

Valorisation des sédiments de dragage marins dans la formulation de bétons autoplaçants "BAP" pour des applications en Travaux Maritimes

Walid MAHERZI ¹, Nassim SEBAIBI ², Mahfoud BENZERZOUR ¹,
Dang Hanh NGUYEN ^{2,3}, Nor-Edine ABRIAK ¹, Mohamed BOUTOUIL ²

1. Institut Mines - Télécom Lille Douai, LGCgE - GCE, 941 rue Charles Bourseul, 59500 Douai, France.
walid.maherzi@imt-lille-douai.fr ; mahfoud.benzerzour@imt-lille-douai.fr ; nor-edine.abriak@imt-lille-douai.fr
2. ESITC de Caen, École Supérieure d'Ingénieurs des Travaux de la Construction, COMUE-Normandie-Université, Adresse, Caen, France.
nassim.sebaibi@esitc-caen.fr; mohamed.boutouil@esitc-caen.fr
3. University of Transport and Communications; 3 Cau Giay , Dong Da, Hanoi, Vietnam.
hanhnd@utc.edu.vn

Résumé :

Cette étude a pour objectif de valoriser les sédiments de dragage marins en travaux publics maritimes, en les incorporant dans la formulation de bétons autoplaçants. Pour répondre à cet objectif, des études de formulation de mortiers autoplaçants à base de sédiments marins bruts et traités ont été menées. Une caractérisation complète à l'état frais et durci des mortiers à base de sédiments de dragage bruts et traités au ciment a été réalisée. Les résultats obtenus montrent la nécessité de traiter les sédiments de dragage marins au ciment pour obtenir un béton autoplaçant BAP de résistance à la compression supérieure à 40 MPa.

Les formulations optimisées ont été utilisées pour la fabrication d'acropodes à échelles réduites, afin de réaliser des tests de stabilité en canal à houle pour une simulation de carapace de digue à talus.

Mots-clés : Sédiment, Acropode, Canal à houle, BAP, Résistance.

1. Contexte et objectif

Les matériaux issus de l'érosion des roches et des sols sont transportés sous l'effet d'actions climatiques (vent, marées) ou d'actions humaines (travaux d'aménagement) et se déposent sous forme de sédiments dans les ports, les estuaires, les rivières, les fleuves. L'accumulation des sédiments au fond des ports empêche les activités maritimes et perturbe l'équilibre physico-chimique des masses d'eau. De ce fait, le dragage est une pratique nécessaire pour restaurer des seuils acceptables pour la

Thème 6 – Gestion durable des zones littorales et estuariennes

navigation et pour restaurer également le milieu naturel pour un bon fonctionnement des ports. Sur le plan national, l'entretien des 6500 kilomètres de côtes que compte le littoral français nécessiterait l'extraction d'environ 50 millions de m³ de sédiments marins tous les ans. Selon l'Article L541-1- II du code de l'environnement les sédiments de dragage sont considérés comme déchets dès lors qu'ils sont déposés à terre. Depuis plusieurs années, différentes pistes de valorisation comme matières premières secondaires de substitution des matériaux construction ont été prospectées : matériaux pour remblais ou sous couches routières, addition minérale pour la fabrication de cru de ciment, briques, matériaux pour digues, granulats...etc.

Cette étude a pour objectif de réaliser une étude scientifique pour la valorisation des sédiments marins en TP maritime, en les incorporant dans la formulation de béton autoplacant (BAP). En effet, les sédiments de dragage marins seront utilisés comme matière première secondaire pour la formulation de BAP, qui sera utilisé pour la fabrication d'acropodes.

2. Programme expérimental

2.1 Matériaux utilisés

2.1.1 Ciments

Le ciment utilisé pour cette étude est un ciment Portland ordinaire CEM I 52,5R CE CP2 NF de Ciments Calcia de Ranville.

2.1.2 Fillers calcaires

Les fillers calcaires sont utilisés pour améliorer l'ouvrabilité des bétons autoplacants par une correction granulométrique et pour augmenter la résistance du béton au jeune âge. Les fillers calcaires utilisés sont fournis par l'usine des Aucais (Urville – 14). Ils se présentent sous forme de poudre ocre clair.

