

N° d'ordre : 41584



THESE DE DOCTORAT

Présentée en vue d'obtenir le grade de

DOCTEUR

Spécialité : **Génie Civil**

par

Hassane AZRAR

DOCTORAT DELIVRE CONJOINTEMENT
PAR MINES DOUAI ET L'UNIVERSITE LILLE 1

Sujet :

**Contribution à la valorisation des sédiments de dragage
portuaire : technique routière, béton et granulats artificiels**

Soutenance le 4 décembre 2014 devant le jury d'examen :

Rapporteur	Patrice RIVARD , <i>Professeur, Université de Sherbrooke</i>
Rapporteur	Michèle T'KINT , <i>Professeur, Université de Picardie Jules Verne</i>
Examineur	Jesús CISNEROS-AGUIRRE , <i>Professeur, Université de Las Palmas</i>
Examineur	Ali ZAOUÏ , <i>Professeur, Université de Lille 1</i>
Invité	Mahfoud BENZERZOUR , <i>HDR, Mines de Douai</i>
Invité	Pascal GREGOIRE , <i>Docteur, Grand Port Maritime de Dunkerque</i>
Directeur de thèse	Nor-Edine ABRIAK , <i>Professeur, Mines de Douai</i>
Encadrant	Rachid ZENTAR , <i>Professeur, Mines de Douai</i>

Laboratoires d'accueil : Laboratoire Génie Civil et géo-Environnement (LGCgE) :
Lille – Nord de France & Génie Civil et Environnemental des Mines de Douai
Ecole Doctorale des Sciences Pour l'Ingénieur (EDSPI) 072 Lille 1

N° d'ordre : 41584



THESE DE DOCTORAT

Présentée en vue d'obtenir le grade de

DOCTEUR

Spécialité : **Génie Civil**

par

Hassane AZRAR

DOCTORAT DELIVRE CONJOINTEMENT
PAR MINES DOUAI ET L'UNIVERSITE LILLE 1

Sujet :

**Contribution à la valorisation des sédiments de dragage
portuaire : technique routière, béton et granulats artificiels**

Soutenance le 4 décembre 2014 devant le jury d'examen :

Rapporteur	Patrice RIVARD, Professeur, Université de Sherbrooke
Rapporteur	Michèle T'KINT, Professeur, Université de Picardie Jules Verne
Examineur	Jesús CISNEROS-AGUIRRE, Professeur, Université de Las Palmas
Examineur	Ali ZAOUÏ, Professeur, Université de Lille 1
Invité	Mahfoud BENZERZOUR, HDR, Mines de Douai
Invité	Pascal GREGOIRE, Docteur, Grand Port Maritime de Dunkerque
Directeur de thèse	Nor-Edine ABRIAK, Professeur, Mines de Douai
Encadrant	Rachid ZENTAR, Professeur, Mines de Douai

Laboratoires d'accueil : Laboratoire Génie Civil et géo-Environnement (LGCgE) :
Lille – Nord de France & Génie Civil et Environnemental des Mines de Douai
Ecole Doctorale des Sciences Pour l'Ingénieur (EDSPI) 072 Lille 1

Résumé

Face à la problématique de gestion des sédiments de dragage portuaire, aujourd'hui, il apparaît nécessaire de trouver des solutions potentielles de valorisation permettant de répondre efficacement à cette dernière. Afin d'optimiser la gestion de ces matériaux, il est nécessaire de déterminer leurs caractéristiques en relation avec le domaine de valorisation envisagé.

Après caractérisation physico-chimique, minéralogique et mécanique, l'impact environnemental des sédiments bruts du PSL et le potentiel d'utilisation de ces matériaux en technique routière sont évalués. Afin d'améliorer les caractéristiques mécaniques des sédiments bruts, en regard des contraintes imposées pour leurs utilisations en couche de fondation, le sable de la carrière Someca a été utilisé pour optimiser la composition granulaire du matériau.

L'étude de formulation des matériaux, pour une utilisation en couche de fondation, s'est fondée sur une méthode expérimentale de détermination de compacité maximale. Les mélanges granulaires optimaux composés de sédiments du PSL et de sable de la carrière Someca sont ensuite traités aux ciments Cibelcor et Vicat en vue d'améliorer leurs performances mécaniques. Les mélanges remplissant les conditions d'utilisation en couche de fondation sur le plan du comportement mécanique sont ensuite évalués au travers d'essais de lixiviation.

La partie qui traite les formulations des bétons s'intéresse à la valorisation des sédiments du GPMD dans des mélanges hydrauliques. A travers la phase de caractérisation de ces bétons à base de sédiments, plusieurs protocoles d'essais ont été mis en œuvre en vue de mettre en évidence la qualité de ces matériaux. Trois bétons répondant aux exigences du cahier des charges ont fait l'objet d'une étude de durabilité face à l'attaque sulfatique externe, associée à une caractérisation non destructive en vue d'étudier l'influence d'incorporation de sédiments sur les propriétés des bétons.

La partie qui traite des granulats artificiels rentre dans le cadre d'une problématique de protection contre l'érosion du littoral de la région Nord de France. L'assiette granulatrice et la technique de fabrication de granulats en Big-bag sont deux méthodologies utilisées pour la confection de granulats à base de sédiments du GPMD. Les propriétés physiques déterminées permettent d'évaluer le potentiel de valorisation de ces matériaux et de mieux orienter les futures études.

Mots-clés : sédiments de dragage portuaire, couche de fondation, valorisation, performances mécaniques, impact environnemental, lixiviation, béton, caractérisation non destructive, attaques sulfatiques externes, granulats artificiels, assiette granulatrice, technique de fabrication de granulats en Big-bag.

Abstract

Due to the problem of management of harbour dredging sediments, it appears necessary to find potential solutions of valorization making it possible to answer the latter effectively. In order to optimize the management of these materials, it is necessary to determine their characteristics related to the envisaged domain of valorisation.

After physico-chemical characterisation, mineralogical and mechanical, the environmental impact of the raw sediments of the PSL and the potential for use of these materials in experimental road construction are evaluated. In order to improve the mechanical Characteristics of raw sediments, in view of the imposed constraints for their uses in layer foundation, the sand of the Someca career has been used to optimize the granular composition of the material.

The study of materials formulation, for a use in foundation layer, is based on an experimental method of determination of maximum compactness. The optimal granular mixtures composed of sediments of the PSL and the sand of Someca career are then treated with cements Cibelcor and Vicat in order to improve their mechanical performances. The Mixtures fulfilling the conditions of use in a foundation layer in terms of mechanical behavior are then evaluated through leaching tests.

The part which treats the formulations of the concretes is focused on the valorisation of the sediments of the GPMD in hydraulic mixtures. In the phase of characterisation of these concretes containing sediments, several protocols of tests have been implemented in order to highlight the quality of these materials. Three concretes fulfilling the requirements of the specifications were discussed for the study of durability in face of external sulphate attack, combined with a non-destructive characterisation in order to study the influence of incorporation of sediment on the properties of concretes.

The section of artificial aggregates returns within the framework of a problematic of protection against the erosion of the littoral of the Northern region of France. The granulating plate and the manufacturing technique of aggregates in Big-bag are two methodologies used for the preparation of aggregates containing sediments of the GPMD. The physical properties determined are used to estimate the potential of valorisation of these materials and to better guide the future studies.

Keywords : Harbour Dredging Sediments, foundation layer, valorization, mechanical performance, environmental impact, Leaching, concrete, non-destructive characterization, external sulfatigue attack, artificial aggregates, granulating plate, manufacturing technique of aggregates in Big-bag.

Remerciements

Que tous ceux et celles qui ont contribué de près ou de loin à ces travaux de recherche, trouvent ici le témoignage de ma plus sincère gratitude.

Tout d'abord, un énorme et chaleureux merci au professeur Nor-Edine ABRIAK, mon directeur de thèse, de m'avoir accordé la chance de réaliser cette thèse au sein du Département Génie Civil et Environnemental de Mines Douai. Je le remercie pour ses compétences scientifiques, ses conseils, sa rigueur scientifique et son soutien moral dans les moments difficiles de la thèse. Cette direction de thèse m'a permis d'enrichir mes connaissances techniques et scientifiques.

Je remercie également le professeur Rachid ZENTAR pour son encadrement, son soutien dans la partie rédactionnelle, sa disponibilité ainsi que sa patience. Ses conseils avisés et son expérience dans le domaine de la valorisation des déchets ont permis à ce travail d'aboutir.

Je remercie Jean DE ZELICOURT, chef du Département Génie Civil et Environnemental de Mines Douai pour m'avoir chaleureusement accueilli dans son laboratoire.

Je remercie mes deux rapporteurs de thèse, les professeurs Patrice RIVARD et Michèle TKINT pour l'intérêt qu'ils ont porté à ces travaux et pour avoir accepté la lourde tâche d'en être les rapporteurs. Leurs remarques pertinentes et constructives ont incontestablement permis d'améliorer la qualité de ce manuscrit.

J'ai également une grande reconnaissance pour tous les techniciens du Département Génie Civil et Environnemental de Mines Douai : Guillaume, Christophe, Michael, Dominique, Johanna et Damien qui ont été très compréhensifs des difficultés liées à la mise en place des dispositifs expérimentaux. Et pour les enseignants-Chercheurs : Ghislain LOUIS et Vincent THIERY de m'avoir aidé à réaliser les analyses par la Microscopie Electronique à Balayage (MEB) et Sébastien REMOND et David BULTEEL pour les échanges riches et fructueux que nous avons partagés. Ce travail n'aurait pas vu le jour sans leur apport scientifique et technique.

Je remercie également Carole et Jacqueline qui m'ont beaucoup aidé pour toutes les démarches administratives nécessaires tout au long de ces trois années de thèse.

Un grand merci à mes collègues de bureau Zengfeng, Abdelfeteh, Ouissem, Khadija, Walid, à nos doctorants : Abdelhafid, Issameddine, Thomas, Maxime, Coralie, Kai, Cyril, Jean, Angélique, Thang et post-docs : Moussa, Raouf, Adolphe et Angel pour leur soutien, leur grande disponibilité et leurs encouragements jusqu'aux derniers moments.

Enfin je remercie vivement mes parents, mes frères et sœurs pour leurs soutiens et leurs encouragements sans limite durant ses années d'études. Les mots ne peuvent pas exprimer l'aide qu'ils m'ont apportée et leur contribution à ce travail. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma plus vive reconnaissance. Egalement merci à tous les autres membres de ma famille, mes tantes, mes oncles, mes cousines, mes cousins ainsi que tous mes amis.

Une pensée émue à ceux qui ne sont plus là.

Table des matières

Chapitre 1 : Etude bibliographique	5
1.1 Définition, origine et formation des sédiments	5
1.2 Composition des sédiments.....	6
1.3 Structure des sédiments.....	8
1.4 Problématique des sédiments marins de dragage	9
1.4.1 Technique de dragage de sédiments	9
1.4.2 Bilan de matériaux dragués	10
1.4.3 Devenir des matériaux de dragage	12
1.5 Réglementation régissant la gestion de sédiments marins de dragage	13
1.5.1 Réglementation internationale.....	13
1.5.2 Réglementation nationale.....	14
1.6 Polluants potentiels des sédiments marins de dragage	16
1.6.1 Contaminants organiques	17
1.6.2 Contaminants inorganiques	20
1.7 Caractérisation environnementale	23
1.7.1 Caractérisation environnementale niveau 1.....	25
1.7.2 Caractérisation environnementale niveau 2.....	25
1.7.3 Caractérisation environnementale niveau 3.....	25
1.8 Valorisation de sédiments en Génie Civil	26
1.8.1 Valorisation de sédiments de dragage en technique routière.....	26
1.8.2 Valorisation de sédiments de dragage en brique	33
1.8.3 Valorisation de sédiments de dragage en béton.....	34
1.8.4 Valorisation de sédiments de dragage en granulats artificiels	36
1.8.5 Valorisation de sédiments de dragage en éco-modelé paysager	46
1.9 Conclusion	47
Chapitre 2 : Caractérisation de sédiments de dragage du port de Saint-Louis pour une utilisation en technique routière.....	49

2.1 Introduction.....	49
2.2 Présentation du matériau étudié	49
2.3 Caractérisation physico-chimiques de sédiments bruts de dragage.....	51
2.3.1 Teneur en eau initiale (w %)	51
2.3.2 Analyse granulométrique	52
2.3.3 Equivalent de sable	56
2.3.4 Valeur au bleu de méthylène (VBS).....	56
2.3.5 Etats de consistance - Limites d'Atterberg.....	57
2.3.6 Masse volumique apparente et absolue	59
2.3.7 Teneur en matière organique (MO) et pertes au feu (PF).....	60
2.3.8 Friabilité des sables	61
2.3.9 Mesure de la surface spécifique et de la porosité	62
2.4 Caractéristiques de portance et de compactage	63
2.5 Analyse minéralogique	65
2.5.1 Analyse par fluorescence des rayons X.....	65
2.5.2 Analyse par diffraction de rayons X.....	67
2.6 Classification des sédiments marins selon le GTR	68
2.7 Analyse environnementale	69
2.8 Conclusion	71
Chapitre 3 : Valorisation de sédiments du port de Saint-Louis en technique routière	73
3.1 Introduction.....	73
3.2 Méthodologie de valorisation de sédiments du PSL en technique routière.....	73
3.3 Préparation des sédiments du PSL.....	74
3.4 Choix des liants hydrauliques et leurs dosages	74
3.4.1 Liants hydrauliques	74
3.4.2 Dosage en liants hydrauliques.....	77
3.5 Evolution du pH et de la conductivité électrique en fonction du dosage en ciment.....	77
3.6 Etude de comportement mécanique des sédiments traités aux ciments	78

3.7	Caractéristiques de compactage des sédiments de dragage traités aux ciments	79
3.7.1	Composition des mélanges sédiments/liants étudiés	79
3.8	Etude de comportement mécanique des matériaux formulés	89
3.8.1	Portance et compactage des mélanges bruts sédiment PSL-sable Someca	92
3.8.2	Performances mécaniques des mélanges bruts sédiment PSL/sable Someca	93
3.8.3	Portance et compactage des mélanges traités au ciment Cibecor	94
3.8.4	Comportement mécaniques des mélanges traités au ciment Cibecor	95
3.8.5	Optimisation de formulations issues de sédiments de PSL	97
3.8.6	Discussion des résultats des performances mécaniques des matériaux élaborés	99
3.8.7	Evaluation environnementale des formulations retenues	100
3.8.8	Réalisation et suivi d'essais lysimétriques	102
3.9	Conclusion	106
Chapitre 4 : Valorisation de sédiments du port maritimes de Dunkerque dans le béton		109
4.1	Introduction.....	109
4.2	Les constituants des bétons	109
4.2.1	Granulats naturels.....	110
4.2.2	Ciment utilisé	111
4.2.3	Sédiment de dragage portuaire GPMD.....	111
4.2.4	Plastifiant réducteur d'eau.....	112
4.2.5	L'eau de gâchage.....	113
4.3	Caractérisation des propriétés physiques des granulats.....	114
4.3.1	Masses volumiques	114
4.3.2	Absorption d'eau.....	116
4.3.3	Demande en eau des sédiments	117
4.3.4	Résistance mécanique – Essai Los Angeles (LA)	118
4.3.5	Propreté des sables	119
4.4	Formulation et composition de bétons selon la méthode Dreux-Gorisse	119
4.4.1	Principe de formulation béton	120

4.4.2	Cahier des charges.....	121
4.4.3	Formulations bétons	121
4.4.4	Malaxage.....	122
4.4.1	Mise en place du béton.....	122
4.4.2	Confection des éprouvettes	122
4.5	Caractérisation des bétons à l'état frais et durci.....	122
4.5.1	Essais réalisés sur bétons frais.....	122
4.5.2	Essai réalisés sur bétons durcis	124
A)	Porosité au mercure des bétons B0, B10 et B20.....	129
B)	Diffraction aux rayons X.....	130
C)	Observations au microscope électronique à balayage	131
4.6	Etude de la durabilité des bétons B0 et B10 et B20.....	133
4.6.1	Bétons B0 et B10 et B20 soumis à l'attaque sulfatique externe	133
4.6.2	Evaluation environnementale des bétons B10 et B20.....	141
4.6.3	Conclusion	143
Chapitre 5 : Etude de faisabilité de granulats à base de sédiments du port de Dunkerque		145
5.1	Introduction.....	145
5.2	Partie I : Fabrication de granulats par assiette granulatrice.....	146
5.2.1	Méthodologie de l'étude expérimentale	146
5.2.2	Description de l'assiette granulatrice utilisée	147
5.2.3	Caractérisation des matières premières	148
5.2.4	Etude de la granulation par assiette granulatrice	150
5.2.5	Formulation et caractérisation des granulats produits par assiette granulatrice.....	156
5.3	Partie II : Fabrication de granulats selon la technique en Big-bag.....	164
5.3.1	Protocole de fabrication	165
5.3.2	Caractéristiques des matières premières.....	166
5.3.3	Etude de formulations pour tester la faisabilité de granulats	166
5.3.4	Optimisation des premières formulations.....	171
5.3.5	Bilan d'essais réalisés.....	172

5.3.6 Conclusion	173
Conclusions générales et perspectives	174
Références bibliographiques.....	179
Normes utilisés.....	184
Publications et Communications.....	185

