



HAL
open science

Caractérisation géotechnique des sédiments de dragage marins en vue de leur valorisation en techniques routières

Farouk Ben Abdelghani, Walid Maherezi, Mohamed Boutouil

► **To cite this version:**

Farouk Ben Abdelghani, Walid Maherezi, Mohamed Boutouil. Caractérisation géotechnique des sédiments de dragage marins en vue de leur valorisation en techniques routières. *Environnement, Ingénierie & Développement*, 2014, N°66 - mars 2014, pp.4-13. 10.4267/dechets-sciences-techniques.269 . hal-03161736

HAL Id: hal-03161736

<https://hal.science/hal-03161736>

Submitted on 8 Mar 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Caractérisation géotechnique des sédiments de dragage marins en vue de leur valorisation en techniques routières.

BEN ABDELGHANI Farouk¹ MAHEREZI Walid² et BOUTOUIL Mohamed²

¹. Institut Supérieur de Construction et de l'Urbanisme, Cherguia II, Tunis, Tunisie.

². Laboratoire de Recherche sur les Matériaux et de la Construction (LRMC) - École Supérieure des Ingénieurs et des Travaux de la Construction de Caen
1 rue Pierre et Marie Curie, 14610 Épron, France.

Auteurs/s à qui la correspondance devrait être adressée : abdelghani_74@yahoo.com

RESUME

Afin de pouvoir recevoir des navires modernes d'une taille de plus en plus importante et d'empêcher l'envasement de ports, des dragages significatifs sont constamment requis chaque année afin d'élargir et de maintenir les accès aux ports à des profondeurs suffisantes. Ces activités génèrent des volumes importants de sédiments qui, dans certains cas peuvent contenir des éléments polluants. En France, plus de 45 Mm³/an de sédiments sont dragués annuellement. Les sédiments sont généralement relargés en mer mais, vu les coûts et les réglementations de plus en plus restrictives, de nouvelles filières de gestion des sédiments doivent être appréhendées qui visent à trouver des solutions innovantes, économiques, environnementales et durables quant aux pratiques de gestion des sédiments de dragage.

Dans cet article, les résultats des essais au laboratoire sont présentés et discutés. Ces essais permettent de caractériser les différents sédiments d'un point de vue physique et géotechnique. Les résultats obtenus montrent que les sédiments, malgré leur même origine, présentent des caractéristiques différentes. À la lumière de ces résultats et en se basant sur le guide français GTR, une classification des différents sédiments étudiés est établie. Cette classification nous a permis d'identifier le type et le dosage de produits de traitement à adopter.

MOTS-CLÉS : sédiments de dragage, valorisation, traitement, caractérisation géotechnique, techniques routières.

ABSTRACT

In order to receive modern ships with more important size and to avoid different harbours entry siltation, significantly dredging operations are constantly required every year. These ports activity generate a great quantity of dredged marine sediments. In France, this quantity exceeds 45 Mm³/an. Immersion is usually adopted with respect to the national and international regulations. However, marine sediment management is facing legal, financial, technical and social difficulties that need innovative, economical and sustainable solutions and more restrictive environmental regulations.

This paper presents and discusses the first results of physical and geotechnical characterization of sediments sampled from different French ports. Knowing that the variability of the sediments characteristics is one of the limits to their reuse in geotechnical applications, the results will be presented and put in prospect towards this variability and the reuse of sediment as a subgrade layer.

The different sediments are classified from a geotechnical point of view and treated with hydraulic binders. Even if the sediments belong to the same geotechnical class, they show different responses in terms of mechanical behavior and in particular, swelling and tensile strength.

KEYWORDS: dredged sediments, valorization, treatment, geotechnical characterization, road construction.

Caractérisation géotechnique des sédiments de dragage marins en vue de leur valorisation en techniques routières.

BEN ABDELGHANI Farouk, MAHEREZI Walid et BOUTOUIL Mohamed

I. Introduction

Les opérations de dragage sont confrontées ainsi à plusieurs difficultés d'ordre juridique (réglementation et procédure de plus en plus complexe), financier (coût de dragage et de traitement), environnemental (seuils de contamination de plus en plus draconiens, impact environnemental), technique et scientifique (traitement et filière de valorisation) ainsi que social (vives oppositions contre l'immersion et dépôt à terre). Ainsi, le fonctionnement même de plusieurs ports peut être mis en péril. Plusieurs recherches se sont orientées vers de nouvelles filières de valorisation des sédiments de dragage, plus particulièrement en matériaux routiers et matériaux de construction (Boutouil, 1998 ; Colin, 2003 ; Dubois, 2006 ; Semcha, 2006 ; Levacher et al., 2006 ; Thanh, 2009 ; Katsiri et al., 2009). Dès lors les sédiments de dragage sont considérés comme matériau fin, leur valorisation dépendra des objectifs à atteindre.

Tableau I. Différents domaines de valorisation des sédiments de dragage (tiré de LEVACHER et al., 2006).

Objectif	Application et domaine concerné
Pelletabilité du produit en cours de stabilisation/solidification.	Transport et mise en décharge (matériau fin contaminé), mise en dépôt pour stockage.
Mise en dépôt : remplissage de carrières, de cavités souterraines.	Matériau de remplissage, de comblement.
Réalisation de remblai sans surcharge.	Consolidation sous poids propre, zones aménagées.
Remblais avec surcharge.	Matériau de terre-pleins et de plateformes industriels.
Valorisation en techniques routières.	Matériau de sous-couches routières.
Valorisation en matériaux élaborés.	Matériaux de construction (briques, tuiles).

En général, les filières de traitement des sédiments de dragage dépendent de multiples critères indissociables, à savoir des critères économiques (coût économique acceptable), des critères techniques (meilleure technique disponible), des critères environnementaux (meilleure pratique environnementale), et des critères réglementaires (conformité réglementaire).

Les filières actuelles les plus répandues sont le dépôt à terre et l'immersion en mer pour essentiellement les dragages maritimes du fait de la simplicité de des procédés techniques utilisés (Levacher et al., 2006).

