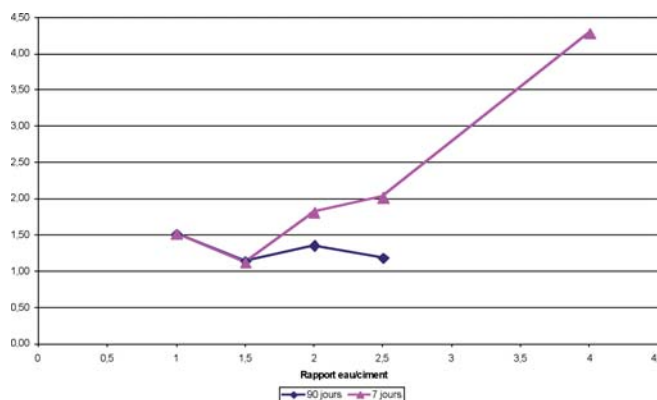


Figure 5 - Coefficient de fragmentabilité des granulats de fraction 10/20 en fonction du rapport eau/ciment

Dégradabilité

L'essai permet de constater qu'à 90 jours, la valeur du coefficient de dégradabilité DG n'est pas influencée par le rapport eau/ciment de chaque formulation (Figure 7). Les valeurs sont toutes près de 1, ce qui confirme que des cycles d'immersion et de séchage des sédiments ne contribuent pratiquement pas à la dégradation des granulats, et ce même pour les granulats étudiés à 7 jours.

Analyse des métaux

L'analyse des métaux totaux des granulats permet la comparaison des résultats obtenus avec les critères français (Tableau 1). Lorsque les concentrations de métaux ne

dépassent pas le niveau 1, il n'y a aucune restriction à l'utilisation des sédiments. Cependant, une mise en dépôt à terre est exigée lorsque ces concentrations excèdent le niveau 2. Les concentrations de chrome, cuivre et nickel dépassent le niveau 1, qui permet la valorisation des sédiments dans divers domaines. Aucune analyse des métaux n'a été effectuée sur les sédiments marins bruts avant le malaxage et l'ajout d'un agent de consolidation, c'est-à-dire le ciment ; il est peu probable qu'une portion significative de ces métaux proviennent du ciment. On en déduit que les sédiments devaient être contaminés initialement.

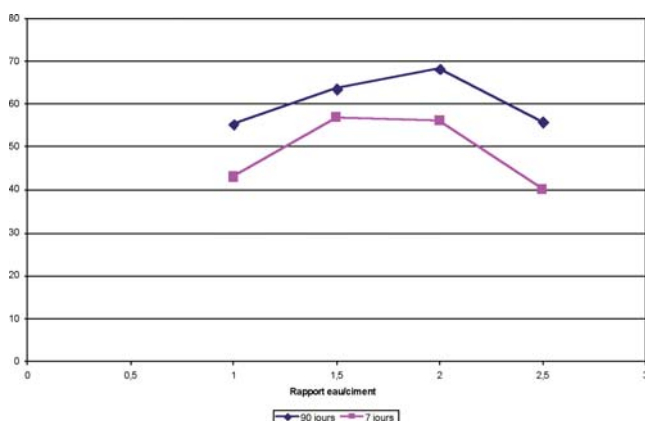


Figure 6 - Coefficient de Los Angeles des granulats en fonction du rapport eau/ciment

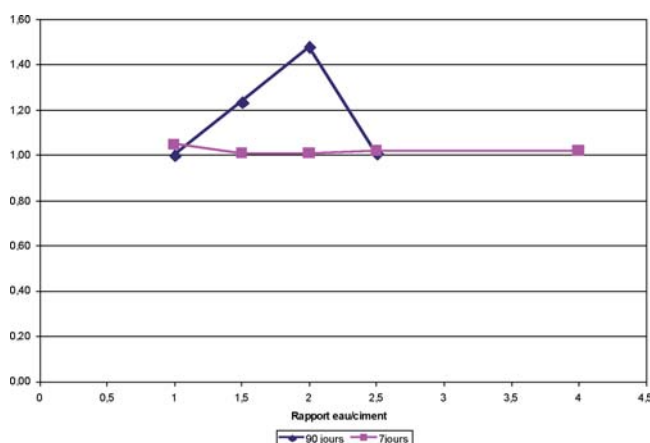


Figure 7 - Coefficient de dégradabilité des granulats de fraction 10/20 en fonction du rapport eau/ciment

Au Québec, la législation actuelle ne permet pas la valorisation de matières résiduelles dans les cours d'eau [MEQ, 2002]. Les granulats à l'étude ne pourraient donc pas être utilisés dans les cours d'eau ou littoraux québécois.