Tableau 1.1 : Principaux minéraux composants les sédiments d'eau douce, (Ramade, 1998)	7
Tableau 1.2 : Pourcentage des différentes catégories de destination des sédiments par façades littorales	12
Tableau 1.3: Niveaux relatifs aux composés et éléments traces (en mg/kg de sédiment sec analysé sur la fraction inférieure à 2 mm) (Arrêté 9 Août 2006).....	15
Tableau 1.4: Valeurs de référence des teneurs en métaux lourds des sédiments (mg/kg de matière sèche) utilisées par le port autonome de Rouen (Scordia, 2006)	15
Tableau 1.5: Critères d'évaluation d'aptitude d'un sol à être traité aux liants hydrauliques (NF P 14-100).....	32
Tableau 2.1 : Teneurs en eau initiales et siccités de sédiments de PSL à 40 °C et 105 °C.....	52
Tableau 2.2: Récapitulatif des fractions granulométriques de sédiments de PSL.....	54
Tableau 2.3: Caractéristiques granulométriques de sédiments de PSL.....	55
Tableau 2.4 : Equivalent de sable de sédiments de PSL	56
Tableau 2.5: Valeur au bleu de méthylène de sédiments de PSL	57
Tableau 2.6: Limites de liquidité de sédiments de PSL - méthode de Casagrande.....	58
Tableau 2.7 : Limites de liquidité de sédiments PSL - Cône de pénétration	59
Tableau 2.8 : Masse volumique apparente de sédiments de PSL.....	60
Tableau 2.9 : Masse volumique absolue de sédiments de PSL.....	60
Tableau 2.10 : Teneur en matière organique et perte au feu de sédiments de PSL.....	61
Tableau 2.11 : Friabilité de sédiments de PSL	62
Tableau 2.12 : Résultats d'essai Proctor Modifié – IPI de sédiments bruts de PSL.....	65
Tableau 2.13 : Résultat de l'analyse semi - quantitative par fluorescence des rayons X exprimée en pourcentages massiques de sédiments de PSL	67
Tableau 2.14 : Synthèse des caractéristiques physiques de sédiments marins.....	68
Tableau 2.15: Valeurs limites en lixiviation niveau 1 permettant de justifier l'utilisation des sédiments en technique routière selon le guide SETRA, 2012	70
Tableau 3.1 : Caractéristiques du ciment Cibelcor	75
Tableau 3.2 : Caractéristiques du ciment Vicat.....	77
Tableau 3.3 : Proportions de ciments utilisées pour le traitement des sédiments de dragage.....	79
Tableau 3.4 : Mélanges du sable Someca et du sédiment du port Saint-Louis étudiés.....	91
Tableau 3.5 : Caractéristiques optimales de portance et de compactage des mélanges bruts de sédiment/sable Someca.....	93
Tableau 3.6 : Valeurs des performances mécaniques du mélange C1	93
Tableau 3.7 : Valeurs des performances mécaniques du mélange D1.....	94
Tableau 3.8 : Composition des formulations formées de sédiment du PSL.....	94
Tableau 3.9 : Synthèse de l'essai Proctor-IPI pour les formulations issues de sédiments de PSL	95
Tableau 3.10 : Composition de la formulation optimisée issue de sédiment de PSL.....	98
Tableau 3.11 : Valeurs des résistances mécaniques de la formulation optimisée	98
Tableau 3.12 : Résultats des essais de lixiviation sur des formulations de sédiments de PSL.....	101
Tableau 4.1 : Caractéristiques physico-chimiques et mécaniques du ciment CEM I utilisé.....	111

Tableau 4.2 : Bilan des paramètres de caractérisation des sédiments GPMD	112
Tableau 4.3 : Caractéristiques du plastifiant réducteur en eau PRELOM [®] 600	113
Tableau 4.4 : Masses volumiques des granulats de Tournai	116
Tableau 4.5 : Valeurs de coefficient d'absorption des granulats de Tournai	117
Tableau 4.6: Valeurs du coefficient d'absorption des sédiments GPMD	118
Tableau 4.7 : Valeurs du coefficient de los Angeles des granulats de Tournai	119
Tableau 4.8: Valeurs de l'équivalent de sable et au bleu de méthylène du sable de Tournai	119
Tableau 4.9 : Compositions des formulations de béton	121
Tableau 4.10 : Teneurs en éléments traces du sédiment brut et des bétons B10 et B20	141
Tableau 4.11 : Teneur en polluants du sédiment brut et des bétons B10 et B20 relatif aux éluats	142
Tableau 5.1 : Récapitulatif des caractéristiques du sédiment marin étudié	148
Tableau 5.2 : Récapitulatif des caractéristiques du ciment utilisé pour l'étude de granulation	149
Tableau 5.3 : Influence de la vitesse de rotation sur les caractéristiques des granulats artificiels produits en un temps de granulation de 10 min	151
Tableau 5.4 : Valeurs de coefficients de durabilité en fonction des vitesses de rotation	152
Tableau 5.5 : Formulations retenues avec leurs caractéristiques de granulation	156
Tableau 5.6 : Valeurs de masses volumiques apparentes et absolues des granulats artificiels	158
Tableau 5.7 : Valeurs du coefficient d'absorption d'eau des granulats artificiels après 24h d'immersion	158
Tableau 5.8 : Valeurs de coefficient de dégradabilité des granulats artificiels	160
Tableau 5.9 : Valeurs de coefficient Micro-Deval des formulations retenues	161
Tableau 5.10 : Teneurs en éléments traces du sédiment brut et des granulats artificiels	162
Tableau 5.11 : Teneur en polluants du sédiment brut et des granulats artificiels relatif aux éluats	163
Tableau 5.12 : Cahier des charges de granulats artificiels en Génie Côtier	164
Tableau 5.13 : Présentation des matières premières utilisées	166
Tableau 5.14 : Valeur seuils retenus pour l'étude des formulations	168
Tableau 5.15 : Récapitulatif des formulations sans ajout de sable de dragage	168
Tableau 5.16 : Récapitulatif des formulations avec l'ajout de sable de dragage	169
Tableau 5.17 : Récapitulatif des résistances mécaniques et la porosité des formulations étudiées	170
Tableau 5.18 : Formulations retenues de l'étude	171
Tableau 5.19 : Formulations des références choisies	172
Tableau 5.20 : bilan d'essais réalisés sur les granulats	173

Figure 1.1 : Facteurs du processus sédimentaire (Dercourt & Paquet, 1995)	6
Figure 1.2: Diagramme triangulaire de classification des sédiments en fonction de leur texture, (Campy & Meybeck, 1995).....	8
Figure 1.3: Techniques de dragage dans les ports maritimes en 2009 (CETMEF, 2012)	10
Figure 1.4: Evolution des sédiments dragués sur les trois façades de la France métropolitaine entre 2005 et 2009 en quantités de matières sèche (x1000tonnes) (CETMEF, 2012)	11
Figure 1.5: Quantité de matériau de dragage immergée dans la mer dans les pays européens (Valeur exprimée en millions de tonnes du matériau sec) (OSPAR, 2003, 2004, 2005, 2007).....	11
Figure 1.6: Cycle biogéochimique des contaminants organiques (Baumard, 1997)	18
Figure 1.7: Mécanismes de sorption intervenant à l'interface eau-matière particulaire (Tronczynski et al., 2006)	19
Figure 1.8: Sources principales des contaminants métalliques (Meybeck et al., 2007)	21
Figure 1.9: Mécanismes principaux affectant le devenir des éléments traces métalliques (Me) dans le milieu aquatique (Garnier, 2004).....	22
Figure 1.10: Processus d'évaluation environnementale pour une valorisation en technique routière (Abriak et Al., 2012)	24
Figure 1.11 : Mise en œuvre de la route du Freycinet 12 à base de sédiments de dragage du GPMD	27
Figure 1.12: Classification des matériaux selon leur nature (GTR, 1992).....	29
Figure 1.13 : Critère de l'IPI pour les différentes couche de la chaussée [Norme NF P 98 115]	30
Figure 1.14 : Classification de matériaux traités aux liants hydrauliques [Norme NF P 98 113].....	31
Figure 1.15 : Briques 2,5x5x7,5 cm fabriquées avec un taux de substitution de 70 % de sédiments de Larache (a) et de Tanger (b).....	34
Figure 1.16: Briques 22x22 cm produites avec un taux de substitution de 15 % de sédiment fluvial traité	34
Figure 1.17: Compagne de carottage des blocs bétons à base de sédiments marins	36
Figure 1.18 : Production de granulats en France métropolitaine (UNGP, 2012).....	36
Figure 1.19 : Processus de fabrication de granulats légers à base de boues d'épuration et déchets de verre	38
Figure 1.20 : Assiette granulatrice utilisée pour la production de granulats artificiels.....	39
Figure 1.21 : Extrudeuse à piston utilisée pour la production de granulats à base de sédiments de dragage	39
Figure 1.22 : Plateaux granulateurs et Assiette granulatrice.....	40
Figure 1.23 : Variantes possibles de l'assiette granulatrice	41
Figure 1.24 : Mouvement de la charge dans un plateau tournant à différentes vitesses	42
Figure 1.25 : Influence des paramètres de conception et de conduite sur les caractéristiques des agglomérats obtenus.....	44
Figure 1.26 : Eco-modelé paysager à base de sédiments non immergeables de GPMD.....	47
Figure 2.1 : Etat de sédiments de Saint-Louis à l'arrivée au laboratoire Mines Douai.....	50
Figure 2.2 : Homogénéisation et quartage de sédiments de Saint-Louis	50
Figure 2.3 : Tamisage à 40mm de sédiments de Saint-Louis et l'état des macro-déchets.....	51
Figure 2.4 Teneur en eau en fonction du temps de calcination à 40 °C et 105 °C	52

Figure 2.5 : Analyse granulométrique par tamisage associée au laser et par laser	54
Figure 2.6: Classification triangulaire des sols fins (contenant moins de 30 % d'éléments de diamètre supérieur à 2 mm) (Degoutte et al., 2009).....	55
Figure 2.7 : Etats de consistance – Limites d'Atterberg	57
Figure 2.8: Teneur en eau en fonction de nombre de coups	58
Figure 2.9: Teneur en eau en fonction de la pénétration du cône.....	59
Figure 2.10 : Porosité cumulée en fonction de la taille des pores de sédiments de PSL.....	63
Figure 2.11 : Matériels de l'essai Proctor – IPI (a : machine de compactage ; b : moule CBR ; c : la presse pour mesurer l'IPI)	64
Figure 2.12 : Courbe Proctor Modifié – IPI de sédiments bruts de PSL.....	65
Figure 2.13 : Analyse thermogravimétrique de sédiments de dragage	66
Figure 2.14 : Phases cristallines de sédiments de PSL	67
Figure 2.15 : Classification GTR de sédiments de PSL selon GTR. 1992	69
Figure 3.1 : Méthodologie adoptée pour la valorisation des sédiments du PSL.....	74
Figure 3.2 : Répartitions granulométriques des deux ciments utilisés	76
Figure 3.3 : Evolution du pH en fonction du pourcentage de ciment	78
Figure 3.4 : Evolution de la conductivité électrique en fonction du pourcentage de ciment.....	78
Figure 3.5 : Evolution de la densité sèche et de l'IPI en fonction de la teneur en eau des mélanges traités au ciment Cibecor.....	80
Figure 3.6 : Evolution de la densité sèche et de l'IPI en fonction de la teneur en eau des mélanges traités au ciment Vicat	80
Figure 3.7 : Variation de WOPM et ρ_{OPM} en fonction du ciment Cibecor.....	81
Figure 3.8: Variation de WOPM et ρ_{OPM} en fonction du ciment Vicat	81
Figure 3.9 : Illustration de la confection des éprouvettes par compression statique	82
Figure 3.10 : Aptitude de sédiments au traitement, aperçu pendant (a) et après immersion (b) et pesée hydrostatique des éprouvettes (c).....	83
Figure 3.11 : Aptitude au traitement – gonflement volumique en fonction des mélanges élaborés	84
Figure 3.12 : Aptitude au traitement – résistance à la traction indirecte des mélanges élaborés.....	85
Figure 3.13 : Résistance à la compression uniaxiale des mélanges élaborés.....	86
Figure 3.14 : Illustration de l'essai de traction diamétrale (a) et détermination de module de Young (b)	86
Figure 3.15 : Résistance à la traction et module de Young des mélanges élaborés.....	87
Figure 3.16 : Classification des mélanges à base de sédiment de dragage et des ciments Cibecor et Vicat.....	89
Figure 3.17 : Distribution granulométrique du correcteur granulaire.....	90
Figure 3.18 : Procédé de mise en place des matériaux [TRAN, 2009]	91
Figure 3.19 : Compacité des mélanges de sédiment de PSL et de sable Someca	92
Figure 3.20 : Evolution de la densité sèche et d'IPI en fonction de la teneur en eau pour les mélanges bruts de sédiment /sable Someca	93

Figure 3.21 : Evolution de la densité sèche et d'IPI en fonction de la teneur en eau pour les formulations formées de sédiments de PSL.....	95
Figure 3.22 : Evolution de la résistance en compression des formulations issues de sédiments de PSL	96
Figure 3.23 : Evolution de la résistance à la traction et le module élastique des formulations	96
Figure 3.24 : Classification des formulations issues de sédiments de PSL sur des valeurs estimées à 360jours ...	97
Figure 3.25 : Classification de la formulation optimisée issue de sédiment PSL	99
Figure 3.26 : Conception et modélisation de la planche expérimentale	103
Figure 3.27 : Réalisation de la planche expérimentale des essais lysimétriques.....	105
Figure 4.1: Matériaux utilisés pour la fabrication béton.....	110
Figure 4.2 : Analyses granulométriques du gravillon et sable de Tournai, de sédiment et ciment utilisé.....	110
Figure 4.3 : Préparation des sédiments GPMD pour la formulation béton	112
Figure 4.4 : Indications relatives à l'état saturé surface sèche des sables selon la norme EN1097-6	115
Figure 4.5 : Etat de sédiment GPMD lors de l'essai de demande en eau	118
Figure 4.6 : Valeurs de l'affaissement et de la masse volumique apparente des formulations de bétons	123
Figure 4.7 : Teneur en air des formulations béton	124
Figure 4.8 : Calcul du module d'élasticité du béton B10 par les capteurs de déplacement	125
Figure 4.9: Valeurs des modules de Young des bétons.....	125
Figure 4.10 : Valeurs des résistances à la compression des bétons	126
Figure 4.11 : Porosité accessible à l'eau des formulations de bétons	127
Figure 4.12 : Valeurs de la masse volumique absolue des formulations de bétons	128
Figure 4.13: Porosité totale et diamètre moyen des bétons B0, B10 et B20.....	129
Figure 4.14 : Porosité différentielle et cumulée des bétons étudiés.....	130
Figure 4.15 : Spectres de diffraction des rayons X des bétons B0, B10 et B20	130
Figure 4.16 : Observation au MEB de la microstructure du béton B0	131
Figure 4.17 : Observation au MEB de la microstructure du béton B10	132
Figure 4.18 : Observation au MEB de la microstructure du béton B20	132
Figure 4.19 : Immersion des bétons B0, B10 et B20 dans une solution à 5 % de $\text{Na}_2\text{SO}_4 + 10\text{H}_2\text{O}$	135
Figure 4.20 : Variation de la masse des éprouvettes de bétons en immersion totale à 20°C	136
Figure 4.21 : Variation du module d'élasticité dynamique des éprouvettes de bétons en immersion totale	137
Figure 4.22 : Dégradation des bétons constatés après treize semaines d'immersion/séchage à 60 °C.....	138
Figure 4.23 : Variation de la masse des éprouvettes de bétons en immersion totale/séchage à 60 °C.....	138
Figure 4.24 : Variation du module d'élasticité dynamique des bétons en immersion/séchage à 60 °C.....	139
Figure 4.25 : Dégradation des bétons constatés après treize semaines d'immersion/séchage à 105 °C.....	139
Figure 4.26 : Variation de la masse des éprouvettes bétons en immersion /séchage à 105 °C	140
Figure 4.27 : Variation du module d'élasticité dynamique des bétons en immersion/séchage à 105 °C.....	140
Figure 5.1 : Méthodologie expérimentale de formulation des granulats artificiels	146
Figure 5.2 : vue de profil de l'assiette granulatrice. D, h, α et n sont respectivement le diamètre, la hauteur, l'angle d'inclinaison et la vitesse de rotation du plateau	147

<i>Figure 5.3 : Assiette granulatrice utilisée pour la granulation des sédiments du port de Dunkerque.....</i>	<i>148</i>
<i>Figure 5.4 : Distribution granulaire en pourcentage massique et volumique du ciment et sédiment.....</i>	<i>149</i>
<i>Figure 5.5 : Influence de la vitesse de rotation sur la distribution cumulée en masse des granulats artificiels produits en un temps de granulation de 5 min et 10 min</i>	<i>151</i>
<i>Figure 5.6 : Influence de la vitesse de rotation sur la dégradabilité des granulats artificiels</i>	<i>152</i>
<i>Figure 5.7 : Influence du temps de granulation sur la distribution cumulée en masse de granulats</i>	<i>153</i>
<i>Figure 5.8 : Influence du débit d'alimentation sur la distribution cumulée en masse de granulats.....</i>	<i>154</i>
<i>Figure 5.9: Influence du rapport liquide/solide sur la distribution granulométrique cumulée en masse de granulats</i>	<i>155</i>
<i>Figure 5.10 : Analyse granulométrique de l'échantillon choisi pour chaque formulation</i>	<i>157</i>
<i>Figure 5.11 : Porosité accessible à l'eau des granulats artificiels.....</i>	<i>159</i>
<i>Figure 5.12: Dégradabilité des granulats artificiels</i>	<i>160</i>
<i>Figure 5.13 : Illustration de la méthodologie industrielle utilisée à l'échelle laboratoire</i>	<i>165</i>

Introduction générale

Introduction générale

Par son rôle d'interface vitale entre la biosphère, l'Homme, l'environnement et son caractère pratiquement non renouvelable à l'échelle des générations humaines, le sol constitue un patrimoine dont la gestion durable doit s'imposer comme préoccupation essentielle.

A lui seul, le domaine du Génie Civil consomme annuellement en France plus de 400 millions de tonnes de matériaux granulaires dont plus de la moitié dans le domaine des travaux routiers (Michel, 1997; UNPG, 2005). Dans une optique de Développement Durable et face à l'appauvrissement des ressources naturelles, les sédiments de dragage portuaire pourraient donc être une alternative permettant d'améliorer la gestion des ressources naturelles de granulats en constituant une nouvelle source de matériaux.

Les quantités de matériaux dragués annuellement sont considérables : 40 Mm³ /an en France, 45 Mm³ /an en Pays-Bas (Benamar et al., 2007), 300 Mm³ /an aux Etats-Unis, (Amiran et al., 1999) et environ 400 Mm³ /an en Chine (Zhang et al., 2004). De par leur volume important, la gestion des sédiments de dragage représente un grand défi pour notre société. Dans le cadre d'un Développement Durable, la loi française favorise la valorisation de ces matériaux afin que seuls les déchets ultimes soient mis en décharge.

Les pratiques de dragage constituent un enjeu pour le développement et le maintien des activités portuaires et fluviales. Elles présentent également un risque de contamination des eaux côtières pouvant affecter durablement les écosystèmes.