Le tableau I montre les différentes applications et domaines possibles de valorisation des sédiments de dragage en fonction des objectifs à atteindre. Aussi, plusieurs projets de recherche incluant plusieurs partenaires ont été initiés dans la perspective de trouver des solutions innovatrices, économiques, durables et qui respectent les nouvelles réglementations environnementales quant à la gestion et traitement des sédiments de dragage. Parmi ces projets, on peut citer le projet européen SETARMS (www.SETARMS.org).

Dans cette étude, la filière de traitement des sédiments inclut leur valorisation. Alors, le matériau passe d'un simple déchet à éliminer à une ressource naturelle à valoriser. Afin de pouvoir valoriser les sédiments de dragage en techniques routières, plus particulièrement en couche de forme, le nouveau matériau devra répondre à certains critères bien spécifiques, plus précisément en termes de résistance mécanique, de durabilité et d'impact environnemental. Ainsi, un certain traitement des sédiments de dragage bruts serait nécessaire. Les différents modes de traitement sont choisis en fonction de chaque type de sédiment afin d'optimiser au mieux son comportement. Le choix du mode de traitement, donc du type d'ajout [ciment, chaux, cendres volantes, etc.], dépend des caractéristiques intrinsèques du matériau à traiter et des objectifs à atteindre. L'organigramme de la Figure 1 montre la démarche méthodologique adaptée dans le cadre de la présente étude.

Toute démarche de valorisation nécessite au préalable une étape expérimentale qui consiste à déterminer les différentes caractéristiques des sédiments de dragage. Il est ainsi indispensable avant tout démarrage de travaux de recherche d'avoir une idée des caractéristiques des sédiments en présence et des problèmes qu'ils risquent de poser. Une bonne connaissance des sédiments permet d'évaluer l'intérêt du traitement des sédiments, de déterminer le type d'agent de traitement à utiliser et d'avoir une première idée de la quantité d'agent de traitement à utiliser. Afin d'atteindre l'objectif de valorisation visé, une première caractérisation des sédiments est réalisée en vue d'un traitement aux liants hydrauliques. Cette étape s'avère nécessaire et indispensable. C'est cette phase qui est abordée dans le présent article. Elle aboutit à une

première classification de huit sédiments marins basée sur le Guide technique des Terrassements Routiers – réalisation des remblais et couche de forme (GTR) (LCPC-SETRA, 1992). Sept d'entre eux, du A001 au G001, ont été étudiés au laboratoire de l'ESITC Caen. La classe GTR attribuée à un matériau renseigne sur le comportement géotechnique auquel il répond sur le terrain, principalement face aux variations des

conditions hydriques de l'environnement, avant tout traitement. À partir de cette classification, l'étude s'oriente vers une phase d'évaluation de l'aptitude des sédiments à être traités par des liants hydrauliques, complétée ensuite par une étude de formulation pour atteindre des performances optimisées. Ces approches feront l'objet d'autres rapports techniques dans le futur.

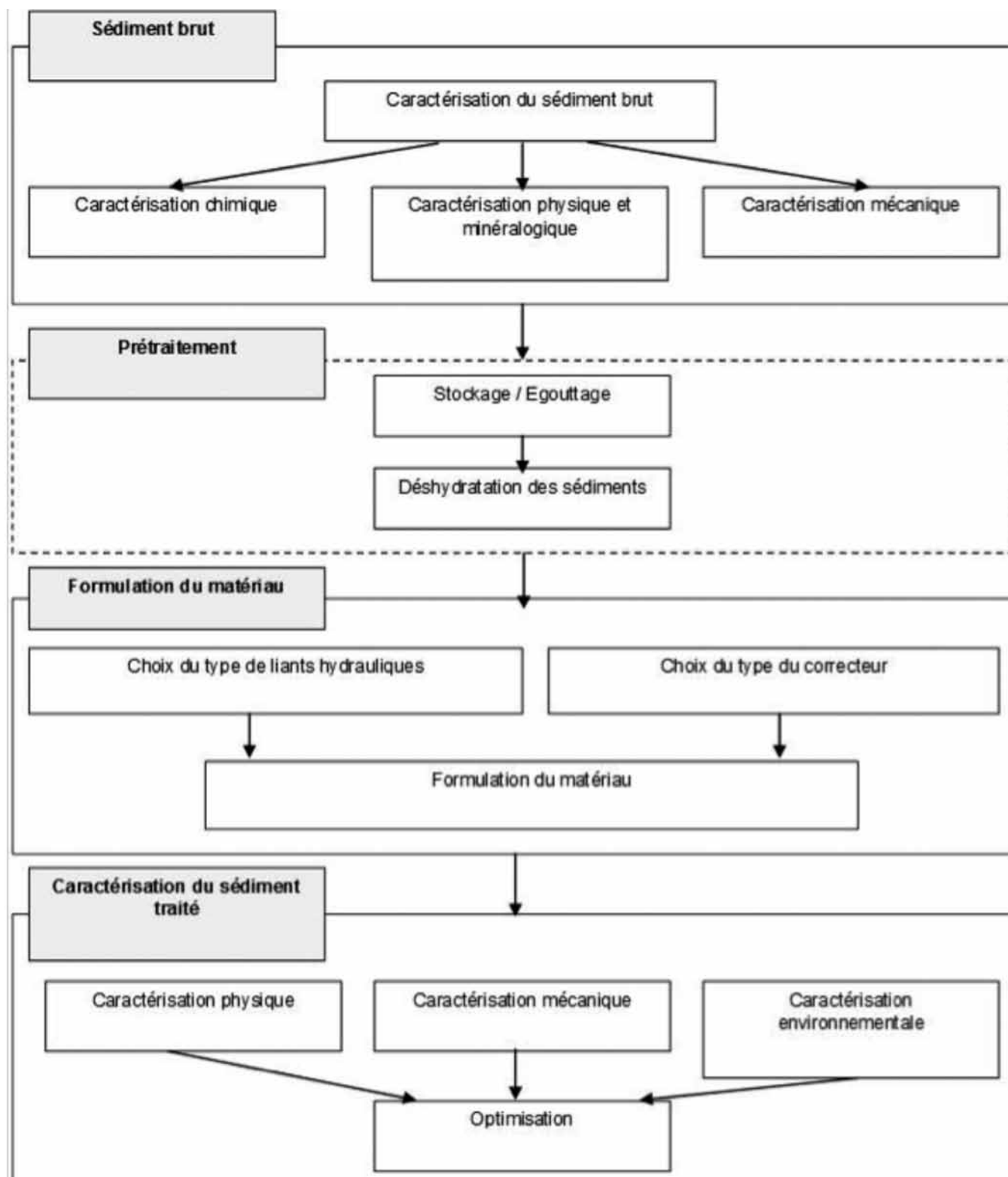


Figure 1. Approche méthodologique de valorisation des sédiments de dragage en techniques routières.