Métaux totaux	Critères français		Rapport e/c (eau/ciment)				
	Niveau 1 (ppm)	Niveau 2 (ppm)	1,0	1,5	2,0	2,5	4,0
			#1 et #2 ^a	#3 et #4 ^a	#5 et #6 ^a	#7 et #8 ^a	#9 et #10 ^a
As	25	50	15,6	15,4	16,1	15,0	13,1
Cd	1,2	2,4	0,6	1,4 ^b	0,9	0,8	0,7
Cr	90	180	169 ^b	177 ^b	178 ^b	236 ^c	161 ^b
Cu	45	90	169 ^c	165 ^c	110 ^c	196 ^c	127 ^c
Hg	0,4	0,8	nd	nd	nd	nd	nd
Ni	37	74	64,9 ^b	62,4 ^b	60,3 ^b	50,5 ^b	41,7 ^b
Pb	100	200	nd ^d	nd ^d	nd ^d	nd ^d	nd ^d
Se	-	-	7,0	8,1	8,6	7,7	8,6
Zn	276	552	100	105	112	100	95

^a Moyenne des échantillons portant les numéros indiqués ; ^b Niveau 1 dépassé ; ^c Niveau 2 dépassé ; ^d Erreur de préparation ou analytique soupçonnée ; nd = non détecté

Tableau 1 - Analyse des métaux totaux des granulats de sédiments

4. Conclusion

La confection des granulats de sédiments, telle que réalisée, s'avère une solution intéressante pour la valorisation de résidus de dragage. Les essais mécaniques démontrent que ce matériau a une bonne résistance mécanique lorsque le mûrissement des granulats est complété. Leur défaut est la faible résistance à l'abrasion en présence d'eau. Ceci peut s'expliquer par le fait que les résultats sont obtenus à partir d'une fraction plus fine que leur taille d'origine, c'est-à-dire d'environ 30 mm de diamètre. Les analyses des métaux des granulats de sédiments ont permis de constater que les concentrations de chrome et de cuivre dépassent le niveau 2 des critères français de résidus de dragage : ces sédiments marins ne peuvent donc pas être utilisés sans restriction et la mise en dépôt à terre est exigée.

Remerciements

Les auteurs apprécient l'opportunité qui leur a été offerte par l'École des Mines de Douai (Douai, France) et la précieuse contribution des chercheurs et étudiants du département de génie civil et environnement dans la réalisation de ces essais.

Références

[Aernouts, D., A. Héquette, 2006] *L'évolution du rivage et des petits-fonds en baie de Wissant pendant le XX^e siècle (Pas-de-Calais, France), Géomorphologie : relief, processus, environnement*, numéro 1, [En ligne]. <http://geomorphologie.revues.org/document477.html>. Consulté en 09/2007.

[Arrêté du 14 juin 2000] *Arrêté relatif aux niveaux de référence à prendre en compte lors d'une analyse de sédi-*

ments marins ou estuariens présents en milieu naturel ou portuaire, JORF du 10 août 2000 (NOR : ATEE0090254A). <http://www.legifrance.gouv.fr>. Consulté en 09/2007.

[Bennert, T.A., M. H. Maher, F. Jafari, N. Gucunski, 2000] *Use of dredged sediments from Newark Harbor for geotechnical applications*, ASTM Special Technical Publication, numéro 1374, (152-164).

[Boutin, R., 1999] *Amélioration des connaissances sur le comportement des rejets en mer des produits de dragage type vase : phénomènes court terme champ proche*, Thèse de l'Institut national des sciences appliquées de Lyon.