On s'aperçoit aujourd'hui que les perturbations environnementales ont aussi des répercussions sur la santé publique. Ainsi les autorités américaines estiment que 10 % des sédiments présents dans leurs lacs, rivières et baies sont suffisamment contaminés par des composés toxiques pour avoir des effets néfastes sur les organismes aquatiques, mais également sur la population humaine consommatrice des ressources aquatiques présentes dans ces milieux (McCauley et al., 2000 ; Long, 2000). Il est devenu donc indispensable d'évaluer la qualité de ces milieux aquatiques et plus particulièrement celle de la phase sédimentaire.

La principale réponse à la question du devenir des sédiments dragués était le relargage en mer. Mais le respect de l'environnement prend une place de plus en plus importante dans les processus décisionnels. De nombreuses études se sont intéressées à la contamination des sédiments, révélant de fortes teneurs en polluants organiques et inorganiques dues aux activités d'exploitation des ports et au passif industriel.

Les risques que représentent les activités de dragage et d'immersion pour la faune et la flore marine et pour l'homme, ont également été mis en évidence. Ces activités sont

désormais strictement réglementées, au niveau international, depuis la signature de la convention de Londres en 1972.

La réglementation relative aux dragages et immersions a été révisée et complétée à partir de juin 2000. Quatre textes traitent des conditions relatives à l'évaluation de la qualité des sédiments. La gestion des sédiments contaminés soulève des défis technologiques, économiques et environnementaux de plus en plus importants. La réglementation française et européenne prévoient que les sédiments pollués ne peuvent plus être rejetés dans le milieu marin obligeant à terme les collectivités à prévoir un traitement à terre coûteux en raison des volumes considérables à valoriser et de la complexité d'un tel processus. Un recyclage est d'autant plus important que ce sont des millions de mètres cubes de sédiments pollués qui doivent être extraits chaque année des ports européens.

Plusieurs procédés de traitements existent et permettent de rendre aux sédiments contaminés des teneurs en polluants acceptables pour qu'ils soient réutilisés. La phase de caractérisation des sédiments prend alors toute son importance : elle permet de choisir la technologie adéquate et d'en estimer le coût. Certaines de ces technologies peuvent avoir des répercussions environnementales par l'intermédiaire des rejets d'eau ou de gaz, d'autres nécessitent beaucoup d'énergie ou de grands espaces.

Selon les caractéristiques des sédiments marins, ces derniers pourraient être utilisés dans différents domaines du Génie Civil. En France, plusieurs études ont été menées dans le cadre d'une valorisation des sédiments : en technique routière ((Boutouil, 1998), (rey, 1999), (Colin, 2003), (Dubois, 2005), (Rekik, 2007), (Scordia, 2008), (Tran, 2009), (Miraoui, 2010), (Wang, 2011), (Maherzi, 2013), en blocs béton (Achour, 2013)) en granulats artificiels (Brakni, 2008) et en briqueterie (Ben Allal et al., 2011). Cette valorisation présente des avantages en limitant les volumes mis en dépôt et baisse les coûts de l'opération de dragage.

Les travaux menés dans le cadre de cette thèse se focalisent d'une part, sur la valorisation des sédiments du port de Saint-Louis en technique routière et d'autre part, sur la valorisation des sédiments du port de Dunkerque dans le béton ainsi qu'en granulats artificiels destinés à la protection des ouvrages maritimes et portuaires.

Ce mémoire comporte cinq parties :

La première partie explicite la problématique de gestion des sédiments en France, les constituants et les polluants dans les sédiments, les réglementations en vigueur régissant la gestion de sédiments de dragage, les niveaux de caractérisation environnementale et enfin la valorisation des sédiments dans le domaine du Génie Civil.

La deuxième partie comporte les résultats des essais de caractérisation physico-chimique, de composition minéralogique, du comportement mécanique, et enfin de l'impact sur l'environnement. Ces caractérisations ont permis d'évaluer les performances des sédiments du port de Saint-Louis en technique routière.

La troisième partie présente la méthodologie adoptée pour l'utilisation des sédiments du port de Saint-Louis en technique routière. A ce niveau, nous avons abordé la phase de préparation des sédiments, le traitement aux liants hydrauliques, l'ajout du correcteur granulaire, et le choix des constituants dans les mélanges formulés basés sur la méthode expérimentale de détermination de compacité. Dans cette partie, l'accent est mis sur l'influence de traitement aux ciments sur les propriétés de compactage, sur l'Indice Portant Immédiat et sur les performances mécaniques. Ces paramètres sont nécessaires pour évaluer le potentiel de valorisation de ces matériaux en travaux routiers. Les mélanges remplissant les conditions d'utilisation en couche de fondation sur le plan du comportement mécanique sont ensuite évalués sur le plan impact sur l'environnement au travers d'essais de lixiviation.

La quatrième partie présente la caractérisation des matériaux rentrant dans la composition du béton et l'étude de formulation permettant de déterminer les proportions constituants de ce dernier, qu'il s'agisse du béton témoin ou de celui à base de sédiments, répondant aux exigences du cahier des charges. Dans cette partie, le sédiment a été considéré comme matière première susceptible d'être valorisée comme un granulats. Le travail réalisé vise à déterminer les propriétés à l'état frais et durci de ces matériaux afin d'évaluer l'impact de l'incorporation des sédiments sur ces propriétés. Trois bétons ont fait l'objet d'une étude de durabilité face l'attaque sulfatique externe, associée à une caractérisation non destructive en vue d'étudier l'influence d'incorporation de sédiments sur les propriétés bétons.

La cinquième et dernière partie présente la faisabilité de granulats artificiels à base de sédiments de Dunkerque permettant de stabiliser l'érosion littorale par rechargement de plages. Après avoir élaboré une méthodologie de confection de granulats par assiette granulatrice, nous avons étudié l'influence des paramètres fondamentaux contrôlant la granulation humide sur les caractéristiques physiques des granulats artificiels. Les propriétés physico-mécaniques déterminées permettent d'évaluer le potentiel de valorisation de ces granulats artificiels à base de sédiments et de mieux orienter les études futures.

Ces travaux de recherche portent sur l'étude de matériaux à base de sédiments marins prélevés au Port de Saint-Louis (PSL) et au Grand Port Maritime de Dunkerque (GPMD), dont l'originalité réside dans l'utilisation d'un maximum de sédiments et un faible dosage en

ciment tout en respectant les exigences de la voie de valorisation envisagée. Les principaux objectifs de cette thèse consistent à :

Pour la valorisation des sédiments du port Saint-Louis en technique routière

- Etablir une caractérisation mécanique, physico-chimique, minéralogique et environnementale de sédiments de dragage du port de Saint-Louis ;
- Développer une méthodologie de valorisation de ces matériaux en technique routière en se basant sur des études de caractérisation ;
- Elaborer, optimiser et valider les formulations à l'échelle de laboratoire ;
- Etudier et comparer les performances mécaniques des mélanges élaborés à base de deux types de ciment (Cibelcor et Vicat) ;
- Evaluer l'impact sur l'environnement des formulations retenues ;
- Proposer un essai de laboratoire permettant de simuler le relargage d'un matériau routier dans des conditions se rapprochant du scénario d'utilisation en technique routière.

Pour la valorisation des sédiments du port maritimes de Dunkerque dans le béton

- Elaborer et optimiser différentes formulations de béton à base des sédiments GPMD respectant les exigences du cahier des charges pour une utilisation en travaux maritimes ;
- Etudier l'effet d'incorporation des sédiments de dragage dans le béton par l'étude de caractérisation de ce dernier ;
- Evaluer la durabilité des bétons à base de sédiments GPMD par des essais d'attaque sulfatique externe et de porosité ;
- Evaluer l'impact sur l'environnement des bétons à base de sédiments GPMD.

Pour la valorisation des sédiments du port maritimes de Dunkerque en granulats artificiels

- Etudier la faisabilité de granulats à base des sédiments GPMD par deux techniques : l'Assiette granulatrice et la méthode de Big-bag ;
- Elaborer et optimiser les formulations à l'échelle de laboratoire ;
- Etablir une fiche d'identité à travers une étude de caractérisation de ces matériaux ;
- Evaluer l'impact sur l'environnement des granulats à base de sédiments GPMD ;
- Contribuer à la compréhension de l'enjeu national que représente l'élaboration de granulats légers destinés au remplissage des plages.

Chapitre 1 : Etude bibliographique

Chapitre 1 : Etude bibliographique

1.1 Définition, origine et formation des sédiments

Le dictionnaire de l'environnement et Développement Durable définit les sédiments comme étant des dépôts, marins ou continentaux, qui proviennent de l'altération ou de la désagrégation des roches préexistantes et que transportent, les fleuves, les glaciers ou les vents. Un sédiment est caractérisé par la nature minéralogique de ses constituants, par leur taille, par leur état de surface et par leur éventuelle cimentation. De ces caractéristiques, on peut avoir des indications sur le mode de mise en place du sédiment et de son évolution postérieurement au dépôt.

Les particules solides constituant les sédiments peuvent être d'origine naturelle ou anthropique :

Origine naturelle : les particules peuvent être soit endogènes ou exogènes aux cours d'eau

➤ Les particules endogènes sont principalement constituées de matières organiques essentiellement des organismes aquatiques appartenant au règne animal ou végétal (plantes, algues,...) ;

➤ Les particules exogènes sont principalement des particules minérales provenant de l'érosion éolienne des sols et de l'érosion hydrique du bassin versant ainsi qu'aux phénomènes de ruissellement. Les particules exogènes peuvent également être de nature organique, notamment des feuilles d'arbres transportées par le vent dans le canal.

Origine anthropique : les particules peuvent être de nature organique ou minérale et proviennent des activités industrielles, urbaines et agricoles.

Formation : les roches sédimentaires sont le produit d'une succession de processus (altération, érosion, transport, dépôt et diagenèse) qui sont illustrés sur la Figure 1.1. Il est à noter que la majorité des roches sédimentaires sont formées en milieu marin souvent à la faveur des cycles de « transgressions - régressions » marines.

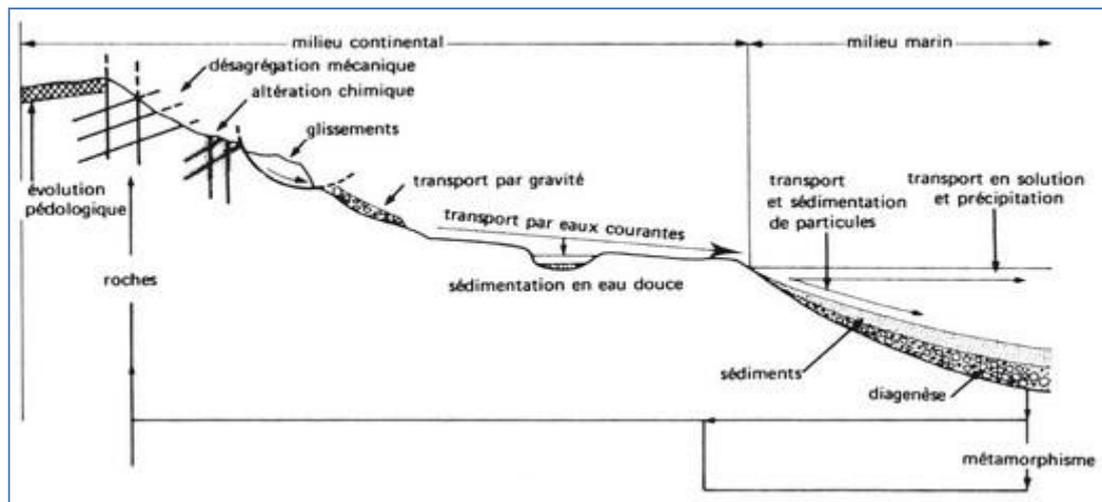


Figure 1.1 : Facteurs du processus *sédimentaire* (Dercourt & Paquet, 1995)

1.2 Composition des sédiments

Le sédiment est une matrice relativement hétérogène constituée d'eau, de matériaux inorganiques et organiques et de composés anthropiques (Power et Chapman, 1992).

Les sédiments sont composés à 80 % d'éléments chimiques « principaux » (Si, Al, K, Na, Mg) et à 20 % d'éléments carbonatés (CaCO_3 , MgCO_3 ,...), de nutriments (carbone organique, N, P) et d'éléments mobiles (Mn, Fe, S). Les éléments traces (Hg, Cd, Pb, Zn, Cu, Ni, Ag...) représentent moins de 0.1 % des éléments présents dans les sédiments (Garrivier, 1995).

L'**eau interstitielle** représente entre 20 à 90 % du volume des sédiments de surface selon que ceux-ci sont plus ou moins sableux, la teneur en eau étant d'autant plus importante que la texture du sédiment est fine (Campy & Meybeck, 1995).

La teneur en eau initiale des sédiments de dragage est généralement élevée, elle varie de 150 % à 300 %, cette variation dépend des techniques de dragage utilisées (Dubois, 2006).

L'eau interstitielle peut être répartie en 4 catégories :

- L'eau libre qui n'est pas liée aux fines ;
- L'eau capillaire, liée aux fines par des forces de capillarité ;
- L'eau colloïdale qui hydrate les colloïdes ;
- L'eau adsorbée liée à la surface des particules et constituant un film autour d'elles.

La **matière inorganique** est formée de rocs, de coquilles et de composés minéraux : les éléments de nature minérale influencent essentiellement les caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques des sédiments. Les composés inorganiques constituant le sédiment

sont les argiles, les carbonates et les silicates. Ces composants sont généralement recouverts de substances organiques et d'oxyhydroxydes de fer et de manganèse (Tableau 1.1).

Minéraux	Dénomination	Formule chimique
Silicates	Quartz (= silice)	SiO ₂
	Mica	K(Mg, Fe, Al) ₃ AlSi ₃ O ₁₀ (OH) ₂
	Feldspath	(Na, Ca, K)AlSi ₃ O ₈
	Amphibole	(Ca, Mg, Fe, Al) ₃ Si ₄ O ₁₁ (OH)
	Pyroxène	(Ca, Mg, Fe) ₂ Si ₂ O ₆
Argiles	Illite	KMgAl ₂ Si ₃ O ₁₀ (OH) ₂
	Smectite (= Montmorillonite)	XMgAlSiO ₁₀ (OH) ₂
	Chlorite	Mg ₃ Al ₂ Si ₃ O ₁₀ (OH) ₈
	Kaolinite	Al ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄
Carbonates	Calcite	CaCO ₃
	Dolomite	CaMg(CO ₃) ₂
	Siderite	FeCO ₃
Hydroxyde de Fer	Goethite	FeOOH
	Magnetite	Fe ₃ O ₄
Phosphates	Apatite	Ca ₅ (PO ₄) ₃ (OH,F)
	vivianite	Fe ₃ (PO ₄) ₂ .8H ₂ O
Sulfure	Pyrite	FeS ₂

Tableau 1.1 : Principaux minéraux composants les sédiments d'eau douce, (Ramade, 1998)

La **matière organique** occupe un petit volume dans les sédiments, son origine est très variée, elle peut être constituée de débris végétaux, des colloïdes humiques et micro-organismes. Elle subit une décomposition continue par la biomasse microbienne (bactéries, champignons).

La fraction organique comprend deux catégories : les substances humiques et non humiques. Les substances humiques interagissent avec les composés minéraux dissouts tels que les ions métalliques et sont à l'origine de la couleur noir des sédiments. Colin (2003) a indiqué que les substances humiques peuvent constituer entre 85 % et 90 % de la fraction organique totale du sol. La proportion de matière organique dans la matière sèche des sédiments varie de 2 % pour les sables de rivière à 90 % dans le cas de la tourbe (Schneider, 2001).

Les complexes argilo-humiques vont donner au matériau un potentiel de rétention d'eau plus important. Il est donc important de pouvoir évaluer la proportion de matière organique, afin de pouvoir analyser plus convenablement le comportement et les caractéristiques physiques du matériau.

En général, la proportion de matière organique est de l'ordre de 2 % à 10 % pour les sédiments des cours d'eau et elle est constituée de 60 % de composés humiques (Schneider, 2001).

1.3 Structure des sédiments

Les sédiments sont caractérisés par une fraction fine prépondérante dont la granulométrie, différente d'une région à une autre, est inférieure à 80 μm . Cette fraction induit un comportement complexe du sédiment (Dubois, 2006). On distingue les argiles de diamètre inférieur à 2 μm , les limons de 2 à 63 μm et les sables de 63 μm à 2 mm [NF EN ISO14688-1].

Les sédiments peuvent être classés selon le pourcentage de ces trois composés en utilisant le diagramme triangulaire de classification des sédiments en fonction de leur texture (Figure 1.2). Ce diagramme est particulièrement adapté aux sédiments selon la taille et le pourcentage de chaque fraction. Les fractions fines, en particulier les argiles, sont responsables de la cohésion des sédiments en raison de leurs propriétés électriques et de leurs structures en feuillets et elles sont considérées comme l'élément majeur influençant le comportement plastique d'un sol (AEAP 2000).

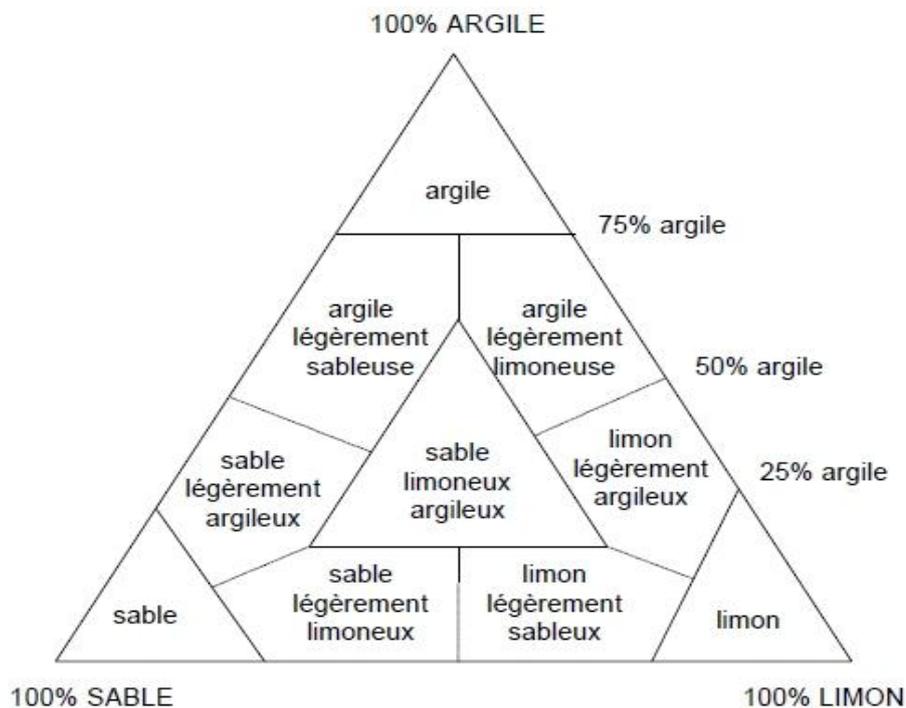


Figure 1.2: Diagramme triangulaire de classification des sédiments en fonction de leur texture, (Campy & Meybeck, 1995)

1.4 Problématique des sédiments marins de dragage

1.4.1 Technique de dragage de sédiments

Le dragage est une opération qui consiste à prélever des sédiments du fond de la mer. Les procédés de dragage changent selon les zones, le type des travaux et la nature du sédiment à draguer.