2. Sites de prélèvement

Dans le cadre du projet européen SETARMS (www.SETARMS.org), 13 ports ont été échantillonnés des deux côtés de la Manche; 8 ports français et 5 anglais, entre ports de plaisance et ports de commerce. Ils sont localisés sur la carte de la Figure 2. La période de prélèvement s'étale entre mars 2010 et juin 2011. Différentes méthodes d'échantillonnage ont été utilisées, à savoir par benne, par plongeurs ou par drague aspiratrice.

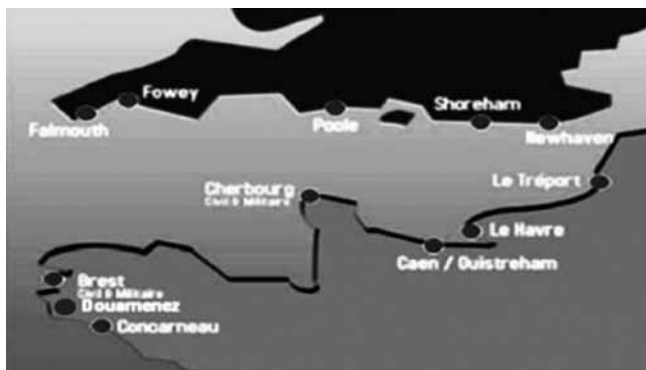


Figure 2. Localisation géographique des différents ports d'étude (projet européen SETARMS).

3. Préparation des sédiments

Avant de réaliser les essais au laboratoire afin de caractériser les sédiments de dragage, un prétraitement est nécessaire. Ce prétraitement consiste principalement en un criblage

(0/20 mm), enlever toute impureté ou corps étranger et aussi une déshydratation. Vu la grande teneur en eau initiale, les sédiments sont séchés à l'air libre ou en utilisant un géotextile, puis ils sont placés dans une étuve à 40 °C. Après un concassage et une homogénéisation de la teneur en eau à l'aide d'un batteur/malaxeur, les sédiments sont ainsi prêts à être utilisés et caractérisés. Les différents paramètres qui ont été caractérisés sont de trois types :

1. Les paramètres de nature comprenant principalement la granularité, l'argilosité et la présence de constituants chimiques particuliers (des éléments perturbateurs).
2. Les paramètres d'état des sols, principalement la teneur en eau. L'état hydrique conditionne le choix de l'agent de traitement le mieux adapté et des dosages nécessaires à appliquer.
3. Les paramètres de comportement. Il s'agit de paramètres permettant d'appréhender les difficultés de malaxage.

Les différents essais physiques, géotechniques et mécaniques réalisés permettent de classer les différents sédiments selon les guides techniques français GTR (1992) et GTS (2000). Le guide des terrassements routiers permet de comparer les propriétés des sédiments de dragage aux différents matériaux et sols de référence mentionnés dans le guide. À la lumière de cette classification et en se référant au guide de traitement des sols à la chaux et aux liants hydrauliques, le mode de traitement ainsi que les différents pourcentages à adopter sont déterminés. Le tableau 2 résume les différents paramètres physico-mécaniques qui ont été déterminés ainsi qu'une description sommaire de la norme qui a été utilisée.

Tableau 2. Différents types d'essais réalisés sur des sédiments bruts.

Type de caractérisation	Type d'essai	Norme	Protocole
Physique	Teneur en eau pondérale	XP P94-047	Etuvage à 50° C jusqu'à stabilisation de la masse.
	Granulométrie (tamisage par voie humide)	XP P94-041	Séparation des fractions granulaires par lavage à travers des tamis de diamètres différents.
	Granulométrie (par sédimentation)	NF P94-057	Mesure de la densité d'une solution contenant la fraction 0/80 µm en fonction du temps (principe de la loi de Stokes).
	Valeur au bleu	Valeur au bleu	Mesurer par dosage la quantité de bleu de méthylène qui peut être adsorbée par l'échantillon.
	Limites d'Atterberg	NF P94-051	Recherche des teneurs en eau correspondant au changement d'état du sédiment.
	Teneur en matière organique	NF P94-050	Calcination à 450-500 °C de la fraction 0/2 mm pendant 3 h
Mécanique	Essai Proctor (compactage)	NF P94-093	déterminer la teneur en eau et la densité sèche optimales.
	Essai IPI	NF P94-078	Mesurer de l'indice de portance immédiat.

Tableau 3. Valeurs minimales, maximales et moyennes des teneurs en eau des sédiments bruts.

Échantillon	Minimum (%)	Maximum (%)	Moyenne (%)
A001	115	116	115
B001	66	73	70
C001	170	333	230
D001	93	104	99
E001	167	210	188
F001	233	236	235
G001	76	109	97

4. Résultats et discussion

4.1 Caractéristiques physiques

4.1.1 Teneur en eau

La teneur en eau définit l'état hydrique d'un matériau. Afin de déterminer les teneurs en eau des différents sédiments, des prélèvements sur trois profondeurs ont été effectués (à la surface, au milieu et au fond des fûts de conservation), et pour chaque profondeur trois mesures ont été effectuées. La mesure de la teneur en eau a été réalisée par un séchage à une température de 40°C (pendant 144 h). Cette température permet d'éviter de modifier la structure des sédiments, en particulier celle de la matière organique (M.O.). Dubois (2006) et Thanh (2009) ont montré qu'un séchage à une température plus élevée peut causer une perte de l'eau liée. Les résultats obtenus des teneurs en eau (valeurs minimales, maximales et moyennes) sont reportés dans le Tableau 3. Étant donnée l'origine des sédiments (prélèvement en milieu marin), la teneur en eau initiale est très élevée et peut dépasser 100 % voire même atteindre 200 %. Les valeurs moyennes varient entre 70 % (pour le B001) et 235 % (pour le F001). Les valeurs de teneur en eau sont influencées par la profondeur du prélèvement, le mode de dragage (benne, plongeur, drague aspiratrice) et la nature des sédiments (leur capacité de rétention d'eau est fonction, par exemple, des teneurs en fines et en M.O.). Ceci peut aussi avoir une influence sur l'écart entre les teneurs en eau minimales et maximales. La teneur en eau est un paramètre important quant à la poursuite de la démarche de traitement et de valorisation des sédiments en couche de forme. Ainsi, et afin de pouvoir travailler avec les sédiments, une certaine déshydratation est nécessaire pour diminuer cette teneur en eau.