2.1.3 Granulats

Trois types de granulats ont été utilisés à savoir, le sable 0/4 mm, gravier 2/6 mm et gravier 6/10 mm. L'analyse granulométrique est donnée dans la figure 1 et les différentes caractéristiques des granulats utilisés sont données par le tableau 1.

Avant le gâchage du béton, les granulats naturels utilisés pour la confection sont séchés en étuve à 105°C jusqu'à une masse constante.

Tableau 1. Caractéristiques physiques des granulats utilisés.

<i>Caractéristique</i>	<i>Norme</i>	<i>S 0/4 mm</i>	<i>G 2/6 mm</i>	<i>G 6/10 mm</i>
<i>Masse volumique réelle (kg/m³)</i>	<i>NF EN 1097-6</i>	2620	2571	2596
<i>Masse volumique apparente en vrac (%)</i>	<i>NF EN 1097-6</i>	1469	1343	1357
<i>Masse volumique apparente compactée (%)</i>	<i>Méthode LCP</i>	1790	1473	1476
<i>Compacité en vrac</i>	<i>NF EN 1097-3</i>	0,561	0,522	0,523
<i>Compacité mesurée par la table à secousse</i>	<i>Méthode LCP</i>	0,683	0,573	0,569
<i>Coefficient d'absorption d'eau (%)</i>	<i>NF EN 1097-6</i>	0,40	1,22	0,70

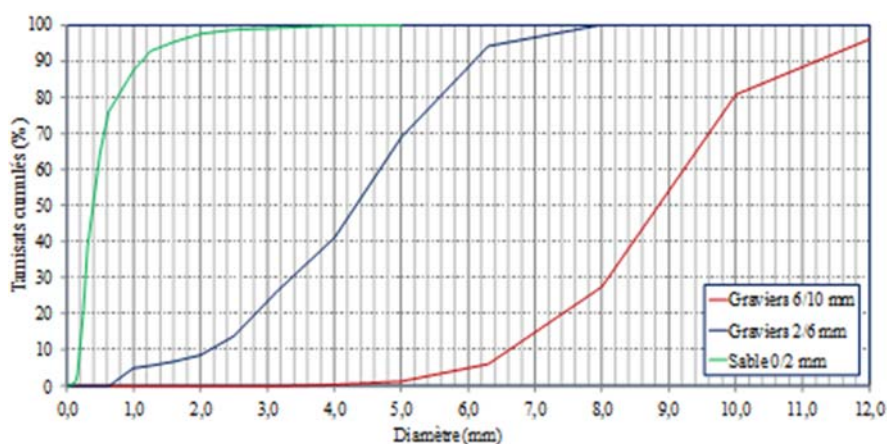


Figure 1. Analyse granulométrique de granulats.

2.1.4 Adjuvants

Un superplastifiant Master Glenium ACE 444 de BASF est utilisé pour améliorer l'ouvrabilité du béton. Dans certaines compositions, l'accélérateur de durcissement Master X SEED est ajouté pour anticiper le retard de prise du ciment dû à la présence du sédiment d'une part et d'autre part pour augmenter la résistance au jeune âge du béton.

2.2 Sédiments issus du dragage

2.2.1 Sédiments bruts non traités

Les sédiments utilisés dans cette étude ont été prélevés en 2016 dans le Grand Port Maritime de Dunkerque. Ces sédiments, de consistance liquide ($W > 100\%$)), ont été conditionnés dans des fûts hermétiques de 100L.

Les résultats de l'étude de caractérisation de sédiment brut sont présentés ci-après.

La figure 2 présente la distribution granululaire par granulométrie laser des sédiments bruts. Le tableau 2 présente les caractéristiques physiques des sédiments bruts.

D'après les résultats présentés les sédiments de dragage étudiés sont des matériaux fins (Taille moyenne des grains = 94,1 μm). Selon la classification de l'USCS, les sédiments étudiés sont assimilés à une argile très plastique ($WL = 86,8\%$ et $IP = 46,4\%$).