On distingue trois types de dragage : le dragage d'approfondissement, le dragage d'aménagement de nouvelles aires portuaires et le dragage d'entretien (Foucher, 2005).

Le dragage d'approfondissement est entrepris lorsqu'il est nécessaire de moderniser des ports et d'adapter des seuils de navigation.

Le dragage d'entretien périodique vise à extraire les sédiments qui se sont déposés et gênent la navigation dans les chenaux d'accès des ports maritimes et estuaires ainsi que les bassins à flots.

Le dragage d'aménagement de nouvelles aires portuaires concerne le déplacement des volumes de matériaux divers (sables, argiles, graviers).

En matière d'équipements de travail, on distingue généralement les dragues mécaniques, hydrauliques et pneumatiques (CETMEF, 2012). Les dragues mécaniques sont utilisées dans des zones difficiles d'accès (bordures de quais, bassins étroits) et peuvent travailler jusqu'à des profondeurs de 25 m (drague à godets) à 30 m (drague à benne) (Foucher, 2005). Les dragues hydrauliques sont basées sur le principe de la pompe à eau centrifuge et opèrent par création d'un vide à l'entrée de la pompe. La pression atmosphérique dans l'eau oblige la mixture à suivre la conduite d'aspiration, seule trajectoire disponible (Foucher, 2005). La drague pneumatique est particulièrement adaptée au dragage des sédiments contaminés, et les matériaux sont ensuite évacués par chaland ou par conduite flottante (Foucher, 2005).

On constate que, pour les grands ports maritimes, la technique prédominante est le dragage hydraulique, représentant une proportion de 77,5 %. Certaines opérations ont nécessité l'utilisation de dragage mixte, associant dragues mécaniques et hydrauliques, dans une proportion de 17,6 %. Par contre, dans les autres ports, 78,1 % des quantités de matières sèches sont enlevées par dragage hydraulique. Le dragage mécanique est utilisé à hauteur de 18,4 % dans ces ports tandis que le dragage mixte ne représente que 1,6 % (Figure 1.3).

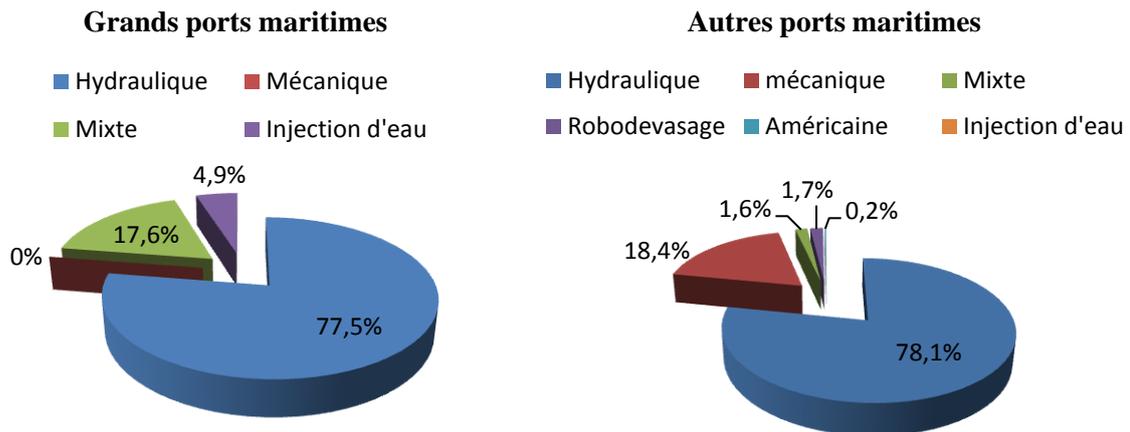


Figure 1.3: Techniques de dragage dans les ports maritimes en 2009 (CETMEF, 2012)

1.4.2 Bilan de matériaux dragués

En France, une grande quantité de matériaux doit être draguée annuellement dans les ports maritimes, rivières, fleuves et lacs. L'opération de dragage est une activité indispensable pour la sécurité de la navigation maritime et l'accès aux ports, elle est effectuée soit pour réaliser les travaux de Génie Portuaire, soit pour exploiter les matériaux dragués. Ainsi, environ 50 millions de mètres cubes de sédiments sont dragués en moyenne par an. Les grands ports représentent des volumes plus importants en matériaux déplacés. Les trois principaux ports d'estuaire (Rouen, Nantes-Saint-Nazaire et Bordeaux) font état d'un volume moyen annuel d'environ 25 Mm³, par contre, les cinq grands ports maritimes, Dunkerque, Calais, Boulogne, le Havre et la Rochelle, draguent un volume moyen annuel de 6,2 Mm³ de sédiments. C'est en mer Méditerranée que les volumes dragués sont les plus faibles. Les trois-quarts de volume dragué que prennent ces grands ports ne doit pas faire oublier les dragages, moins conséquents en volume des autres ports, qui peuvent poser des problèmes du fait de la nature et de la concentration des polluants (Alzieu, 2003).

Entre 2005 et 2006, le total de quantités de matières sèches des éléments dragués sur les trois façades littorales de la France a diminué de 21 % pour ensuite se stabiliser jusqu'en 2007 aux alentours des 25 millions de tonnes de matières sèches prélevées (Figure 1.4).

En 2008, la quantité de sédiments dragués est passée sous la barre des 25 millions pour dépasser en 2009 les 30 millions de tonnes, revenant aux quantités draguées en 2005 (CETMEF, 2012).

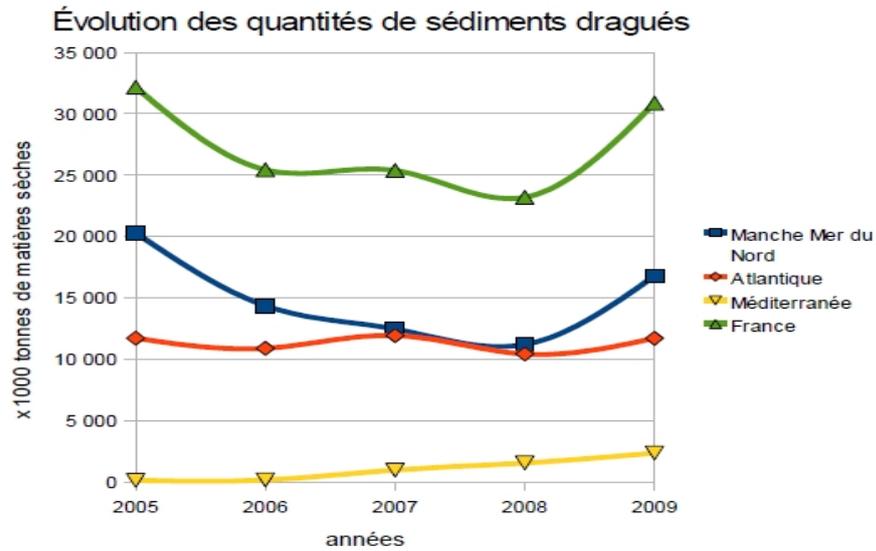


Figure 1.4: Evolution des sédiments dragués sur les trois façades de la France métropolitaine entre 2005 et 2009 en quantités de matières sèche (x1000tonnes) (CETMEF, 2012)

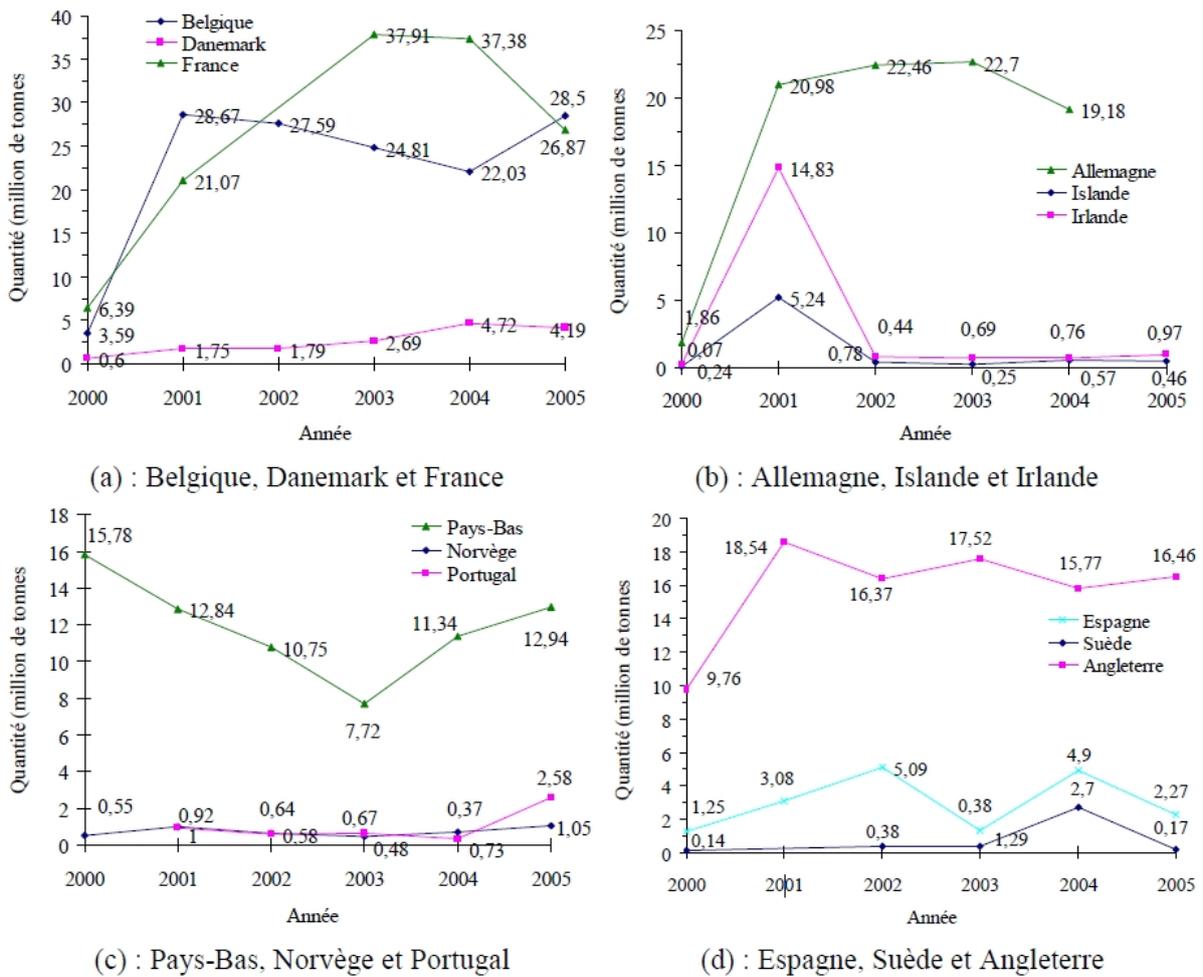


Figure 1.5: Quantité de matériau de dragage immergée dans la mer dans les pays européens (Valeur exprimée en millions de tonnes du matériau sec) (OSPAR, 2003, 2004, 2005, 2007)

Au niveau européen, la situation du dragage des sédiments est représentée dans les graphes de la quantité draguée et immergée de 2000 à 2005 réalisé par l'enquête annuelle de la commission OSPAR (Figure 1.5 (a), (b), (c) et (d)).

On constate que la plupart des matériaux sont prélevés par les cinq pays : Belgique, Angleterre, Pays-Bas, Allemagne et France. Par contre, les quatre pays qui draguent en petite quantité sont : la Norvège et la Suède, le Portugal et le Danemark.

1.4.3 Devenir des matériaux de dragage

La réglementation actuelle permet de prendre en compte la protection de l'environnement et la santé humaine, en évitant l'immersion de sédiments dont la teneur en certaines substances présenterait un risque de contamination des milieux marins. Toutefois, elle ne permet pas de les interdire formellement puisque des immersions de sédiments dépassant les teneurs seuils restent possibles s'il s'agit de la solution la moins pénalisante pour l'environnement (principe de la Convention de Londres).

La destination des sédiments a été classée en 5 catégories (Tableau 1.2) : l'immersion, le rechargement de plages, le dépôt à terre, le dépôt en mer et les autres traitements (dispersion, confinement, création de remblais...) (CETMEF, 2012).

	Manche	Atlantique	Méditerranée
Immersion	95,19 %	98,71 %	97,23 %
Rechargement de plages	0,07 %	1,11 %	1,06 %
Dépôt à terre	4,72 %	0,16 %	0,96 %
Dépôt en mer		0,02 %	0,75 %
Autres traitements	0,01 %		

Tableau 1.2 : Pourcentage des différentes catégories de destination des sédiments par façades littorales

L'immersion des sédiments représente de très loin la principale technique utilisée pour l'évacuation des déblais de dragage.

Les quantités draguées des ports situés sur la mer méditerranée sont les plus faibles, à titre d'exemple, l'entretien du port de Marseille en 2002 a nécessité le dragage d'environ 173 000 tonnes (Foucher, 2005).

Le bilan de sédiments dragués ainsi que leur devenir en France permet de mettre en évidence la nécessité croissante de développer des procédés industriels de traitement et de valorisation des sédiments.

1.5 Réglementation régissant la gestion de sédiments marins de dragage

1.5.1 Réglementation internationale

La **Convention OSPAR**, signée par 15 membres de l'Union européenne, est rentrée en vigueur en 1998 dont le but de protéger le milieu marin de l'Atlantique du Nord - Est. Elle est née de la fusion de la **Convention d'Oslo** (1972) traitant la prévention de la pollution marine par les opérations d'immersion, et de la **Convention de Paris** (1974) traitant des rejets d'origine tellurique. Cette convention est en vue de fédérer globalement les moyens de connaissance et d'action des parties contractantes pour assurer la meilleure conservation possible de l'espace maritime dans un esprit de Développement Durable. Les dispositions de la convention OSPAR permettent de mettre en place des mesures de prévention et de recherche pour une meilleure gestion des déchets avec les établissements de surveillance permanente du milieu marin. Elle vise à déterminer, pour les éléments métalliques et les substances toxiques, des seuils permettant de caractériser les sédiments méritant une attention particulière.

La **Convention de Londres**, a été organisée le 29 décembre 1972 et entrée en vigueur le 30 Août 1975, est un traité international sur la prévention de la pollution des mers résultant de l'immersion de déchets. Elle vise à l'élimination des déchets et autres matériaux en mer depuis les navires, aéronefs, engins flottants et plates-formes. Cette convention ne couvre ni les émissions à partir de sources côtières ni les déchets provenant de l'exploitation et de l'exploration des ressources minérales maritimes ni le stockage de matière dans un but autre que l'élimination. La convention de Londres est composée de 22 articles et de 3 annexes. L'annexe I détaille les déchets dont l'immersion est interdite, l'annexe II liste les déchets pour lesquels un permis spécifique d'immersion est requis et l'annexe III précise les critères régissant la délivrance d'un permis général d'immersion pour tous les autres déchets, traite la nature des déchets autorisés, des caractéristiques du lieu d'immersion et la méthode d'évacuation.

La **Convention de Barcelone 1976 et protocole «immersion»**, ne couvrent que les eaux situées au-delà des lignes de base servant à mesurer la mer territoriale, et constitue les trois traités traitant spécifiquement les immersions. La convention de Barcelone comporte deux protocoles relatifs d'une part à la lutte contre la pollution par les hydrocarbures et autres substances nuisibles et d'autre part à l'immersion des sédiments de dragage.

Le protocole «immersion» précise les déblais de dragage ainsi que les conditions et modalités de délivrance des permis d'immersion.

1.5.2 Réglementation nationale

En France, toute opération d'immersion effectuée à partir d'un port français relève de la loi N° 76 599 du 7 juillet 1976 et du décret N° 82 842 du 29 septembre 1982. Nous nous intéressons à l'immersion des sédiments marins de dragage qui est la pratique la plus répandue.

Les stratégies de définition des valeurs guides sont largement laissées à l'appréciation des autorités compétentes de chaque pays. En France, elles sont le fruit d'un groupe de travail intitulé Groupe d'Etude et d'Observation sur les Dragages et l'Environnement (GEODE), qui a proposé des valeurs guides communément appelées « niveau Géode » pour les métaux lourds et les PCB (Polychlorobiphényles) (Alzieu, 1999).

Deux seuils ont été définis par la circulaire n° 2000-62 du 14 juin 2000 et l'arrêté du 9 août 2006 complété par l'arrêté du 23 décembre 2009 relatif aux niveaux de référence pour huit métaux, sept congénères de PCB et le tributylétain lors d'une analyse de sédiments marins présents en milieu naturel ou portuaire (Tableau 1.3). Ce dernier indique les paramètres et valeurs retenus, qui sont susceptibles d'être modifiés en fonction de l'évolution des connaissances. Ce sont des seuils de contamination à partir desquels doit être appréciée l'incidence de l'opération sur le milieu aquatique.

- **Au-dessous du niveau N1**, l'impact potentiel est en principe jugé négligeable, les teneurs étant « normales » ou comparables au bruit de fond environnemental. Ce niveau correspond à la valeur plafond pour une immersion des sédiments de dragage sans étude complémentaire ;
- **Entre le niveau N1 et N2**, une investigation complémentaire peut s'avérer nécessaire en fonction du projet considéré et du degré de dépassement du niveau N1. De manière générale, l'investigation complémentaire doit être proportionnelle à l'importance de l'opération envisagée ;
- **Au-delà du niveau N2**, une investigation complémentaire est généralement nécessaire car des indices notables laissent présager un impact potentiel négatif de l'opération. Il faut alors mener une étude spécifique portant sur la sensibilité du milieu aux substances concernées, avec au moins un test d'écotoxicité globale du sédiment, une évaluation de l'impact prévisible sur le milieu. L'immersion des sédiments de dragage est susceptible d'être interdite, en particulier si elle ne constitue pas la solution la moins dommageable pour l'environnement marin par rapport à des solutions in situ ou terrestres. Cependant, il n'existe aucune interdiction réglementaire d'immersion aujourd'hui en Europe.