4.1.2 Teneur en matière organique

En géotechnique, la matière organique présente des caractéristiques indésirables en techniques routières à cause de leur structure spongieuse, meuble et surtout la faible résistance

mécanique de leurs constituants. Elle est considérée comme un facteur d'influence du comportement d'un sol face aux variations de teneur en eau. En effet, sa capacité de rétention d'eau est importante, ce qui peut générer des phénomènes de retrait et de gonflement préjudiciable à la stabilité d'un sol. Par ailleurs, le guide français, le GTS préconise ainsi une teneur en M.O. maximale de 1 % pour l'application d'un traitement aux liants hydrauliques en vue d'une valorisation en couches de forme (LCPC-SETRA, 2000).

La détermination de la teneur en M.O a été réalisée sur la fraction 0/2 mm par calcination à une température de 450°C pendant trois heures. Cette teneur en matière organique exprime la perte de masse par rapport à la matière sèche initiale. Les résultats obtenus sont reportés dans le Tableau 4. Chaque valeur représente la moyenne de cinq mesures. Le tableau 4 montre que les sédiments ont des teneurs élevées en matière organique. Les valeurs varient entre 4.8 % (pour le B001) et 14.1 % (pour le C001). Quatre des sept sédiments étudiés ont des teneurs en M.O. comprises entre 3 et 10 %, trois ont des teneurs supérieures à 10 %. Ces teneurs élevées peuvent jouer un rôle important dans le comportement mécanique et géotechnique des sédiments. La matière organique est un paramètre qui va nous permettre de classer les différents sédiments selon un premier niveau en se basant sur le guide technique GTR (1992).

Tableau 4. Valeurs minimales, maximales et moyennes des teneurs en matière organique des sédiments bruts.

Échantillon	Minimum (%)	Maximum (%)	Moyenne (%)
A001	10.20	10.40	10.20
B001	4.80	4.90	4.80
C001	13.90	14.30	14.10
D001	7.50	7.70	7.60
E001	10.60	10.80	10.70
F001	11.10	11.70	11.30
G001	5.30	5.60	5.40

4.1.3 Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique permet de déterminer la distribution relative des diamètres des grains dans les sédiments. Les résultats obtenus de cette distribution granulométrique constituent les premiers paramètres afin de classer les sédiments « par nature » selon le GTR. En effet la classification GTR dépend de la teneur en fines, c'est-à-dire du pourcentage massique de la fraction du matériau inférieure à 80 µm et de la dimension maximale des grains, le D_{max}. Dans le secteur des terrassements routiers, la teneur en fines est un paramètre important en raison de la sensibilité potentielle de cette fraction granulométrique à l'eau.

Les analyses granulométriques ont été réalisées par tamisage par voie humide pour la fraction supérieure à 80 µm et par sédimentométrie pour les éléments de dimension inférieure à 80 µm, les fines. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 5. Les coefficients d'uniformité (C_u) et de courbure (C_c) ont été calculés et sont aussi présentés. Le tableau 5 montre que les sédiments étudiés sont majoritairement sablo-limoneux, à l'exception du B001 qui est majoritairement sablo-argileux. Les teneurs en fines sont très élevées et peuvent atteindre 99 % pour le B001. En complément de la simple analyse granulométrique, le calcul des coefficients d'uniformité C_u et de courbure C_c permet d'apprécier qualitativement la forme de la courbe granulométrique. Généralement un $C_u < 2$ reflète une granulométrie uniforme ou serrée, alors qu'un $C_u > 2$ témoigne d'une granulométrie variée ou étalée. Une valeur de $C_c < 1$ indique la présence d'une importante quantité d'éléments fins. Par contre, un $C_c > 3$ renseigne sur la présence d'éléments grossiers. Ces deux extrêmes sont des indicateurs de la constitution du squelette granulaire. Lors d'une étude de formulation, ces coefficients sont en général corrigés par l'apport de correcteurs granulométriques afin d'optimiser la compacité du matériau.

Tableau 5. Fractions granulométriques des sédiments bruts.

Échantillon	A001	B001	C001	D001	E001	F001	G001
% < 2 µm (fraction argileuse)	7.30	20.20	10.00	10.00	18.80	4.00	13.50
2 µm < % < 63 µm (fraction limoneuse)	38	67.40	35.70	40.50	71.10	24	73.10
63 µm > % (fraction sableuse)	54.70	12.40	54.30	49.50	4.40	71	11.90
Teneur en fines (% < 80 µm)	92	99	83	87	77.60	76	74.70
Cu	2.20	30	1.00	4.11	82.80	9.00	47.60
Cc	1.01	2.0	40	1.42	0.80	15	0.45

C_u : coefficient d'uniformité = D_{60}/D_{10}

C_c : coefficient de courbure = $(D_{30})^2/(D_{10})(D_{60})$

D_{60} = diamètre des grains (en mm) correspondant à 60 % de passant en poids

D_{10} = diamètre des grains (en mm) correspondant à 10 % de passant en poids

D_{30} = diamètre des grains (en mm) correspondant à 30 % de passant en poids

D'après les résultats obtenus dans le tableau 5, pour les sédiments A001, C001 et D001, le C_u se situe entre 1 et 4, ce qui reflète une granulométrie peu étalée. Par contre, pour le B001, E001, G001 et F001, les valeurs de Cu sont plus élevées, ce qui indique une granulométrie plus étalée. Les valeurs du coefficient de courbure sont assez variables et sont comprises entre 1 et 2 pour les sédiments A001, B001 et D001, alors qu'elles sont plus élevées pour le F001 et surtout C001, res-

pectivement à des valeurs de 15 et 40. Ceci implique que ces derniers sédiments contiennent plus d'éléments grossiers.