Thème 6 – Gestion durable des zones littorales et estuariennes

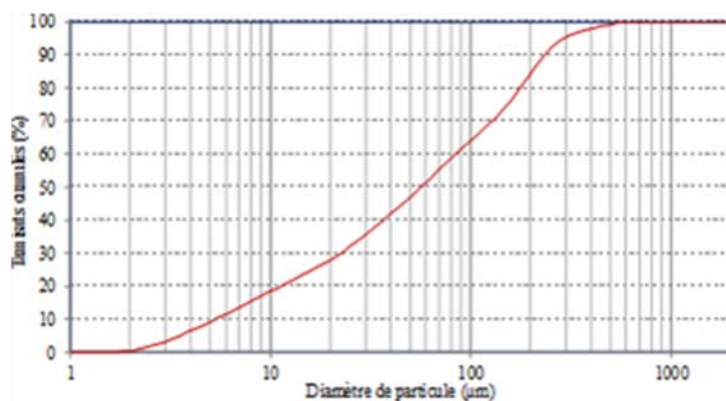


Tableau 2. Caractéristique physique du sédiment brut.

Caractéristique	Norme	Valeurs	
Masse volumique (kg/m^3)	NF EN 1097-7	2545	
Teneur en matières organiques (%)	NF P94-051	7,02	
VBs (g/100g de MS)	NF P94-068	1.18	
Limites d'Atterberg	Limite de liquidité w_L (%)	NF P94-051	86,8
	Limite de plasticité w_P (%)	NF P94-051	40,4
	Indice de plasticité I_p	NF P94-051	46,4

2.2.2 Sédiments traités

Dans le but d'obtenir un béton autoplaçant, les sédiments bruts ont été traités au ciment pour pallier les inconvénients des sédiments bruts, tels que l'effet de l'absorption à l'eau, une surface spécifique importante et une teneur en matières organiques très élevée. Les sédiments sont traités selon le procédé suivant (ACHOUR 2014) :

- Séchage des sédiments bruts jusqu'à une masse constante ;
- Concassage et homogénéisation des sédiments ;
- Mélange à sec des sédiments avec du ciment CEM I 52,5 R. Le ciment représente un taux 6% de sédiment (6% est le taux utilisé pour le traitement des sédiments en technique routière) ;
- Ajout de l'eau. La quantité de l'eau à ajouter est de 25 à 28% de la masse du sédiment ;
- Séchage en étuve à 40°C (pour accélérer le séchage).

Le sédiment traité obtenu représente : sédiment : 74,1%, ciment : 4,4% et, eau : 21,5%.

2.3 Formulation et mise en œuvre d'un composite cimentaire autoplaçant

2.3.1 *Séquences de malaxage*

Un malaxeur à pale rotative de 100 litres a été utilisé pour la réalisation des composites cimentaires à base de sédiments de dragage. Les séquences du malaxeur est comme suivant :

- Malaxage à sec l'ensemble des constituants pendant 20 s.
- Ajout d'eau pendant 40 s.
- Malaxage pendant 120 s.
- Ajout de superplastifiant pendant 30 s.
- Malaxage pendant 150 secondes.

La durée totale de malaxage est 6 minutes.

2.3.2 *Formulation du béton témoin sans sédiments*

Plusieurs formulations de BAP témoins ont été réalisées selon la méthode d'empilement granulaire (MEG) basée sur l'optimisation de la compacité granulaire du mélange (De LARRARD, 2000 ; DE LARRARD, 1988). Après optimisation du squelette granulaire, la composition finale est de 45% de sable, 18% de graviers 2/6 mm, 37% de graviers 6/10 mm. La formulation des bétons témoins est présentée dans le tableau 3.

Tableau 3. Composition du béton témoins.

<i>Constituants</i>	<i>Béton Témoin (BT)</i>
	<i>Quantité</i>
<i>Ciment (kg/m³)</i>	<i>361</i>
<i>Filler de calcaire (kg/m³)</i>	<i>120</i>
<i>Liant équivalent (kg/m³)</i>	<i>391</i>
<i>Eau efficace (kg/m³)</i>	<i>144</i>
<i>Graviers 2/6 mm (kg/m³)</i>	<i>318</i>
<i>Graviers 6/10 mm (kg/m³)</i>	<i>654</i>
<i>Sable 0/4 mm (kg/m³)</i>	<i>796</i>
<i>Superplastifiant Glenium ACE 444 (kg/m³)</i>	<i>5,8 (1,6%)</i>
<i>Accélérateur X SEED (kg/m³)</i>	<i>8,3 (2,3%)</i>
<i>E_{eff}/C</i>	<i>0,40</i>