[Boutouil, M., 1998] *Traitement des vases de dragage par stabilisation / solidification à base de ciment et additifs*, Thèse de doctorat, Université du Havre, 245 p.

[Brakni, S., N. E. Abriak, P. Grégoire, R. Zentar, 2007] *Valorisation de boues de dragage maritime en granulats artificiels en vue de stabiliser l'érosion littorale*, École des mines de Douai, département de génie civil et environnemental, 8 p.

[OSPAR, 1992] *Convention pour la protection du milieu marin de l'Atlantique du Nord-Est*, Commission OSPAR. [En ligne] <http://www.ospar.org>. Consulté en 09/2007.

[Dubois, V., 2001] *Étude du comportement physico-mécanique et caractérisation environnementale des sédiments marins - valorisation en technique routière*, Thèse de doctorat, Université d'Artois, 291 p.

[Foucher, J., 2005] *Valorisation des déblais sableux de dragage portuaire en France Métropolitaine*, Mémoire de thèse, École nationale des travaux publics de l'État, Vaulx-en-Velin, 66 p.

[Grégoire, P., 2004] *Modèle conceptuel d'aide à la décision multicritère pour le choix négocié d'un scénario de dragage maritime*, Thèse de doctorat, Université d'Artois, 281 p.

[Legouevéc, J., s.d.] *Étude du traitement des sols vaseux*, Rapport, Laboratoire de mécanique des fluides et de génie civil, Université du Havre, 42 p.

[Marcoux, G., 2008] *Développement d'indices pour l'évaluation de l'impact d'un rejet sur une eau naturelle*, Mémoire de maîtrise en environnement, Université de Sherbrooke, 191 p.

[Ménard, E., 2003] *Guide pour l'élaboration d'un programme de surveillance et de suivi environnemental appliqué aux activités de dragage et de gestion des sédiments*, Mémoire de maîtrise en environnement, Université de Sherbrooke, 75 p.

[MEQ, 2002] *Guide de valorisation des matières résiduelles inorganiques non dangereuses de source industrielle comme matériau de construction*, Ministère de l'Environnement du Québec, Direction des politiques du secteur industriel, Service des matières résiduelles, 47 p.

[NF P 94-066, 1992] *Sols : reconnaissance et essais. Coefficient de fragmentabilité des matériaux rocheux*, Norme française, 7 p.

[NF P 94-067, 1992] *Sols : reconnaissance et essais. Coefficient de dégradabilité des matériaux rocheux*. Norme française, 7 p.

[NF P 18-572, 1990] *Granulats Essai micro-Deval*. Norme française, 6 p.

[NF P 18-573, 1990] *Granulats Essai Los Angeles*. Norme française, 5 p.

[Otten, C.J., P. Bakker, M. Meijer, 2006] *Reduction of hurricane impact by re-creation of marshlands and barrier islands*, Terra et Aqua, numéro 105, (20-31).

[PREDIS, 2006] *Guide technique régional relatif à la méthodologie de gestion des sédiments de dragage portuaire*, Plan régional d'élimination des déchets industriels spéciaux. Démarche PREDIS Nord-Pas-de-Calais.

[Savard, J., 2006] *Impact du climat sur l'érosion des berges dans le golfe du Saint-Laurent : La gestion de l'incertitude* [En ligne]. <http://www.ouranos.ca/doc/ia/Corina%20Rosu.pdf> Consulté le 07/2007.

[Tremblay, H., 1998] *Amélioration mécanique et prédiction de la compressibilité des sols fins au Québec*, Thèse de doctorat, département génie civil, Université Laval, Québec, 220 p.

[Wareham, D.G., J.R. Mackechnie, 2006] *Solidification of New Zealand harbor sediments using cementitious materials*. Journal of Materials in Civil Engineering, volume 18, numéro 2, (311-315).

[Zhu, W., C. Zhang, Y. Gao, Z. Fan, 2005] *Fundamental mechanical properties of solidified dredged marine sediment*, Zhejiang Daxue Xuebao (Gongxue Ban)/Journal of Zhejiang University (Engineering Science), volume 39, numéro 10, (1561-1565).