4.1.4 Limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg (ou limites de consistance) sont les teneurs en eau de référence qui correspondent aux changements d'état des sédiments. Lorsque la teneur en eau augmente, le sol passe graduellement d'un matériau fragile à un matériau plastique, puis à un liquide visqueux, ce qui influence le comportement mécanique du sol. Ainsi, les limites d'Atterberg correspondent à la limite de liquidité (LL : teneur en eau d'un sol remanié au point de transition entre l'état liquide et plastique) ; la limite de plasticité (LP : teneur en eau d'un sol remanié au point de transition entre l'état plastique et solide) et l'indice de plasticité (I_p : c'est la gamme des teneurs en eau pour lesquelles le sol a un comportement plastique). Cet indice est calculé par la différence entre les limites de liquidité et de plasticité. Il est aussi utilisé afin de classer les sédiments selon l'abaque de plasticité de Casagrande.

Les résultats obtenus des limites d'Atterberg des différents sédiments étudiés sont donnés dans le Tableau 6. Ce tableau montre que l'indice de plasticité est supérieur à 12 pour

l'ensemble des sédiments. À l'exception du B001 et du C001, l'indice de plasticité est supérieur ou égal à 23, ce qui marque un large domaine de plasticité. Aussi, plus la valeur de l'indice de plasticité est élevée, plus le choix de la chaux pour le traitement s'impose.

Les limites d'Atterberg peuvent être influencées par la nature des argiles présentes dans le sédiment ou par la teneur en matière organique. En effet, la présence d'argiles de type smectite

peut induire une diminution de la limite de liquidité. La présence de la matière organique aurait quant à elle tendance à retenir de l'eau, donnant au matériau une plage de plasticité plus grande (Dubois, 2006).

Les variations des limites d'Atterberg peuvent être influencées par la teneur en certains éléments ou la teneur en matière organique. En effet, la présence des ions Na^+ et K^+ entre les feuillets d'argile (de type smectite) peut réduire les distances inter-réticulaires, ce qui peut induire une diminution de la limite de liquidité. Par contre, la présence de la matière organique, qui aurait tendance à retenir de l'eau, donne au matériau une plage de plasticité plus grande.

L'activité argileuse (A) est définie par le rapport entre l'indice de plasticité I_p et le pourcentage d'argiles (cf. Tableau 6). À l'exception du sédiment B001, toutes les valeurs obtenues de l'activité argileuse sont supérieures à 1.25 indiquant que les argiles sont actives. Des risques d'instabilité volumique (retrait et gonflement) sont ainsi à craindre.

4.1.5. Valeur au bleu de méthylène

La valeur au bleu de méthylène (VBS) est une mesure de l'argilosité. L'essai repose sur le phénomène d'adsorption particulier aux argiles. La valeur au bleu représentant la quantité maximale de bleu de méthylène pouvant être adsorbée par la fraction argileuse ($< 2\mu\text{m}$) de la fraction 0/5 mm du sédiment en suspension dans l'eau. Les résultats obtenus sont récapitulés dans le Tableau 7. Toutes les valeurs obtenues de VBS sont supérieures à 0.1, ce qui indique que tous les sédiments sont sensibles à l'eau. Les valeurs les plus élevées sont obtenues pour les sédiments A001 et F001 alors que la valeur la plus

faible correspond au sédiment G001. Pour le sédiment A001, la VBS est supérieure à 3, ceci indique que ce dernier n'est pas utilisable à l'état brut en couche de forme.

4.1.6. Masse volumique absolue

Les masses volumiques absolues (masses volumiques des grains du sédiment) ont été mesurées sur des échantillons séchés à 40°C et broyés finement. Les résultats, récapitulés dans le Tableau 8, montrent que les valeurs obtenues varient entre 2.3 et 2.7 g/cm^3 .

4.2 Caractéristiques mécaniques

4.2.1 Essais de compactage

L'aptitude au compactage des sédiments bruts est étudiée à l'aide de l'essai Proctor normal. Cet essai consiste à compacter le matériau à différentes teneurs en eau avec une énergie donnée. Pour chaque teneur en eau w , on détermine la masse volumique sèche ρ_d du matériau. Les caractéristiques de compactage sont déterminées à partir du maximum de la courbe $\rho_d = f(w)$. Ce maximum (w_{OPN} ; ρ_{dOPN}) est l'optimum Proctor normal. Ces paramètres sont importants et renseignent sur les conditions de travail sur le chantier.

L'indice de portance immédiat (IPI) est un paramètre qui permet d'évaluer la résistance au poinçonnement d'un matériau après compactage c'est-à-dire sa capacité à supporter de fortes charges telle que la circulation des engins de chantier.

Les Figures 3 et 4 montrent les résultats obtenus des courbes Proctor-IPI pour tous les sédiments étudiés. Les courbes Proctor normal représentent les variations de la masse

Tableau 6. Limites d'Atterberg des sédiments bruts.

Échantillon	A001	B001	C001	D001	E001	F001	G001
LL (%)	100	36	70	94	119	130	57
LP (%)	38	21	50	50	53	60	34
I_p	62	15	20	44	67	70	23
Activité argileuse A	8.5	0.7	2.0	4.4	3.5	17.5	1.7

Tableau 7. Valeurs au bleu de méthylène des sédiments bruts.