2.3.3 *Formulation des bétons à base de sédiment traité au ciment*

Plusieurs gâchées ont été réalisées dans l'objectif d'atteindre les performances requises à l'état frais et à l'état durci à savoir ; un béton autoplaçant (BAP) et une résistance en compression à 28 jours supérieure à 40 MPa. La méthode de formulation ACI ainsi que les recommandations de l'AFGC sont utilisées pour atteindre cet objectif (ACI237 ; AFGC, 2008)

Thème 6 – Gestion durable des zones littorales et estuariennes

Les sédiments ont été traités au ciment (6% en masse de sédiments) selon le procédé présenté précédemment dans la section 2.2.2.

L'objectif de cette partie s'appuie sur un remplacement massique et partiel des granulats à des dosages de 5, 10, 15 et 20% par les sédiments traités. La quantité de ciment et fillers calcaires ont été augmentées pour améliorer l'ouvrabilité du béton.

La formulation des bétons à base de sédiments traités est présentée dans le tableau 4.

Tableau 4. Formulation des bétons à base de sédiments (BS) traités.

	BS5,0%	BS10,0%	BS15,0%	BS 20,0%
	<i>Quantité</i>			
Ciment (kg/m ³)	373	381	423	441
Filler calcaire (kg/m ³)	124	127	141	147
Liant équivalent (kg/m ³)	404	413	549	478
Eau efficace (kg/m ³)	170	210	233	242
Graviers 2/6 mm (kg/m ³)	283	249	216	194
Graviers 6/10 mm (kg/m ³)	581	512	451	399
Sable 0/4 mm (kg/m ³)	706	623	541	485
Superplastifiant Glenium ACE 444	6,0 (1,6%)	6,1 (1,6%)	6,8 (1,6%)	7,1 (1,6%)
Superplastifiant Glenium Sky 841	7,5 (2,0%)	7,6 (2%)	8,5 (2,0%)	8,8 (2,0%)
Sédiment brut (<u>traité</u>) (kg/m ³)	83	154	212	270
	(<u>112</u>)	(<u>208</u>)	(<u>328</u>)	(<u>365</u>)
Taux de sédiment/granula total	5,0	10,0	15,0	20,0
Taux de sédiment traité/granula total de BT3 (%)	6,8	13,5	20,3	27,0
Rapport $E_{efficace}/C$	0,46	0,55	0,55	0,55

2.4 Méthodes d'essais

Le tableau 5 présente le programme expérimental à l'état frais et à l'état durci (NEVILLE, 2000).

Tableau 5. Normes et méthodes d'essais.

Propriétés	Caractéristiques	Normes
Etat frais	Teneur en air occlus	NF EN12350-7
	Étalement en cône Abrams	NF EN 12350-8
	Temps attendant 50cm d'étalement	NF EN 12350-8
	Masse volumique à l'état frais	NF EN 12350-6
Etat durci	Résistance en compression à 28 jours	NF EN 12390-3
	Résistance en traction à 28 jours	NF EN 12390-6
	Masse volumique apparente sèche	NF P18-459
	Porosité accessible à l'eau	NF P18-459
	Module élastique statique	NF EN 12390-13
	Module élastique dynamique	NF EN 12504-4
	Retrait total sur éprouvette 7×7×28 cm, HR = 65%	NF P18-427

3. Résultats

L'ensemble des résultats est synthétisé dans le tableau 6. Nous pouvons conclure que les bétons à base de sédiments traités atteignent les performances souhaitées à l'état frais et à l'état durci. La résistance en compression de tous ces bétons est supérieure à 40 MPa et l'étalement de ces bétons est supérieur à 60 cm. Le temps d'écoulement à t50 est satisfaisant.

Tableau 6. Propriétés à l'état frais et durci des bétons à base de sédiments traités.