<i>Eléments traces</i>	Niveau N 1	Niveau N 2	<i>PCB</i>	Niveau N 1	Niveau N 2
Arsenic	25,0	50,0	PCB totaux	0,500	1,00
Cadmium	1,2	2,4	PCB 28	0,025	0,05
Chrome	90,0	180,0	PCB 52	0,025	0,05
Cuivre	45,0	90,0	PCB 101	0,050	0,10
Mercure	0,4	0,8	PCB 118	0,025	0,05
Nickel	37,0	74,0	PCB 138	0,050	0,10
Plomb	100,0	200,0	PCB 153	0,050	0,10
Zinc	276,0	552,0	PCB 153	0,025	0,05
-	-	-	TBT	0,100	0,40

Tableau 1.3: Niveaux relatifs aux composés et éléments traces (en mg/kg de sédiment sec analysé sur la fraction inférieure à 2 mm) (Arrêté 9 Août 2006)

En l'absence de réglementation spécifique sur les sédiments de dragage, les autorités de gestion des sédiments de dragage ou de curage ont été amenées à développer leurs propres valeurs guides non officiels, à titre d'exemple, le port autonome de Rouen et les Voies Navigables de France (Kribi, 2005).

Le port autonome de Rouen a établi, en accord avec la DREAL locale, une grille de classification de la qualité des produits de dragage continentaux dont il a la charge. Elle permet d'attribuer aux sédiments un indice de pollution entre 1 et 6 en fonction de leur teneur en métaux lourds (Tableau 1.4).

Catégorie	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Pb	Ni	Zn
1	< 10	< 0,8	< 50	< 35	< 0,3	< 50	< 25	< 100
2	10-20	0,8-2,4	50-150	35-100	0,3-1	50-150	25-50	100-250
3	20-30	2,4-6	150-250	100-200	1-2	150-250	50-100	250-750
4	30-50	6-12	250-500	200-300	2-4	250-500	100-200	750-1500
5	50-100	12-20	500- 1000	300-500	4-10	500- 1000	200-500	1500- 3000
6	> 100	> 20	> 1000	> 500	> 10	> 1000	> 500	> 3000

Tableau 1.4: Valeurs de référence des teneurs en métaux lourds des sédiments (mg/kg de matière sèche) utilisées par le port autonome de Rouen (Scordia, 2006)

D'après l'article L 541-1 du code de l'environnement, est considéré comme un déchet « tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son détenteur

destine à l'abandon ». Les sédiments étant issus du processus de dragage, ils peuvent avoir cette étiquette de « déchets ». Ce statut n'interdit pas une utilisation future ou une vente à titre onéreux. (LEGIFRANCE).

Le décret n° 2002-540 du 18 avril 2002, qui reprend la nomenclature européenne des déchets, a classé les sédiments sous la rubrique 17 05 05* « Boues de dragage contenant des substances dangereuses » ou 17 05 06 « Boues de dragage autres que celles visées à la rubrique 17 05 05* ». L'astérisque indique qu'il s'agit alors d'un déchet dangereux. Cette notion de dangerosité est définie dans l'annexe I du décret sus-cité : un déchet est considéré dangereux s'il possède un des 14 critères (H1 à H14) explicités dans le décret. Mais ces critères sont inadaptés aux sédiments, en particulier le H14 relatif à l'écotoxicité du déchet (LEGIFRANCE).

Il est important de noter que jusqu'à aujourd'hui, il n'existe aucune méthode permettant de juger si un déchet est écotoxique ou pas. Par contre, il est possible de quantifier leur toxicité en utilisant les seuils de relargage à la lixiviation fixés par la décision du Conseil Européen du 19 décembre 2002 établissant des critères et des procédures d'admission des déchets dans les décharges (LEGIFRANCE).

En comparant les sédiments fluviaux et marins, la situation de ces derniers est beaucoup plus simple car dans la majorité des situations, les sédiments marins sont destinés à l'immersion en mer. Ils deviennent des déchets au moment de dépassement des seuils de contamination à partir desquels l'immersion n'est plus possible.

1.6 Polluants potentiels des sédiments marins de dragage

La contamination des sédiments est principalement due aux rejets industriels, urbains et agricoles, entraînant l'apport d'un grand nombre de substances toxiques. Depuis les années soixante-dix, les substances toxiques sont considérés comme une destination finale vers les sédiments qui deviennent une réserve toxique potentiellement mobilisable.

De manière générale, les sédiments fins ont une teneur en matière organique élevée, et elles contiennent une quantité appréciable de sulfures et sont anoxiques. Par contre, les sédiments grossiers, qui sont généralement pauvres en matière organique, ont une faible capacité d'immobilisation des métaux et des polluants organiques (Alzieu et al, 1999).

1.6.1 Contaminants organiques

Les contaminants organiques présentent une très grande diversité (hydrocarbures, polychlorobiphényles, pesticides...) et sont désormais omniprésents dans l'environnement. De par leur persistance et leurs propriétés toxiques, un nombre de ces composés chimiques ont suscité l'intérêt des scientifiques et des pouvoirs publics. Dans cette étude bibliographique, nous nous sommes focalisés sur les contaminants organiques tels que : les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), Polychlorobiphényles (PCB) et les tributylétains (TBT).

1.6.1.1 Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), comportement et devenir

Les hydrocarbures aromatiques polycycliques sont des molécules carbonées principalement formés à la suite de la combustion incomplète de matière organique ou à la suite de la lente maturation de la matière organique lors de la catagenèse (Baumard, 1997).

Les sources naturelles de HAP comprennent donc les feux de forêt, l'activité volcanique ainsi que les fuites naturelles de réservoirs pétroliers. Les principales sources anthropiques de HAP sont le déversement de produits pétroliers (carburants, huiles lubrifiantes ...) (Wang et al., 1999) ainsi que la combustion de matière organique (biomasse ou combustibles fossiles) liée à la production d'énergie, à la circulation automobile et à certains processus industriels (Yunker et al., 2002 ; Rocher, 2003).

Il existe plusieurs dizaines de HAP, qui diffèrent par le nombre et la position des cycles aromatiques. Les HAP, qui se caractérisent par leur persistance dans l'environnement (Douben, 2003) ainsi que par leur toxicité reconnue vis-à-vis de nombreux organismes vivants, ont été inclus dans les listes de polluants prioritaires de l'USEPA (United States Environmental Protection Agency) et de l'Union Européenne (DCE, 2000).

La solubilité et la pression de vapeur saturante sont des facteurs physico-chimiques contrôlant de manière importante la distribution des HAP entre les différents compartiments de l'environnement (atmosphère, hydrosphère, biosphère) (Latimer et Zheng, 2003). Les HAP présentent par ailleurs une forte affinité vis-à-vis de la matière organique.

L'exposition prolongée à des doses plus faibles de contamination peut également engendrer des effets chroniques et affecter de manière importante les organismes aquatiques en inhibant ou stimulant leur croissance et en perturbant la division cellulaire (Rand et al., 1995).

Les contaminants organiques s'associent rapidement aux matières en suspension (Figure 1.6). Ces composés accompagnent les particules en suspension lors de leur sédimentation et ont tendance à s'accumuler dans les sédiments (Chiou et al., 1998).

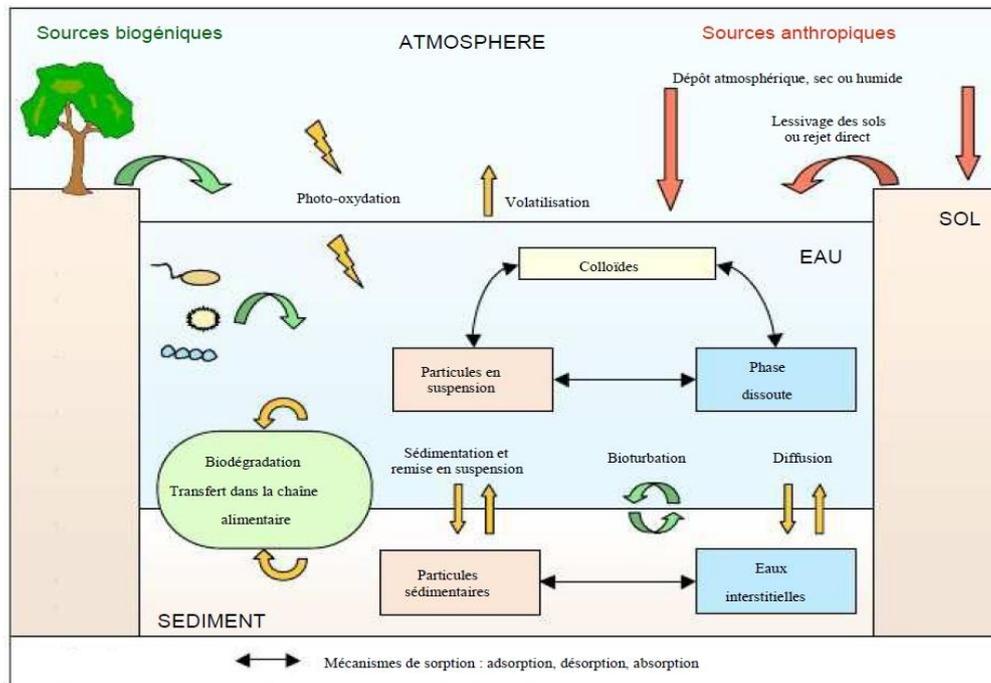


Figure 1.6: Cycle biogéochimique des contaminants organiques (Baumard, 1997)

Les processus de sorption et de désorption qui affectent ces contaminants à l'interface eau-sédiment tendent à établir un équilibre thermodynamique entre les concentrations dans les phases dissoutes et particulaires. Dans le cas des hydrocarbures, ces processus sont principalement régis par la matière organique associée aux particules (Tronczynski et al., 2006).

La sorption des contaminants organiques s'effectue suivant deux processus distincts (Figure 1.7) : l'adsorption à la surface des particules organiques et minérales et l'absorption à l'intérieur de la matière organique (Warren et al., 2003) et son efficacité dépend alors respectivement de la surface du sorbant et du volume de matière organique (Tronczynski et al., 2006).

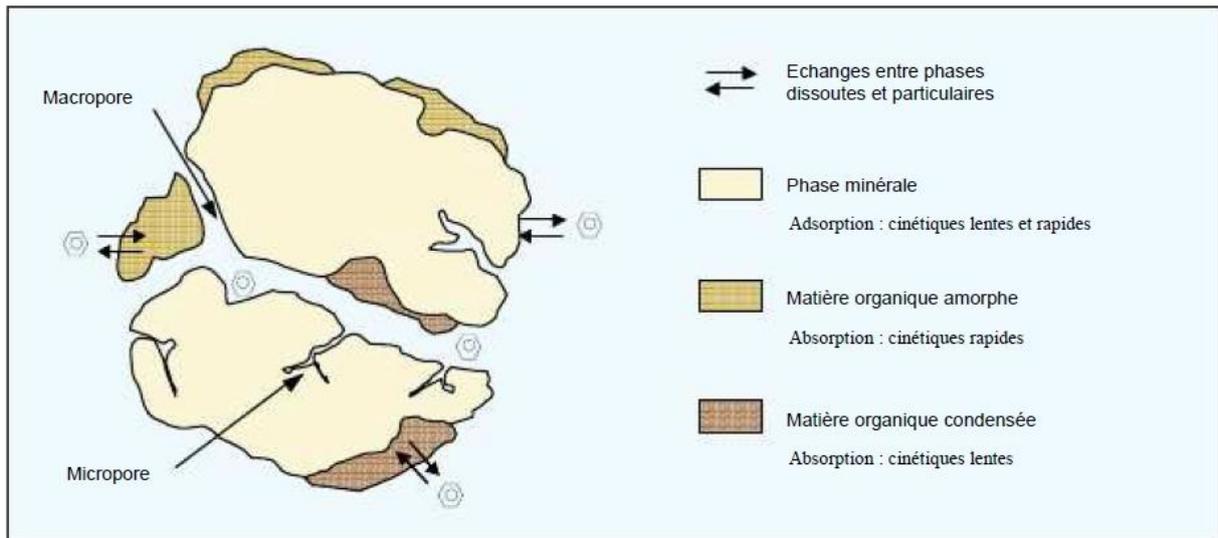


Figure 1.7: Mécanismes de sorption intervenant à l'interface eau-matière particulaire (Tronczynski et al., 2006)

De même pour les éléments traces métalliques, une proportion plus élevée de contaminants organiques est généralement relevée dans la fraction fine et riche en matière organique du sédiment (Karickhoff et al., 1979).

1.6.1.2 Polychlorobiphényles (PCB)

Les PCB ayant une formule $C_{10}H_{(10-n)}Cl_n$ sont un groupe de composés organochlorés qui comprennent 209 congénères. Les congénères se distinguent par le nombre d'atomes branchés sur la molécule et par leur position sur le noyau biphényle. Les PCB ne présentent pas de toxicité aiguë et ils proviennent des pertes lors des remplissages et retraitement des systèmes clos, des rejets urbains, des décharges de matériel usagé et des activités liées à la récupération des matériaux ferreux (Alzieu et al., 1999). La solubilité dans l'eau des PCB est très faible et diminue avec le nombre d'atomes de chlore dans la molécule. Le devenir des PCB dans l'environnement peut s'expliquer par leurs propriétés physico-chimiques. En effet, l'accroissement de quantité de particules fines et du taux de carbone organique présent peut entraîner l'augmentation de la capacité du sédiment superficiel à piéger les PCB.

1.6.1.3 Tributylétain (TBT)

Le tributylétain est une molécule biocide, toxique pour les végétaux et d'autres organismes, incorporée dans la composition de certaines peintures antisalissure destinées à protéger les

coques des navires contre la fixation d'organismes aquatiques. Ce biocide établit de graves conséquences au niveau des organismes marins et constitue un polluant durable.

Les résidus du TBT, dont l'étain, persistent longtemps dans les sédiments des ports et sur les sites d'immersion de boues de dragage et à leur aval suite aux remises en suspension le cas échéant. C'est pour cela qu'en novembre 1999, une résolution de l'Organisation Maritime Internationale (OMI - A.895) a été proposée puis adoptée le 5 octobre 2001, interdisant l'utilisation de peintures antifouling à base d'étain à compter du 1er janvier 2003. Leur présence sur la coque d'un navire fut interdite à compter de 2008.

Dans le milieu aquatique, le TBT se présente à l'état dissout sous forme d'hydroxydes, de carbonates ou de chlorures faiblement associés aux matières en suspension (Alzieu et Michel, 1998). Les tributylétains sont très toxiques pour les mollusques à des concentrations extrêmement faibles.

1.6.2 Contaminants inorganiques

1.6.2.1 Origine et caractéristiques physico-chimiques

Le terme des « éléments traces métalliques » (ETM) désigne les métaux et métalloïdes dont la teneur est inférieure à 1 mg/g dans le sédiment et sera préféré à celui de « métaux lourds » (Duffus, 2002). Ils sont présents à l'état naturel dans les roches et minerais de la croûte terrestre, généralement sous la forme d'oxydes, de carbonates, de silicates ou de sulfures. Une partie des métaux présents dans les sédiments provient donc de l'altération de ces roches et de l'érosion du bassin versant. D'autres phénomènes, tels que le volcanisme, les feux de biomasse et les sources thermales, contribuent au rejet de métaux dans l'environnement (Rocher, 2003). A ces apports naturels, ils se sont ajoutés les métaux émis à la suite des activités anthropiques: exploitation des gisements et utilisation des métaux dans de nombreux secteurs d'activité (Figure 1.8).

Les principales sources anthropiques sont la métallurgie et la fonderie, l'incinération des déchets, la combustion des matériaux fossiles et des carburants et l'épandage de produits phytosanitaires et de fertilisants en agriculture (Quantin, 2001). Une fois rejetés dans l'environnement, les ETM se caractérisent par leur non-biodégradabilité, qui induit un pouvoir d'accumulation important dans la biosphère, ainsi que par leur faible volatilité (à l'exception de l'arsenic et du mercure).

Ces éléments métalliques sont classés selon leur caractère essentiel ou non. Les éléments essentiels sont nécessaires au bon fonctionnement des organismes, sous une forme et dans une

gamme de concentration optimale. Des concentrations trop faibles (carence) ou trop élevées ont un effet physiologique négatif ou toxique et entraînent l'apparition de symptômes. A l'inverse, les métaux non essentiels perturbent le cours normal des processus biologiques et ont un effet toxique, y compris à de très faibles concentrations (Geffard, 2001). Les contaminants métalliques sont disponibles pour les organismes aquatiques via l'ingestion de nourriture, la respiration et le transport à travers les membranes biologiques (Eggleton et Thomas, 2004).

ELEMENT METALLIQUE	ORIGINES ANTHROPIQUES
Arsenic (As)	Métallurgie, tannerie, coloration des verres et céramiques, pesticides, protection du bois, combustibles fossiles
Cadmium (Cd)	Métallurgie, traitement de surface, céramique, colorants, usure des pneumatiques, incinération des déchets, engrais phosphatés
Cuivre (Cu)	Métallurgie, électricité, photographie, traitement de surface, pigments, industrie textile, fongicide
Chrome (Cr)	Fabrication de l'acier, traitement de surface, industrie textile, céramique, verrerie, photographie, cimenterie
Cobalt (Co)	Métallurgie, batteries, peinture, catalyseurs
Mercure (Hg)	Piles, batteries, tubes fluorescents, industrie chimique du chlore, combustibles fossiles, incinération des déchets
Nickel (Ni)	Fabrication d'acier et d'alliages, dépôts chimiques et électrolytiques
Plomb (Pb)	Batteries, pigments, imprimerie, métallurgie, canalisations, raffinage
Zinc (Zn)	Galvanisation, imprimerie, teintures et pigments, insecticides, usure des pneumatiques, bâtiments et toitures

Figure 1.8: Sources principales des contaminants métalliques (Meybeck et al., 2007)

1.6.2.2 Comportement et devenir des contaminants métalliques

Les effets toxiques des ETM ainsi que leur comportement au sein du milieu aquatique (mobilité, biodisponibilité) vont dépendre en grande partie de leur spéciation (Ure et Davidson, 2002). Ce dernier définit la spéciation par la « description des différentes espèces, formes ou phases sous lesquelles un élément est présent ». Les formes dissoutes libres et ioniques des ETM sont généralement considérées comme les formes les plus facilement disponibles pour les organismes vivants (Garnier, 2004). (Eggleton et Thomas, 2004)

précisent également que la toxicité est davantage en relation avec les concentrations en contaminants dans les eaux interstitielles qu'avec les concentrations sédimentaires.