Identification	A001	B001	C001	D001	E001	F001	G001
VBS (g/100 g de matière sèche)	3.3	1.2	2.2	2.3	1.4	2.9	1.1

Tableau 8. Masses volumiques absolues des sédiments

Échantillon	A001	B001	C001	D001	E001	F001	G001
Masse volumique absolue ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	2.4	2.7	2.6	2.4	2.3	2.4	2.7

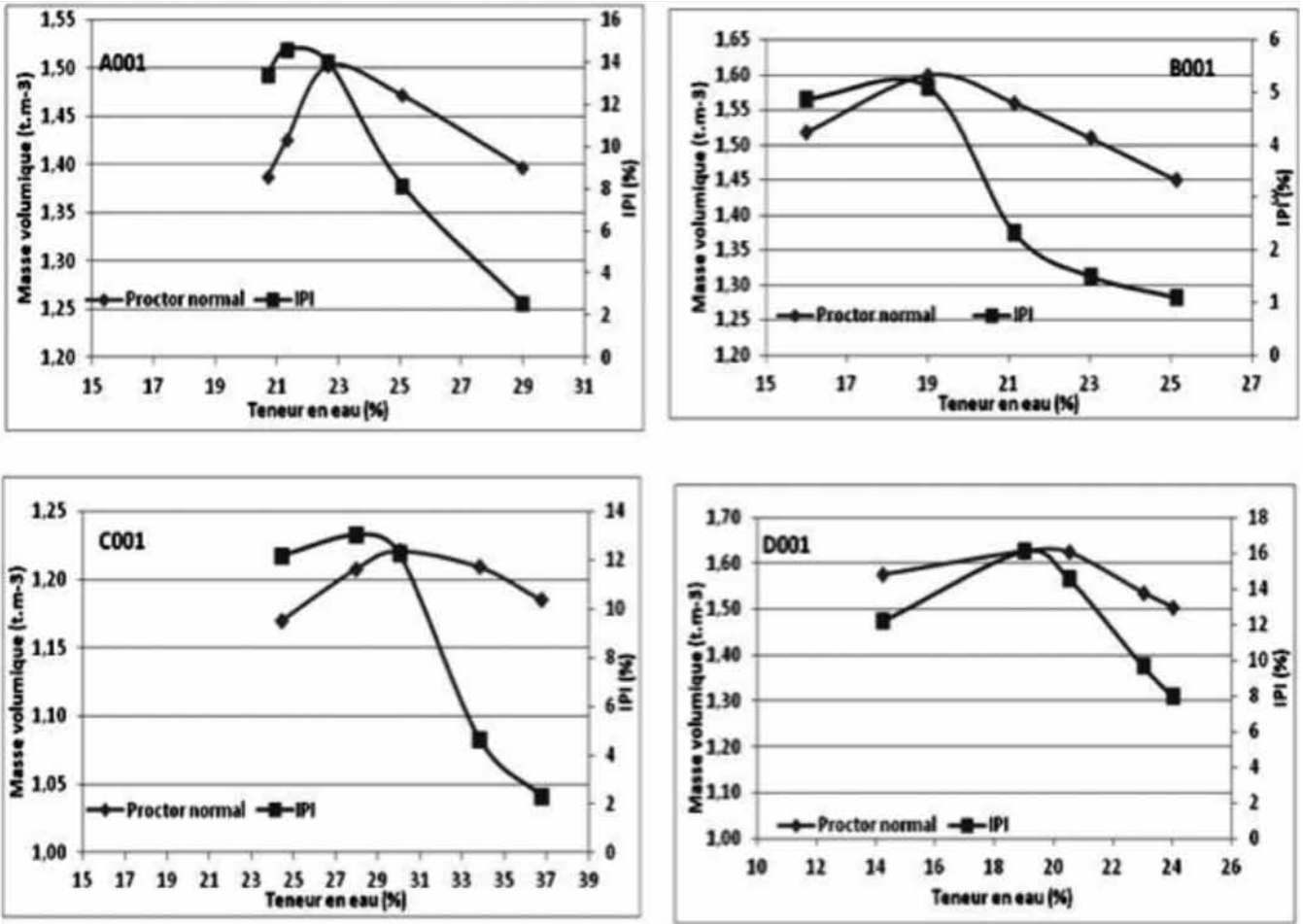


Figure 3. Courbes Proctor-IPI des sédiments A001, B001, C001 et D001.