<i>Etat</i>	<i>Caractéristiques</i>	<i>BT-0,0%</i>	<i>BS5,0%</i>	<i>BS10,0%</i>	<i>BS15,0%</i>	<i>BS20,0%</i>
<i>Etat frais</i>	<i>Teneur en air (%)</i>	3,5	3,6	3,0	3,2	4,2
	<i>Etalement (cm)</i>	67,5	81	68	71	65
	<i>Temps à 50cm d'étalement (s)</i>	5,5	0,88	1,98	1,53	2,09
	<i>Masse volumique à l'état frais (kg/m³)</i>	2397	2324	2261	2222	2182
<i>Etat durci – Physique et mécanique</i>	<i>R_{c28} (MPa)</i>	74,3	59,7	50,5	45,9	44,6
	<i>R_{t28} (MPa)</i>	5,30	4,09	3,78	3,59	3,40
	<i>ρ_{apparente sèche} (kg/m³)</i>	2292	2222	2147	2088	2052
	<i>Porosité (%)</i>	11,5	14,6	16,6	19,3	20,3
	<i>E statique (GPa)</i>	43,4	36,3	30,3	26,7	22,6
	<i>E dynamique (GPa)</i>	44,8	39,7	35,3	31,7	30,4
	<i>Retrait total à 90 jours (μm/m)</i>	288	468	656	834	966
	<i>Perte de masse totale au cours de séchage (%)</i>	0,64	1,01	1,34	1,74	1,74

4. Réalisation de mini-acropode

Des acropodes à échelles réduites (figure 3) à base de sédiments de dragage ont été réalisés pour la suite de ces travaux intitulé "essai de stabilité en canal à houle" et qui a pour objectif d'étudier la stabilité des blocs artificiels pour une carapace de digue à talus.

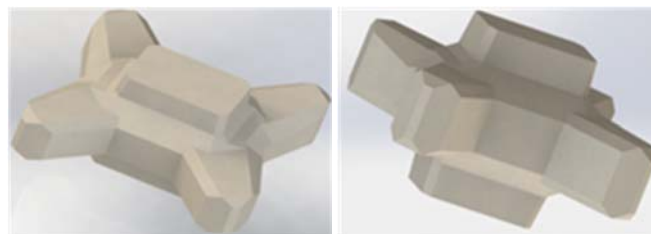


Figure 3. Forme de l'acropode

Deux types de couleurs sont choisis (jaunes et rouges) pour mieux analyser la stabilité des structures sous l'effet des houles. Le nombre total de ces acropodes avoisine les 700 pièces (50% rouges et 50% jaunes).

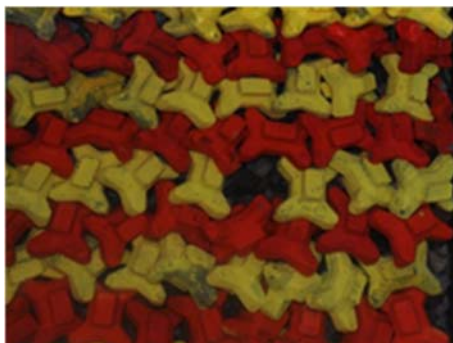


Figure 4. Mini-acropodes rouges et jaunes

5. Conclusion

L'ensemble des travaux réalisés permet de conclure que :

- Plus le dosage en sédiment augmente plus la résistance en compression et en traction baisse de 20% à 40%,
- La porosité passe de simple ou double dès lors le pourcentage en sédiments incorporés augmente. Elle est de 20% pour un dosage de 20% en sédiment contrairement à 10% pour le béton témoin,
- Le module subit la même tendance, plus le dosage en sédiments augmente plus le module E statique et dynamique baisse,
- Un constat plus maquant pour le retrait, la valeur de retrait est 3 fois plus importante pour des compositions à base de 20% en sédiments traité.

6. Références

DE LARRARD F. (1988). *Formulation et propriétés des bétons à très hautes performances*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

DE LARRARD F. (2000). *Structure granulaires et formulation des bétons*. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées – LCPC.

ACHOUR R. (2014). *Valorisation et caractérisation de la durabilité d'un matériau routier et d'un béton à base de sédiments de dragage*. Thèse de doctorat de l'Ecole des Mines Douai - Université Lille 1 - Université de Sherbrooke.

ACI. (2007). *ACI 237R-07 Self-Consolidating Concrete*, pp 1-34.

AFGC. (2008). *Recommandations pour l'emploi des bétons autoplacants*, pp 1-64.

NEVILLE A.M. (2000). *Propriétés des bétons*, Editions Eyrolles, pp1-806.