Dans les sédiments, Les principales phases porteuses des ETM sont les silicates, les argiles, les oxydes et hydroxydes de fer et de manganèse, les phosphates, les carbonates, les sulfures et la matière organique (Figure 1.9).

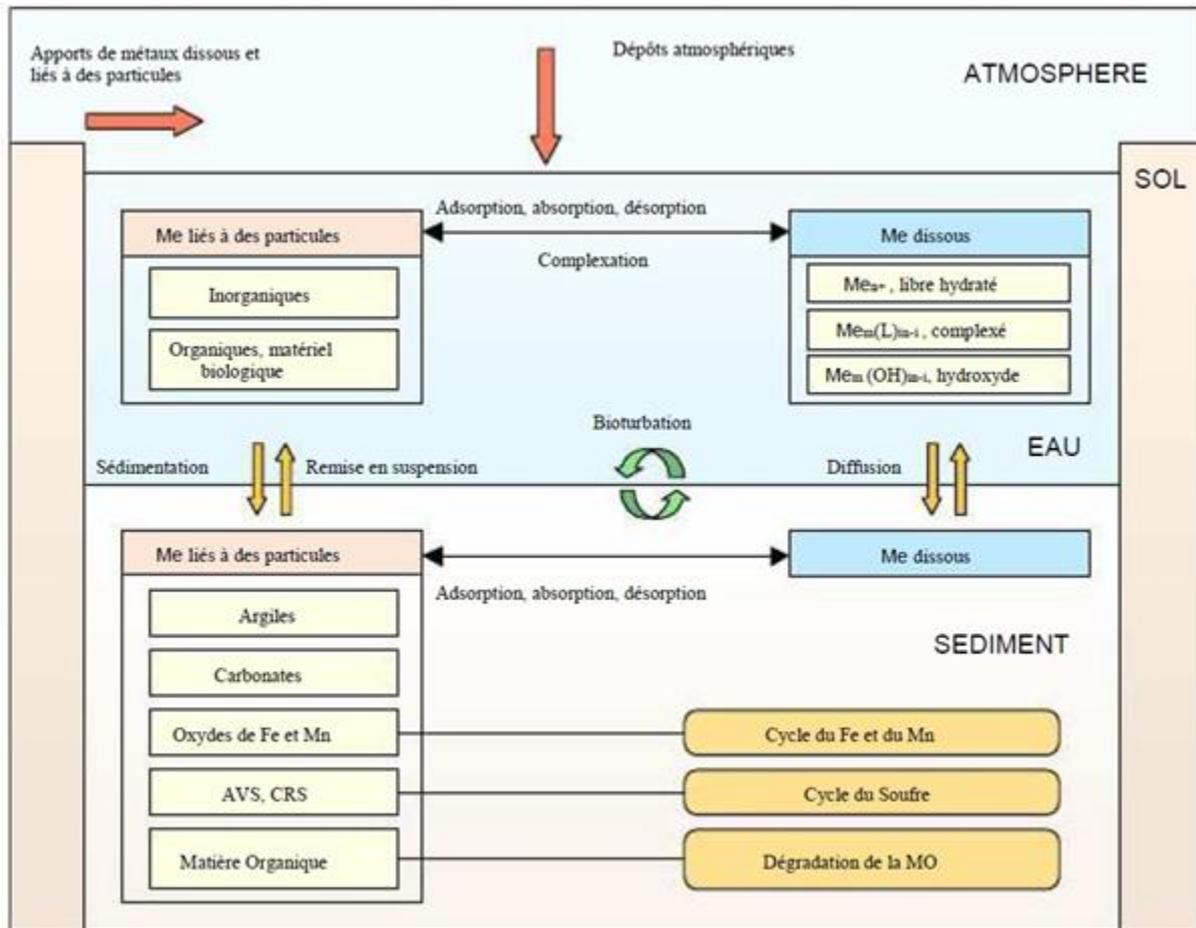


Figure 1.9: Mécanismes principaux affectant le devenir des éléments traces métalliques (Me) dans le milieu aquatique (Garnier, 2004)

Les argiles : Les minéraux argileux sont principalement des silicates d'aluminium hydratés. Ils présentent une structure en forme de feuillets (phyllosilicates) qui, conjointement à la petite taille des particules, confèrent aux minéraux argileux une charge superficielle négative et de très grandes surfaces spécifiques. Les éléments traces métalliques présentent une grande affinité pour les minéraux argileux (Farrah et al., 1980).

Les carbonates: De nombreux métaux, comme Zn, Pb, Cd, Ca, Ba et Cu, présentent une affinité pour les carbonates et peuvent précipiter et / ou co-précipiter sous cette forme (Quantin, 2001).

Les oxyhydroxydes de fer et de manganèse: L'accumulation de métaux traces sur les oxydes et hydroxydes de fer et de manganèse se produit également par adsorption et / ou co-précipitation (Miller J. et Orbock Miller, 2007). La surface spécifique de ces oxydes est en effet importante : généralement supérieure à 100 m²/g pour les oxydes de fer et comprises entre 30 et 300 m²/g pour les oxydes de manganèse (Quantin, 2001).

Les sulfures: L'affinité des métaux traces pour les ions sulfures a été classée par (DiToro et al., 1990) de la manière suivante : Hg > Cu > Pb > Cd > Zn > Ni.

Les sulfures métalliques présents dans les sédiments sont généralement répartis en deux catégories selon la technique d'extraction utilisée pour les mettre en solution :

- les AVS (acid volatile sulphides) sont les sulfures peu stables et réactifs extraits à froid par une solution molaire à hexamolaire d'acide chlorhydrique.
- les CRS (chromium reducible sulphur) sont extraits à chaud après ajout d'un réducteur (Cr²⁺).

La matière organique: La matière organique se caractérise par une surface spécifique très importante (> 800 m²/g) ainsi que par la présence de charges généralement négatives à sa surface (Quantin, 2001). Elle peut également être présente sous forme de revêtement sur les argiles et les oxydes métalliques, modifiant ainsi les propriétés de leur surface (Merdy et al., 2006). L'affinité des métaux vis à vis de la matière organique est variable, notamment du fait de l'hétérogénéité très importante de la matière organique, et varie en fonction des conditions physico-chimiques du milieu (Miller J. et Orbock Miller, 2007).

1.7 *Caractérisation environnementale*

La valorisation de sédiments marins de dragage, assimilés à des déchets lors de leur extraction du milieu marin, nécessite une évaluation environnementale avant leur utilisation dans le domaine routier. En effet, le niveau de dangerosité du matériau peut limiter ses possibilités de réutilisation, à titre d'exemple, un déchet qui serait dangereux ne peut trouver sa place dans un profil routier potentiellement drainé par les eaux d'infiltration.

L'évaluation de l'acceptabilité environnementale avait été un sujet de débats de groupes de travail en France en vue de mettre en place un guide méthodologique pour l'acceptabilité des matériaux alternatifs en techniques routières (Figure 1.10). Ceci a eu lieu avec l'apparition de

la version définitive en Novembre 2010 intitulée « Acceptabilité de matériaux alternatifs en techniques routières – Evaluation environnementale ». Ce guide est destiné aux professionnels des travaux publics, aux services de l'état, aux bureaux d'études et aux industriels qui souhaitent étudier les possibilités de valorisation des déchets. Sa mise en œuvre est réservée aux matériaux alternatifs dont la fonction utile en technique routière a été préalablement justifiée, par exemple, du fait de propriétés mécaniques conformes aux normes de spécifications d'usage en vigueur. Cette exigence est primordiale afin de ne pas faire de la route un substitut de la mise en décharge.

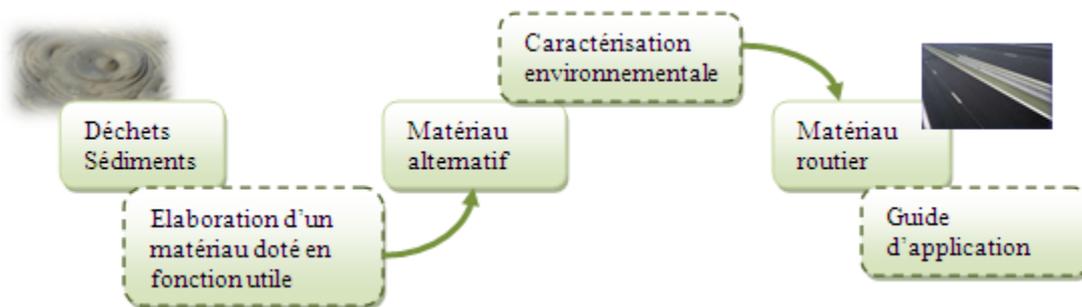


Figure 1.10: Processus d'évaluation environnementale pour une valorisation en technique routière
(Abriak et Al., 2012)

Notre objectif est de mettre en pratique ce guide afin d'évaluer l'acceptabilité environnementale des matériaux alternatifs élaborés à partir des sédiments marins de dragage. La caractérisation environnementale du matériau alternatif envisage trois niveaux d'investigations permettant de graduer l'effort de démonstration en fonction du risque que présentent les matériaux concernés, vis-à-vis de l'environnement (SETRA, 2012) :

- **Niveau 1** : repose sur la réalisation d'essais de lixiviation et d'analyses en contenu total, il permet de fournir des informations sur la variabilité et justifier l'acceptabilité en technique routière des matériaux ;
- **Niveau 2** : permet de justifier l'acceptabilité en technique routière sur la base d'essais de percolation si le niveau 1 n'est pas validé ;
- **Niveau 3** : se base sur une étude spécifique si les conditions n°1 et n°2 n'ont pu être validées. Cette acceptabilité environnementale des sédiments ouvre ensuite sur des études géotechniques et environnementales de stabilisation/solidification à base de liants hydrauliques en laboratoire.

Pour conclure, un niveau de validation est ensuite requis. En effet, si les performances géotechniques du matériau traité permettent de déclarer son aptitude à une utilisation en

techniques routières, la valorisation ne peut être effective que s'il est démontré que le matériau alternatif formulé est écologiquement viable.

Les premiers niveaux d'évaluation environnementale intègrent une analyse de la fraction organique totale et de la fraction soluble à l'eau des matériaux bruts et des matériaux alternatifs. Avant la publication du guide, les travaux de recherche visant à démontrer le potentiel de valorisation des sédiments de dragage s'intéressaient à la fraction soluble à l'eau, avant traitement et après traitement (Brakni, 2008 ; Nguyen, 2008).

1.7.1 Caractérisation environnementale niveau 1

Ce niveau de caractérisation est le minimum, obligatoire pour les matériaux alternatifs et routiers, il permet de démontrer, sur la base de l'essai de lixiviation, que les émissions de ces matériaux sont compatibles avec le respect des objectifs de qualité des eaux retenues.

Les résultats de lixiviation sont comparés aux valeurs seuils présentées dans le guide (SETRA, 2012).

L'acceptabilité du matériau alternatif est validée lorsque tous les résultats de lixiviation sont inférieurs ou égaux aux valeurs seuils du guide. En cas d'un seul dépassement, l'acceptabilité est donc invalidée. Il convient donc d'envisager la réalisation de la caractérisation environnementale de niveau 2.

1.7.2 Caractérisation environnementale niveau 2

En fonction du niveau de risque que peuvent présenter les matériaux alternatifs vis-à-vis de l'environnement, il peut être envisagé de lancer la caractérisation environnementale de niveau 2, si le niveau 1 n'est pas respecté. Néanmoins, le niveau 2 reste tout de même facultatif.

En ce qui concerne le niveau 2, l'acceptabilité du matériau alternatif est validée sur la base de l'essai de percolation selon la norme NF CEN/TS 14405 en comparant les résultats aux valeurs seuils présentées dans le guide (SETRA, 2012).

1.7.3 Caractérisation environnementale niveau 3

Dans l'hypothèse où les niveaux de caractérisation environnementale précédents ne permettent pas de justifier l'acceptabilité en technique routière du matériau alternatif, le guide méthodologique laisse la possibilité de justifier leur acceptabilité en technique routière sur la base d'une étude spécifique.

Cette étude spécifique est élaborée à l'initiative des principales fédérations professionnelles concernées, ou à défaut par l'exploitant d'une installation classée, et validée par le ministère en charge du Développement Durable, avec l'appui éventuel des organismes publics de son réseau scientifique et technique ou placés sous sa tutelle, en concertation avec des représentants de la maîtrise d'ouvrage et des associations de protection de l'environnement.

Le choix des investigations à entreprendre est laissé libre sous réserve que :

- L'étude de l'altération du matériau et de l'émission des polluants soit menée selon les prescriptions de la norme méthodologique NF EN 12920+A1 ;
- Le devenir des polluants émis par l'ouvrage via leur transfert dans le sol et dans la nappe ainsi que leurs effets sur la cible « eau » soient étudiés afin de montrer que l'usage routier envisagé permet d'assurer un niveau de protection de l'environnement au moins équivalent à celui assuré par la modélisation prédictive.

1.8 Valorisation de sédiments en Génie Civil

Dans le contexte de Développement Durable, la gestion des sédiments dragage portuaire doit être gérée sous certaines conditions de faisabilité technico-économique et environnementale. La gestion des sédiments de dragage portuaire est limitée principalement à la mise en dépôt à terre en vue de stockage ou de valorisation.

Actuellement, en présence des réglementations très sévères pour la protection de l'environnement. Les recherches réalisées ces dernières années s'orientent de plus en plus vers la valorisation des sédiments de dragage pour l'utilisation comme matériaux de construction, également vers l'adaptation de la valorisation dans les projets de gestion des sédiments (Damidot, 2006). En fonction des caractéristiques physico-chimiques, géotechniques, mécaniques et environnementales des sédiments de dragage, la valorisation de ces matériaux peut être utilisée dans plusieurs domaines tels que la technique routière, le béton, les granulats artificiels, éco-modelé paysagère, les briques, l'aménagement de sites naturels.

1.8.1 Valorisation de sédiments de dragage en technique routière

En France, environ 400 millions de tonnes de granulats consommés par an. Le domaine d'infrastructure consomme près de 80 % de granulats et 20 % dans la construction de bâtiments. Plus de 96 % de ces granulats proviennent essentiellement des gisements terrestres (UNICEM, 2009) d'où l'intérêt de chercher d'autres ressources de granulats.

Le domaine de construction routier est le plus grand consommateur des granulats en France, par conséquent l'utilisation des quantités importantes des sédiments générées chaque année en travaux routiers est une solution intéressante pour contribuer à la gestion durable des sédiments et à la préservation de ressources naturelle en granulats. Sachant que les sédiments sont considérés comme des déchets, pour leur utilisation en Génie Civil, on doit s'assurer qu'ils ne présentent pas de risques pour l'environnement et la santé humaine. Une étude de caractérisation physique, géotechnique, mécanique et environnementale des sédiments est indispensable pour permettre leur utilisation en technique routière.

Plusieurs études ont montré la faisabilité de valorisation des sédiments marins ou fluviaux en technique routière. Mines Douai et ces partenaires ont abouti en 2005, à travers des recherches réalisés sur ces matériaux, à la réalisation d'une route expérimentale à base de sédiments marins dont le but est de valider les études menées au laboratoire, de vérifier la faisabilité in-situ et de réaliser un suivi mécanique et environnementale de cette route. En 2013 (Achour, 2013), Mines Douai et ces partenaires ont aboutit à la réalisation de la route du Freycinet 12 (Figure 1.11), d'une longueur de 600 m à base de sédiments marins de dragage du Grand Port Maritimes de Dunkerque (GPMD).



Figure 1.11 : Mise en œuvre de la route du Freycinet 12 à base de sédiments de dragage du GPMD

1.8.1.1 Méthodologie de valorisation de sédiments en technique routière

Le laboratoire de Génie Civil et Environnemental de l'Ecole des Mines de Douai s'est investi depuis quelques années dans le domaine de valorisation des sédiments, plus particulièrement en technique routière. L'utilisation de ces matériaux nécessite, en plus d'une maîtrise des impacts environnementaux, une bonne connaissance du comportement physico-mécanique.

Le laboratoire a ainsi développé une méthodologie pour assurer la valorisation des sédiments dragués dans le domaine des travaux routiers qui se décompose en trois étapes (Zentar et al., 2005) :

A - Une étape de caractérisation des sédiments bruts qui inclut l'identification des caractéristiques mécaniques, physico-chimiques et minéralogiques des sédiments bruts.

Elle comprend également l'étude de leur impact potentiel sur l'environnement.

B - Une étape de formulation du matériau routier qui a pour rôle l'amélioration des performances mécaniques des sédiments bruts pour atteindre les performances souhaitées. Elle inclut une phase de caractérisation des matériaux d'ajouts utilisés et l'étude de la formulation du matériau routier.

C - Une étape de validation qui comprend la validation des caractéristiques mécaniques et l'étude des incidences sur l'environnement du matériau formulé.

D'autres méthodologies ont été développées dans ce cadre, à titre d'exemple, la méthodologie SETARMS (Sustainable Treatments and Reuse of Marine Sediment) de caractérisation et de traitement des sédiments de dragage marin. Elle repose également sur trois étapes, la première consiste à caractériser les sédiments et à les classer d'un point de vue géotechnique et géochimique selon les réglementations et les guides en vigueur. La deuxième étape correspond au traitement aux liants hydrauliques afin de dégager des tendances et des corrélations entre les propriétés géotechniques et géochimiques d'un côté et l'aptitude au traitement aux liants hydrauliques et donc à la valorisation de l'autre côté. La dernière étape consiste à choisir les sédiments éligibles aux formulations finales et aux tests in situ sur planches expérimentales.

Pour utiliser les sédiments en technique routière, il est nécessaire de connaître ses propriétés physiques, afin de le classer parmi les différents matériaux-types répertoriés au (GTR, 1992).