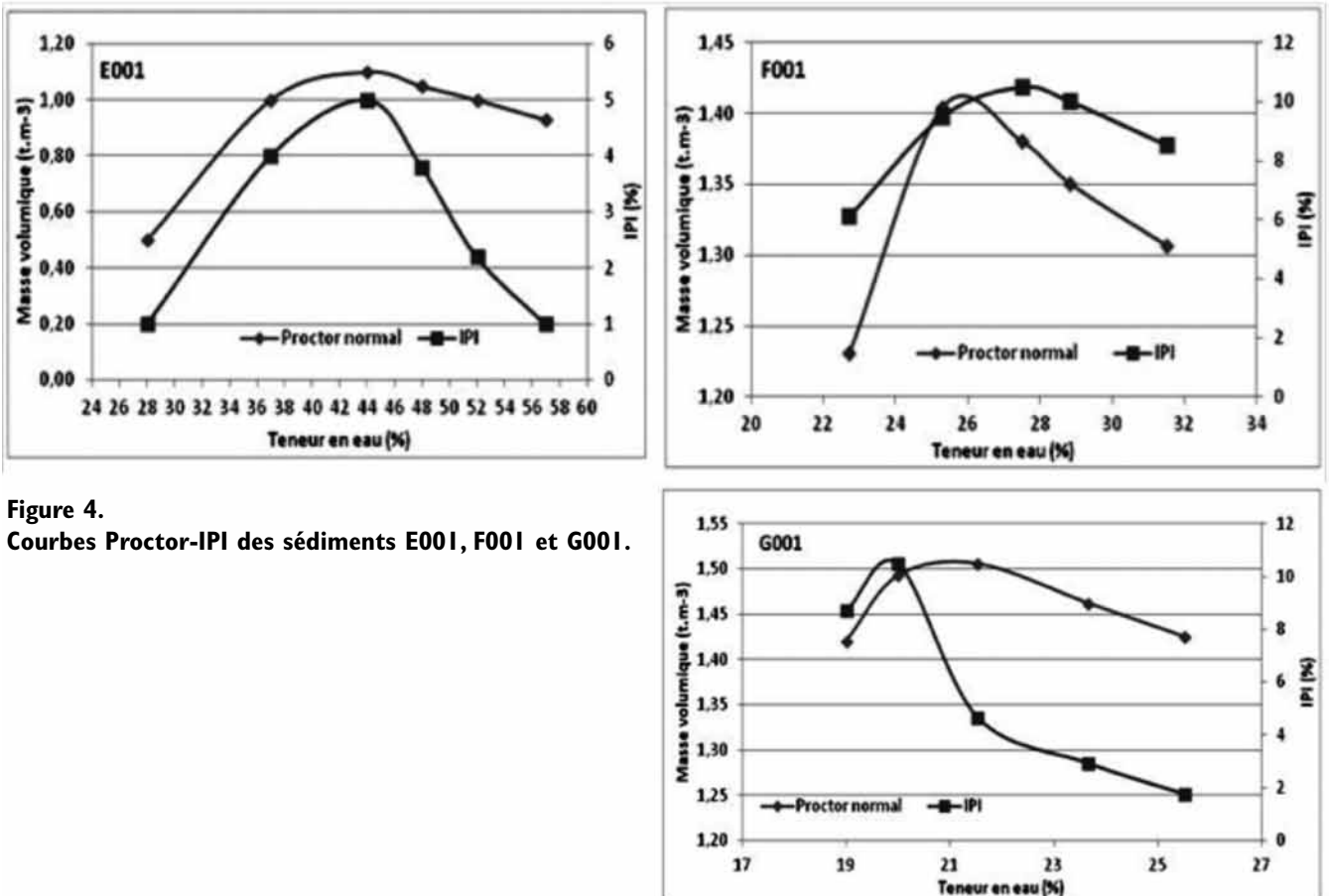


Figure 4. Courbes Proctor-IPI des sédiments E001, F001 et G001.

volumique sèche ρ_d en fonction de la teneur en eau, alors que les courbes IPI représentent les variations de l'IPI (poinçonnement) en fonction de la teneur en eau. On peut noter une augmentation de l'IPI en fonction de la teneur en eau jusqu'à l'optimum puis une diminution et que cette diminution est plus importante après l'optimum. Ceci implique plus de difficultés de circulation des engins sur le chantier.

Les valeurs des masses volumiques sèches et des teneurs en eau optimales et d'IPI à l'optimum Proctor normal de l'ensemble des sédiments sont reportées dans le Tableau 9. Ce tableau montre que les masses volumiques sèches optimales varient entre 1.10 et 1.62 t.m⁻³ pour des teneurs en eau optimales comprises entre 19 et 44 %. D'une manière générale, on observe une diminution de la masse volumique sèche optimale pour une augmentation de la teneur en eau optimale (w_{OPN}). Les valeurs de l'IPI à la teneur en eau optimale varient entre 4.7 (pour le G001) et 14 (pour le A001). La valeur la plus élevée est obtenue pour le sédiment D001 (IPI = 16), ce qui permet de dire que ce dernier se caractérise par une meilleure résistance au poinçonnement et donc possède une meilleure aptitude à résister au passage des engins après son compactage à l'optimum Proctor normal.

Tableau 9.
Caractéristiques de compactage des sédiments bruts.

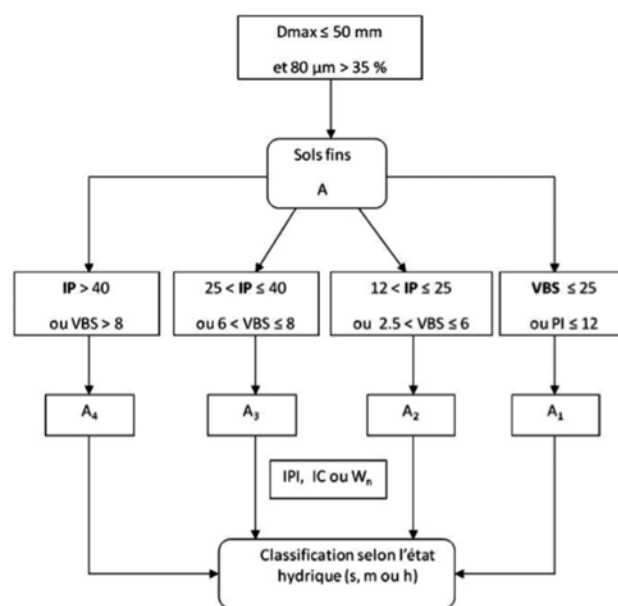
Échantillon	w_{OPN} (%)	ρ_{dOPN} (t.m ⁻³)	IPI à w_{OPN}
A001	23.0	1.5	14.0
B001	19.0	1.58	5.0
C001	30.0	1.22	12.5
D001	19.0	1.62	16.5
E001	44.0	1.1	5.0
F001	25.0	1.42	9.5
G001	21.5	1.5	4.7

4.2.2 Classification GTR des sédiments bruts

Pour utiliser un matériau en techniques routières, il est nécessaire de bien connaître ses propriétés physiques afin de l'associer à une classe-type de matériaux répertoriés dans les guides techniques de terrassement routier et de traitement de sols (GTR et GTS). Les sédiments étudiés sont ainsi classés selon leur teneur en matière organique, leur granulométrie, leur fraction argileuse et leur teneur en eau (et leur comportement face aux variations de cette dernière). La démarche de classification est expliquée au travers de l'organigramme de la Figure 4. Les termes en gras correspondent aux critères prioritaires à adopter. En se basant sur le D_{max} et le pourcentage des fines, tous les sédiments analysés sont considérés comme des matériaux fins, appartenant à la classe A. Ensuite et dépendant du paramètre prioritaire, quatre sous-classes peuvent être définies, A1, A2, A3 et A4. Enfin, une classification selon

un deuxième niveau définit l'état hydrique et la sensibilité des sédiments à l'eau (sec, modéré ou humide).

Le Tableau 10 récapitule les différents paramètres utilisés afin de classer les sédiments de dragage selon le GTR. Ainsi, en se basant sur leur teneur en M.O., les sédiments C001, E001 et F001 sont classés comme fortement organiques (classe F_{12}) et les sédiments A001, B001, D001 et G001 faiblement organiques (classe F_{11}). Du point de vue de la granulométrie, tous les sédiments se classent comme des sols fins, assimilés à la classe A définie par des matériaux dont le D_{max} est inférieur à 50 mm et dont la proportion de fines (passant à 80 μ m) est supérieure à 35 %.



Méthodologie de classification GTR (LCPC-SETRA, 1992)

Les paramètres de classification, l'activité argileuse (VBS) et l'indice de plasticité (Ip) définissent les sédiments A001 et F001 comme appartenant à la classe A2 (sables fins argileux, limons, argiles et marnes peu plastiques). Les cinq autres sédiments sont classés en A1 (limons peu plastiques, silts alluvionnaires, sables fins peu plastiques).

L'indice de portance immédiat à la teneur en eau optimale est utilisé pour caractériser la sensibilité des sédiments aux variations de teneur en eau. Ainsi, le sédiment A001 présente un état hydrique sec (s), les sédiments C001, D001 et F001 ont un état hydrique modéré (m) et les sédiments B001, E001 et G001 ont un état hydrique humide (h). D'après les prescriptions du GTR, ces matériaux (les sédiments bruts) ne peuvent pas être utilisés à leur état brut en techniques routières, plus particulièrement en couche de forme. Pour améliorer leurs propriétés mécaniques, une modification de l'état hydrique préalable (drainage/humidification) et un traitement à la chaux et/ou aux liants hydrauliques sont recommandés. Le GTS 2000 est un support pour définir le type de traitement adapté. Ceci constitue l'objet de la prochaine étape de cette présente étude.

Tableau 10. Classification GTR des sédiments bruts.

Paramètre de classification	A00 I	B00 I	C00 I	D00 I	E00 I	F00 I	G00 I
M.O (%)	F ₁₁	F ₁₁	F ₁₂	F ₁₁	F ₁₂	F ₁₂	F ₁₁
D _{max} , % < 80 µm	A	A	A	A	A	A	A
I _p ou VBS	A2	A1	A1	A1	A1	A2	A1
I _p , I _c ou W _n	A2s	A1h	A1m	A1m	A1h	A2m	A1h
Classification GTR (GTR, LCPC - SETRA, 1992)	A2s F ₁₁	A1h F ₁₁	A1m F ₁₂	A1m F ₁₁	A1h F ₁₂	A2m F ₁₂	A1h F ₁₁

MO : matière organique

D_{max} : diamètre maximalI_p : indice de plasticité

VBS : valeur au bleu de méthylène

IPI : indice de portance immédiat

I_c : indice de consistanceW_n : teneur en eau naturelle

Conclusion

La caractérisation physique et géotechnique de différents sédiments de dragage a permis de les identifier, de déterminer leurs caractéristiques et de les classer selon le guide technique de terrassement routier (GTR, 1992). Cette première étude au laboratoire a montré que les sédiments de dragage sont des matériaux particuliers ayant une teneur en eau importante après le prélèvement, une teneur en matière organique élevée et une granulométrie fine. Trois des sept sédiments analysés sont classés fortement organiques, alors que quatre sédiments sont faiblement organiques. Cette classification propre aux sols fins (classe A) permet d'envisager une formulation de traitement à partir des prescriptions du GTS 2000. Des pourcentages de 3 % et 6 %, respectivement pour la chaux vive et le liant hydraulique (ciment CEM II 32,5R) seront utilisés pour la prochaine étape afin de déterminer l'aptitude des différents sédiments au traitement. Les résultats seront communiqués dans d'autres publications.

Références bibliographiques

BOUTOUIL M., 1998, Traitement de vases de dragage par solidification/stabilisation à base de ciment et additifs, Thèse de Doctorat, Université du Havre, France.

BOUTOUIL M. et LEVACHER D., 2000, Traitement et valorisation des vases de dragages par solidification/stabilisation : état de l'art. Colloque de Génie Civil-Génie Côtier, Caen, pp : 367-375.

BOUTOUIL M. et LEVACHER D., 2001. Étude expérimentale de la solidification d'une vase de dragage à base de ciments : évaluation de la porosité et de la structure poreuse après solidification. Materials and structures, n °3, pp :186-192.

CETMEF, 2008, Guide pour la gestion durable des déblais de dragage portuaires contaminés en France, Rapport final.

COLIN D., 2003, Valorisation des sédiments fins de dragage en technique routière, Thèse de Doctorat, Université de Caen, France.

DUAN Z., 2008, Caractérisation, stabilisation et solidification des sédiments fins marins, Thèse de Doctorat, Université de Caen, France.

DUBOISV., 2006, Etude du comportement physico-mécanique et caractérisation environnementale des sédiments marins, Thèse de Doctorat, Université d'Artois, France.

KATSIRI A., PANTAZIDOU M., DAMIKOUKA I., KONTOGIORGI CH. and TRINGALI A., 2009. Disposal options for dredged marine sediments based on physicochemical and toxicological characterization. Global Nest Journal, n°4, pp : 449-456.

LCPC-SETRA, 1992, Réalisation des remblais et des couches de forme (GTR) Guide technique. Fascicules I et II, 200 p.

LCPC-SETRA, 2000, Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques (GTS) - Application à la réalisation des remblais et des couches de forme - Guide technique, 240 p.

LEVACHER D., COLIN D., PERRONI A.C., DUAN Z. et SUN L., 2006, recyclage et valorisation de sédiments fins de dragage à usage de matériaux routiers. IX^{ème} Journées Nationales Génie Civil-Génie Côtier, Brest, France, pp : 603-612.

MILLRATH, K., KOZLOVA, S., SHIMANOVICH, S. and MEYER, C., 2001, beneficial Use of Dredged Material 2. Second Progress Report, Columbia University, New York.

REKIK B., 2007, Propriétés géotechniques des sédiments de dragage traités au ciment, Thèse de Doctorat, Université de Caen, France.

REY F., 1999, Étude physico-mécanique et environnementale du composite vase-chaux et additifs, Thèse de Doctorat, Université de Caen, France.

SEMCHA A., 2006, Valorisation des sédiments de dragage: Applications dans le BTP, cas du barrage de Fergoug, Thèse, Université de Reims, France.

SETRA-LCPC., 1992, Réalisation des remblais et des couches de forme, Guide technique, Fascicule II, Annexes techniques.

THANH, N.T., 2009, Valorisation de sédiments marins et fluviaux en technique routière, Thèse de Doctorat, Ecole des mines de Douai, France.