Le guide des terrassements routiers classe les matériaux selon leur (Figure 1.12) :

- Granulométrie (graviers à éléments fins) ;
- Fraction argileuse (Eléments fins), la dégradabilité (Eléments grossiers) ;
- Teneur en eau ;
- Certaines caractéristiques spécifiques comme la matière organique.

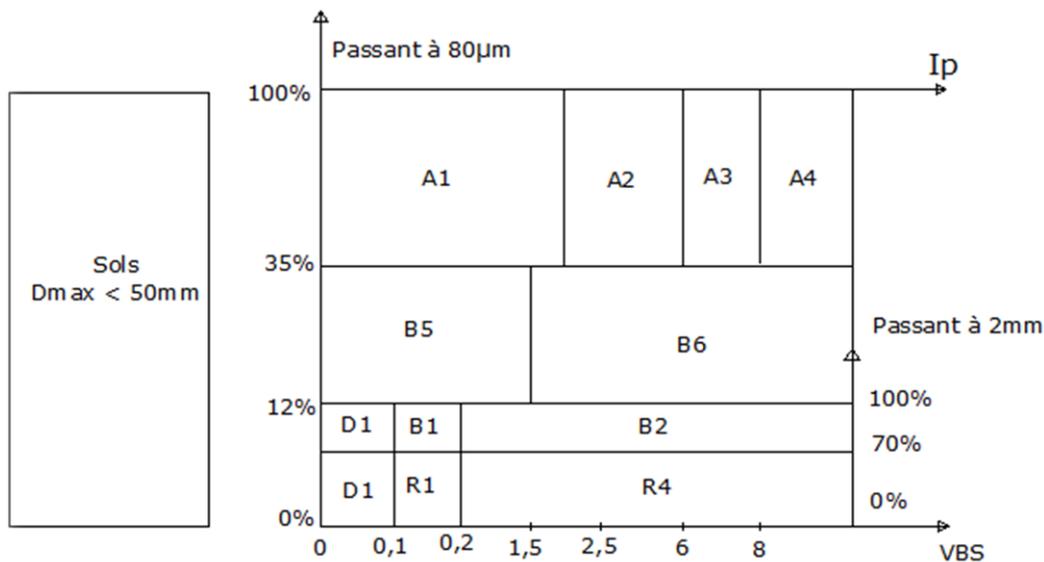


Figure 1.12: Classification des matériaux selon leur nature (GTR, 1992)

Dans un deuxième temps, les sols sont ensuite classés selon leur état hydrique, de l'état très sec à l'état très humide. Une fois les sols classés suivant leur nature et leur état hydrique, le GTR fournit les recommandations pour l'utilisation de ces sols en remblais et en couche de forme, suivant les conditions météorologiques rencontrées. Une fois ces recommandations faites et selon la classe de la partie supérieure de terrassement, le GTR préconise notamment une épaisseur de couche de forme, et l'énergie de compactage à apporter suivant les types d'engins envisagés sur le chantier.

Les sols possèdent des comportements différents suivant leur nature et leur état hydrique. Pour mieux appréhender le comportement des sols en terrassement, ils ont été classés à partir de l'identification de différents paramètres qui reprend de manière simplifiée les caractéristiques des sols et illustre leur complexité et diversité. Le GTR donne des recommandations pour pouvoir utiliser tel ou tel sol en remblais ou en couche de forme. Mais certains sols sous certaines conditions sont exclus en l'état par le GTR pour les travaux de terrassement. C'est la raison pour laquelle une des solutions préconisées par le GTR est de traiter ces sols à la chaux et / ou au liant hydraulique.

La détermination d'une teneur en eau optimale, propre au matériau, est nécessaire et reste le paramètre de référence lors de l'évaluation du critère de portance. Cette teneur en eau est obtenue par l'essai Proctor normal ou modifié, permettant d'obtenir la masse volumique sèche optimale correspondante au meilleur arrangement des particules pour un volume de matériau donné ainsi que l'Indice Portant Immédiat (IPI) à optimum Proctor. Cet indice permet

d'apprécier la traficabilité du matériau et il est utilisé pour caractériser l'état hydrique du matériau. Les valeurs obtenues de l'indice IPI doivent encadrer la valeur seuil recherché pour la couche concernée (Figure 1.13).

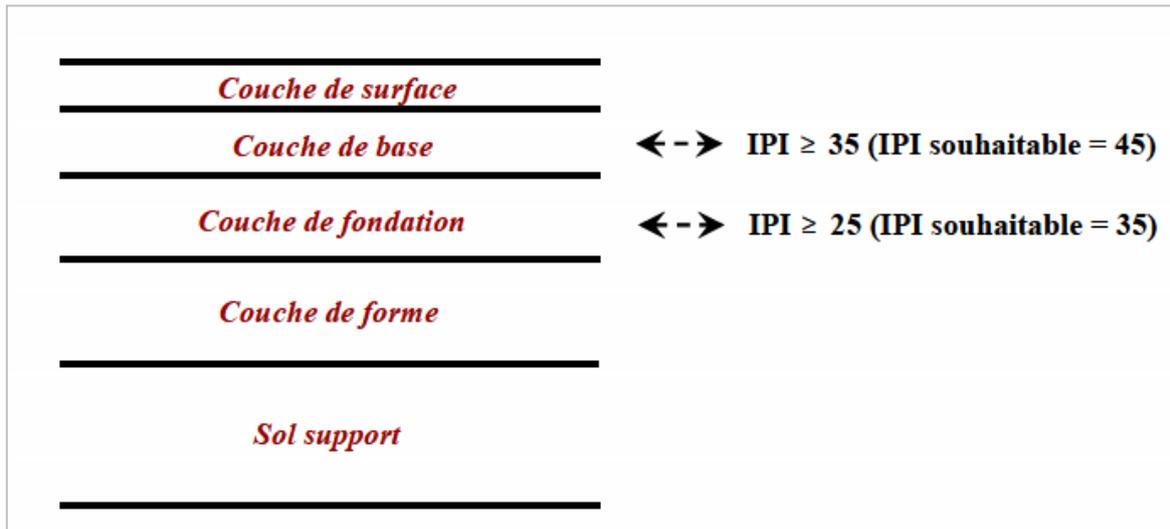


Figure 1.13 : Critère de l'IPI pour les différentes couche de la chaussée [Norme NF P 98 115]

Pour les couches d'assise, il est nécessaire de connaître le comportement du matériau sous les sollicitations du trafic. Ainsi, les résistances à la compression diamétrale (R_{it}) et les modules d'élasticité (E) sont mesurés sur des éprouvettes de matériau dont la dimension est fonction de la dimension du plus gros granulat (éprouvettes 16×32 cm pour les sables grossiers, et 5×10 cm pour les sables fins et moyens) (NF P 98 114 2). En effet, le passage d'un véhicule sur les couches de matériaux entraîne des sollicitations de type charge-décharge. Le matériau doit donc avoir une résistance minimale en traction, et être capable de se déformer sans rupture.

Habituellement, les essais en laboratoire sont réalisés à des échéances réduites de 28, 60, 90 et 360 jours selon le type de liant utilisé.

L'appréciation des performances mécaniques de matériaux à long terme nécessite de déterminer le module d'élasticité (E) et la résistance à la traction (R_t) à 360 jours afin de classer le matériau suivant différentes zones de l'abaque (Figure 1.14). La norme française [norme NF P 98 113] a cité 6 classes de S0 à S5. Elle a également recommandé que, pour être utilisable en couche d'assise de chaussée, les matériaux doivent être classés au minimum en classe S2.

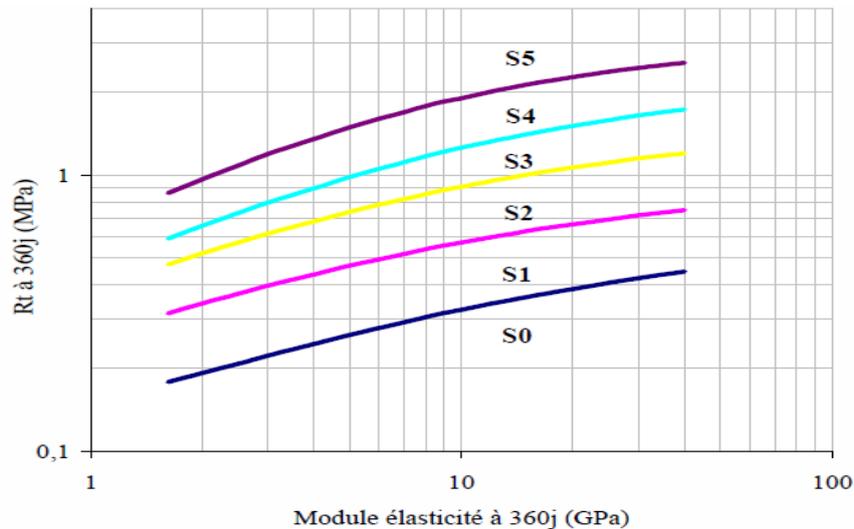


Figure 1.14 : Classification de matériaux traités aux liants hydrauliques [Norme NF P 98 113]

1.8.1.2 Traitement aux liants hydrauliques des sédiments de dragage portuaire

Le choix du mode de traitement dépend du type de sédiments. Afin d'optimiser leur comportement, les liants hydrauliques sont les plus utilisés pour la stabilisation des sédiments.

L'utilisation des sédiments en technique routière, obéit à certaines exigences, d'un point de vue mécanique, ces améliorations se traduisent par une augmentation de la résistance à la compression et au cisaillement, à l'amélioration de l'Indice de Portance Immédiat IPI ou de l'indice I_{CBR} , par ailleurs, le traitement par le liant hydraulique des sédiments de dragage portuaire présentant des grandes teneur en eau ne peut être effectué qu'après réduction de celle-ci par un processus d'hydratation (Boutouil, Saussaye, 2011).

a) Traitement au ciment

Le liant hydraulique ou ciment est constitué principalement de clinker, qui résulte à partir d'un mélange de 80 % de calcaire et 20 % d'argile et issue de la cuisson à haute température de 1450 °C (Deschamps, 2006). Les principaux composants anhydres obtenus lors de refroidissement rapide clinker sont :

- Silicate tricalcique $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (**C₃S**) (50-70 % du clinker) ;
- Silicate bicalcique $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (**C₂S**) (10-30 % du clinker) ;
- Aluminate tricalcique $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (**C₃A**) (2-15 % du clinker) ;
- Alumino-ferrite tétracalcique $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (**C₄AF**) (5-15 % du clinker).

L'hydratation du ciment est un processus très complexe du fait que ces réactions qui se déroulent simultanément à des cinétiques différentes et peuvent contribuer au durcissement et

au solidification/stabilisation. L'utilisation de liant hydraulique permet de piéger, de fixer et rendre moins mobiles les polluants par plusieurs mécanismes : précipitation, sorption, insertion, piégeage mécanique (Cazalet, 2012 ; Deschamps, 2006). En revanche, plusieurs chercheurs montrent que les métaux lourds et les matières organiques ont une influence sur les mécanismes et la cinétique de l'hydratation, ainsi que sur les résistances mécaniques des matériaux (Mezazigh, 2010 ; Diet, 1996).

Les essais de performances mécaniques sont souvent longs à mener, l'aptitude d'un sol au traitement envisagé doit être rapidement déterminée. L'essai d'aptitude au traitement, décrit dans la norme NF P 94-100, a pour le but d'assurer dans un délai relativement court que le matériau compacté présente une stabilité dimensionnelle par la mesure du gonflement et de la résistance en traction indirect, qui se détermine en fonction du produit utilisé pour le traitement. Le Tableau 1.5 présente les différentes valeurs de référence permettent d'apprécier l'aptitude du matériau au traitement.

<i>Type de traitement</i>	<i>Aptitude du sol</i>	<i>Paramètre considéré</i>	
		Gv Gonflement Volumique (%)	Résistance en traction indirecte Rit (MPa)
<i>Traitement avec un liant hydraulique éventuellement associé à la chaux</i>	Adapté	≤ 5	$\geq 0,2$
	Douteux	$5 \leq GV \leq 10$	$0,1 \leq Rit \leq 0,2$
	Inadapté	≥ 10	$\leq 0,1$

Tableau 1.5: Critères d'évaluation d'aptitude d'un sol à être traité aux liants hydrauliques (NF P 14-100)

b) Ajout de correcteur granulaire

L'ajout de correcteur granulométrique aux sédiments a pour but d'augmenter la compacité de ces matériaux et d'améliorer leurs performances mécaniques afin de les utiliser comme matériaux de construction. Généralement, les sédiments contiennent une proportion importante de fines, de teneur en eau, de matières organique et des polluants. L'ajout d'un correcteur granulaire peut contribuer à l'atténuation de ces paramètres ainsi qu'à l'amélioration du squelette granulaire du matériau permettant ainsi d'obtenir une compressibilité plus faible et une résistance mécanique plus élevée (Boutouil et al., 2001). Plusieurs recherches réalisées sur la valorisation du sédiment incluent la faisabilité d'utiliser un correcteur granulaire contribuant ainsi à la l'amélioration des performances mécaniques en complément du traitement aux liants hydrauliques. (Achour, 2013) ; (Maherzi, 2013) ; (Liang,

2012); (Miraoui, 2010); (Tran, 2009); (Dubois, 2006); (Colin, 2003); (Boutouil et al., 2001); (Boutouil, 1998).

1.8.2 Valorisation de sédiments de dragage en brique

En France, environ de 50 Mm³ des sédiments dragués chaque année, ces matériaux peuvent représenter une source de matières premières importante, notamment pour la fabrication des matériaux de construction. En fonction des caractéristiques physiques des sédiments, la valorisation des sédiments dans les matériaux de construction peut concerner le matériau brut ou le matériau après un prétraitement ou un traitement. A titre d'exemple, les sédiments fins peuvent remplacer une proportion d'argile naturelle dans la production des briques ou dans la fabrication de granulats artificiels et les sédiments sableux peuvent être utilisés dans la fabrication de béton.

Des travaux de recherche de Ben Allal et al., (2011) ont démontré la faisabilité technologiques des briques renfermant les sédiments de dragage des ports de Tanger et de Larache. Ces briques ont les dimensions 2,5 x 5 x 7,5 cm et la composition retenue est de 70 % de sédiment (Figure 1.15). De plus, les travaux de Samara (2007) ont démontré la faisabilité d'incorporation des sédiments fluviaux traités par le procédé NOVOSOL dans la production des briques. Pour ces briques de dimensions 22 x 22 cm, 15 % de sédiment traité ont été introduits dans le mélange en substitution du sable de Templeuve (Figure 1.16). Un gain de résistance à la compression de 63,6 % a été obtenu par rapport à la brique standard de Templeuve. En revanche, le retrait des briques à base de sédiment traité est supérieur à celui de la brique standard de Templeuve.

L'Ecole Centrale de Lille a réalisé à Templeuve avec l'aide de Solvay, les Briqueteries du Nord et Ramery, un petit bâtiment test de 20 m² qui utilise des briques intégrant 20 % de sédiments fluviaux traités par le procédé NOVOSOL. Le bâtiment test va permettre d'analyser les capacités de la brique en situation réelle. Cette brique de 22x22 cm possède une résistance thermique plus élevée qu'une brique standard (0,23 m².K/W contre 0,19 m².K/W).

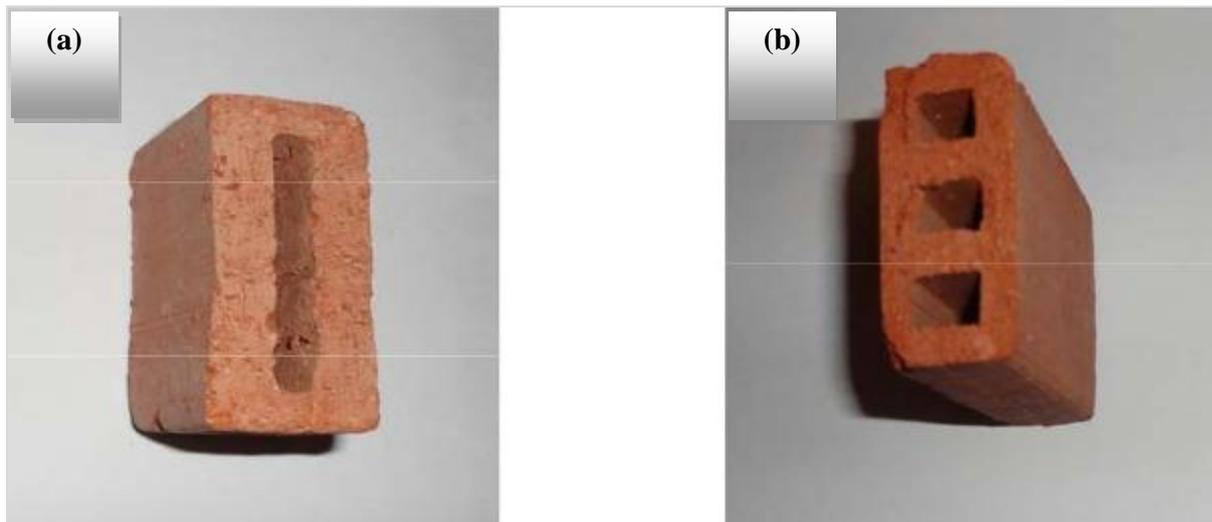


Figure 1.15 : Briques 2,5x5x7,5 cm fabriquées avec un taux de substitution de 70 % de sédiments de Larache (a) et de Tanger (b)



Figure 1.16: Briques 22x22 cm produites avec un taux de substitution de 15 % de sédiment fluvial traité

1.8.3 Valorisation de sédiments de dragage en béton

Zri et al., (2009) ont étudié la possibilité de valorisation de sédiments de dragage portuaire dans la production des bétons de sable. L'étude consistait à trouver un mélange optimal possible entre le sable de dragage et le sédiment du Grand Port Maritime de Dunkerque (GPMD) et un ou plusieurs ajouts permettant d'atteindre des caractéristiques mécaniques satisfaisantes. Le sable de dragage et le sédiment étudiés proviennent du port de Dunkerque. Les résultats de cette étude ont montré la faisabilité de valorisation du sable de dragage et du sédiment GPMD dans le béton de sable. Ce béton présente des résistances mécaniques intéressantes, supérieures au béton témoin, et peuvent atteindre jusqu'à 41 Mpa.

Belas et al., (2011) ont étudié la faisabilité de valorisation de sédiments de dragage du barrage de Fergoug en substituant une partie de ciment en vue d'obtenir un ciment composé entrant dans la composition des bétons. Les sédiments de dragage ont été séchés à 50 °C, concassés et réduits en poudre à l'aide d'un broyeur ensuite tamisés au tamis de 80 µm et calcinés à 750 °C pendant 5 heures pour les rendre active. Quatre bétons ont été formulés contenant différents pourcentages de sédiments calcinés (0, 10, 15, 20 %) par rapport à la masse du ciment. Les résultats de cette étude ont montré que les résistances mécaniques des bétons à base de 0, 10 et 15 % de sédiment restent très proches. Quant au béton contenant 20 %, ses résistances évoluent de manière ascendante à moyen terme, et probablement il continuera son ascension à long terme. L'intérêt majeur qui a été à l'origine de cette étude est la possibilité de remplacer partiellement un matériau industriel (ciment) par un matériau naturel (Sédiment de Fergoug) permettant ainsi d'obtenir des bétons très bon marché et qui résoudrait le problème de la cherté du ciment et du stockage de sédiments.

Les travaux de recherche d'Achour (2013) porte sur la caractérisation et l'identification par des essais destructifs et non destructifs de deux types de béton à base de sédiments de dragage, suivie d'une étude spécifique de leur durabilité. Les bétons étudiés ont été développés pour la fabrication de blocs pour la protection d'ouvrages marins. Deux blocs bétons intégrant 12,5 % et 20 % de sédiment marin ont été utilisés pour mener cette étude. Une campagne de carottage des deux blocs a été réalisée conformément à la norme NF EN 12 504-1. Après carottage, les éprouvettes $\Phi 11 \times 22$ cm ont été sciées et préparées pour les essais (Figure 1.17).

Les résultats de ces travaux montrent que le béton à 12,5 % présente des performances mécaniques plus élevées que celui de 20 %. L'augmentation du taux d'incorporation du sédiment dans le béton à 20 % a rendu la carotte plus déformable, une diminution de module d'élasticité statique de l'ordre de 4 GPa a été constatée ; cette diminution peut s'expliquer par le changement de la microstructure ainsi que l'augmentation de la porosité et de l'hétérogénéité du béton à 20 % par rapport à celles de 12,5 %. Il est également constaté que l'augmentation du taux d'incorporation du sédiment est accompagnée d'une augmentation de la porosité du béton. Le béton à base de 12,5 % de sédiment présente de bonnes performances mécaniques et microstructurales et révèle des qualités comparables à un béton ordinaire.



Figure 1.17: Campagne de carottage des blocs bétons à base de sédiments marins

1.8.4 Valorisation de sédiments de dragage en granulats artificiels

La croissance des besoins en granulats à l'échelle européenne est liée à une demande de plus en plus forte en matériaux pour les constructions et les infrastructures (UEPG, 2013). Les contraintes environnementales réduisent les possibilités d'exploitation des gisements terrestres traditionnellement exploités et nécessitent de développer des filières de recyclage de matériaux et d'utiliser des matériaux de substitution. La transition vers une économie plus durable passe tout d'abord par une réduction de la consommation de matières premières à production équivalente. En 2012, la production de granulats en France métropolitaine est estimée à 360 millions de tonnes, en baisse de 5,01 % par rapport en 2011. Entre 2007 et 2010, la production est passée de 446 millions de tonnes à 365 millions de tonnes, soit une baisse de 18 %. Néanmoins en 2011, on enregistre un rebond de 3,6 % par rapport à 2010 (Figure 1.18).

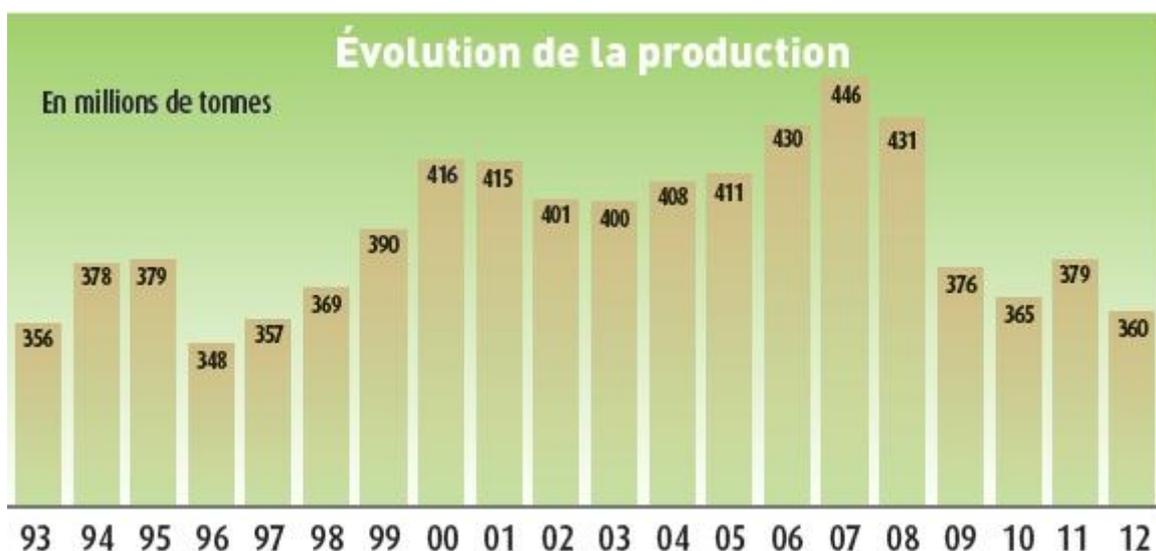


Figure 1.18 : Production de granulats en France métropolitaine (UNGP, 2012)

Les carrières sont soumises à la législation des installations classées pour la protection de l'environnement. Leurs impacts sur l'environnement sont nombreux et s'étudient aux différents stades de vie de la carrière : au moment de l'implantation du site d'extraction, ses conditions d'exploitation puis la remise en état finale du site. Ils portent particulièrement sur les paysages, la biodiversité, les milieux aquatiques, les nuisances pour les riverains.

Les granulats artificiels peuvent être fabriqués au moyen de deux processus: granulation à base de ciment et de frittage à haute température. Celui-ci a été largement étudié et dans la littérature il existe de nombreux rapports d'applications dans lesquelles de nombreux déchets se sont révélés avoir un potentiel pour une utilisation comme matière première: les cendres volantes de combustion et incinérateurs municipaux de déchets solides, des scories métallurgiques, de la poussière de four, site minier et des carrières, les sédiments, les déchets broyés, etc ((Cheeseman & Viridi, 2005), (Cheeseman, et al., 2005), (Pioro & Pioro, 2004), (Van der Sloot, et al., 2001), (Wang, et al., 2002) et (Zakaria & Cabrera, 1996)). D'autre part, bien que les procédés de granulation à base de ciment n'ont pas encore été étudiés aussi profondément, leur aptitude à la fabrication des granulats artificiels est sans aucun doute digne de considération. Tout d'abord, il est bien connu que le traitement des déchets (souvent dangereux) repose en grande partie sur les processus de stabilisation/solidification à base de ciment permettant l'élimination et/ou la valorisation de la matière pour la fabrication de matériaux de construction ((Means, et al., 1995), (Spence & Shi, 2005)). En outre, l'application de ces procédés présente des avantages économiques et environnementaux en raison de l'exigence d'énergie réduite (procédé mis en œuvre à la température ambiante) et de l'absence de pollution secondaire (pas de dégagement gazeux).

Les travaux de recherche de Bui Le Anh et al. (2013) ont montré la possibilité de production de granulats légers à partir des boues de la station d'épuration locale à Taiwan et de déchets de verre pour une utilisation dans l'industrie béton. Une machine spéciale de granulation a été utilisée. Il y avait deux étapes principales pour former les granulats dans le processus de la machine. Tout d'abord, la pâte, y compris les boues d'épuration et de déchets de verre (30 à 50 %) a été introduite dans un système de corrélation de cette machine. Des granulés cylindriques avec environ 0,6 à 1 cm de diamètre et de 30 à 50 cm de longueur ont été formés lors de cette étape. Deuxièmement, les granulats cylindriques ont été introduits dans un autre système pour fabriquer des granulats sphériques (Figure 1.19). Les températures de frittage utilisées comprises entre 800 et 1100 °C. Par ce procédé, 5 kg granulats pourraient être produits pendant 0,5 h. Les propriétés de ces granulats sont : une densité inférieure à 2

g/cm^3 , une absorption d'eau inférieure à 10 % et une résistance à la compression à 28 jours du béton léger réalisé de 49,46 MPa.

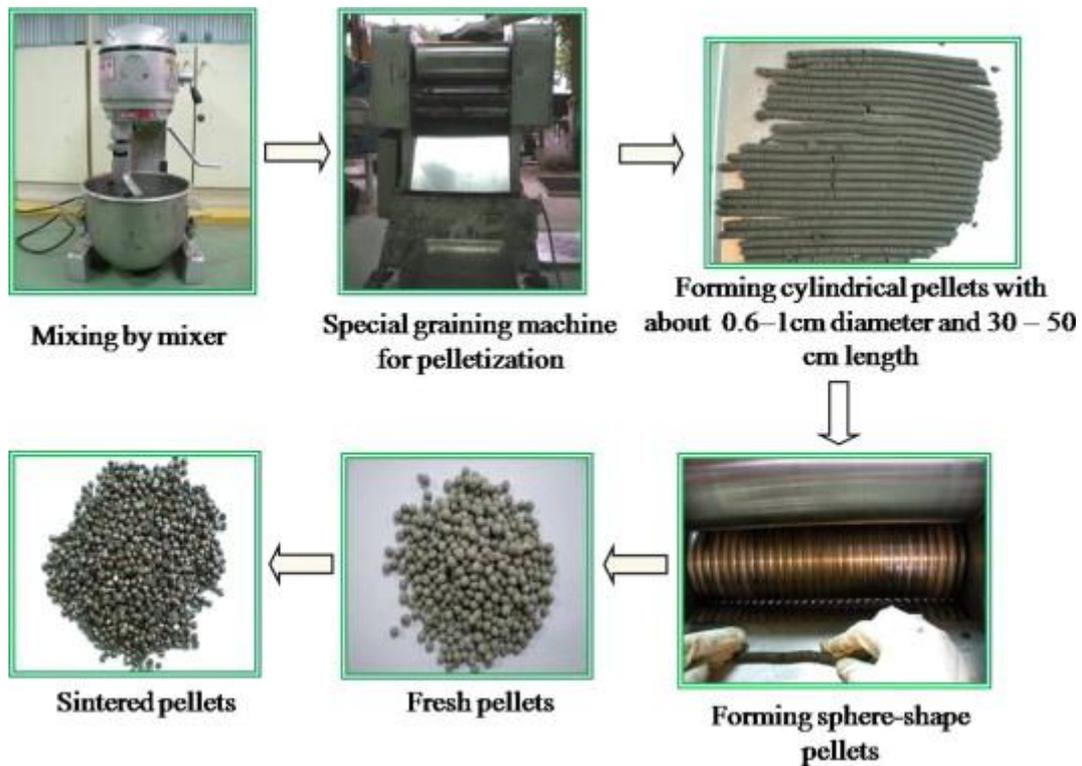


Figure 1.19 : Processus de fabrication de granulats légers à base de boues d'épuration et déchets de verre

Cioffi (2009) a utilisé l'assiette granulatrice pour produire les granulats légers (Figure 1.20). Les mélanges ont été composés de résidus provenant d'une usine d'incinération dans le Sud de l'Italie et traités par différents pourcentage de liants hydraulique, de la chaux et de cendre volante. Les résultats ont montré que les différents liants hydrauliques peuvent être utilisés pour la production de granulats. Néanmoins, le traitement au ciment donne des propriétés technologiques satisfaisantes dans le domaine de l'agrégat léger. Le coefficient d'absorption dépend de la nature de liant, il augmente lorsque la teneur en liant diminue. En fait, la valeur maximale évaluée à 13,46 % est 21 % plus élevée que le minimum de 11,13 %. Les densités des granulats se situent entre 1170 et 1330 kg/m^3 ce qui classe les granulats obtenus dans cette étude comme granulats léger. En effet, selon la norme NF EN 13055-1, la valeur de la densité nécessaire pour un tel classement doit être comprise entre 500 et 2000 kg/m^3 . Les mesures de densité montrent également que la densité diminue à mesure que la teneur en liant diminue.



Figure 1.20 : Assiette granulatrice utilisée pour la production de granulats artificiels

Dans le cadre de la valorisation des sédiments de l'Avant-port Ouest de Dunkerque, les travaux de Brakni (2008) ont fait l'objet de la confection de granulats artificiels afin de répondre au problème de l'érosion littorale due essentiellement à un déficit en sédiments. Ces granulats artificiels permettraient ainsi d'assurer les rechargements des côtes érodées. Le procédé de fabrication concerne des mélanges à base de sédiments bruts et de liant hydraulique à différents pourcentage. Après l'homogénéisation du matériau dans un malaxeur à haute énergie, lors de la préparation des mélanges, le matériau est introduit dans une extrudeuse à piston. La terminaison en filière permet, sous une pression donnée, l'obtention de boudins à partir desquels sont façonnés les granulats (Figure 1.21).

La caractérisation physique de ces granulats révèle une porosité intergranulaire élevée (50-65 %) et une densité apparente de l'ordre de 1,2 à 1,4 kg/m³, ce qui en fait des granulats artificiels légers. La valeur du coefficient d'absorption est de l'ordre de 40 à 50 %.

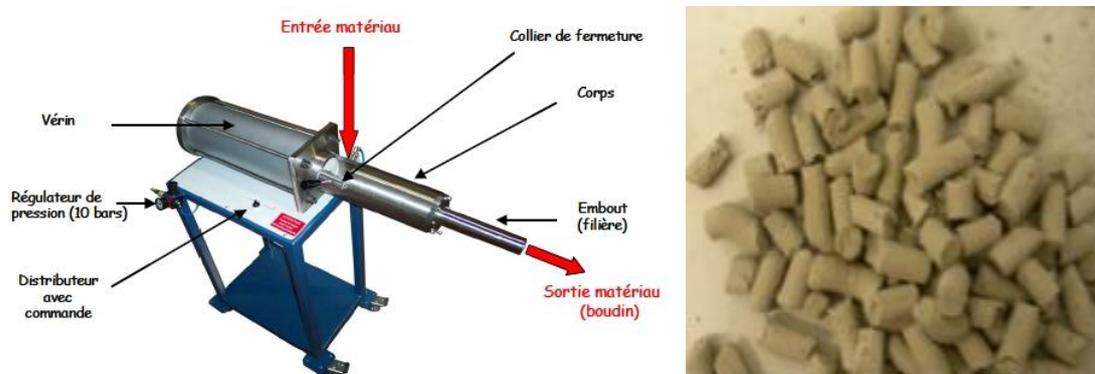


Figure 1.21 : Extrudeuse à piston utilisée pour la production de granulats à base de sédiments de dragage

1.8.4.1 Fabrication de granulats par Assiette granulatrice

1.8.4.1.1 Principe général

Ce type d'appareil à granulation fonctionne en général en mode continu. La granulation se fait par roulement ce qui permet également une classification par ségrégation centrifuge des granulats. La distribution granulométrique des granulats est ainsi serrée et leur forme bien sphérique. Une classification ultérieure devenant donc inutile, le gain de temps est considérable. Les granulateurs à plateau tournant ont connu leur plus grand essor à partir des années 1940 dans l'industrie du ciment et des céramiques (Figure 1.22).

L'équipement traditionnel est constitué d'un plateau circulaire à rebord, de faible hauteur relative ($H/D < 0,2$), tournant autour de l'axe central incliné de 30° à 70° par rapport à l'horizontale. L'inclinaison et la vitesse du plateau sont réglées de manière à permettre au produit pulvérulent de bien s'étaler sur le plateau et à assurer un roulement convenable des granulats. Les particules sont chargées dans le plateau et l'agent de granulation est dispersé, en continu ou de manière séquentielle, sur les particules en mouvement. La position des points d'alimentation de la poudre et du liant doit être choisie et optimisée en fonction des caractéristiques requises pour les granulats. L'ajout du liquide mouillant conduit à la formation des granulats par différents mécanismes : la nucléation, la coalescence et le recouvrement en surface.

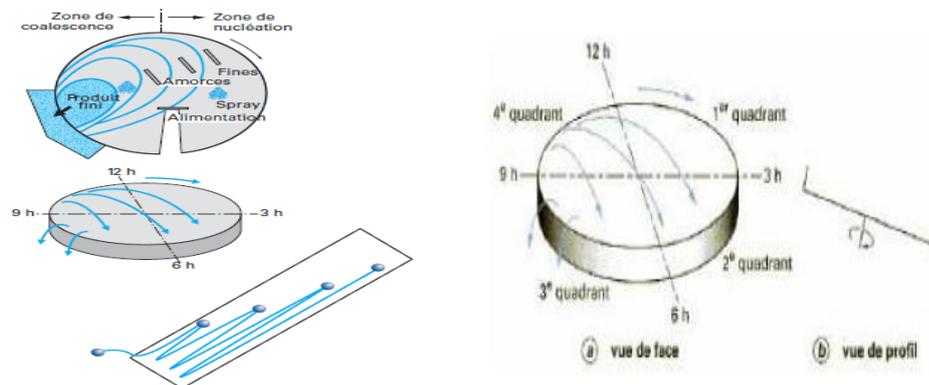


Figure 1.22 : Plateaux granulateurs et Assiette granulatrice

Le mouvement des particules résulte de deux actions opposées :

- Celle des forces de frottements et des forces centrifuges induites par le mouvement de rotation qui tend à entraîner les particules vers le haut du plateau ;
- celle de la pesanteur qui contraint les particules à descendre vers le bas.

Ces dernières augmentent avec la taille des granulats et leur hauteur. Les granulés sont donc entraînés avec le plateau vers le haut jusqu'à une altitude à laquelle la force de gravité l'emporte sur la force centrifuge et sur celle de frottement. Cette altitude dépend, bien entendu, de la taille des particules : élevée pour la poudre fine dont la cohésivité est importante et la gravité faible, puis de plus en plus basse au fur et à mesure de la croissance. Il en résulte une trajectoire hémicirculaire des granulés (formant des zones en forme de vague s'étalant en éventail) dont le contour diminue avec la taille de ces derniers. Cela conduit à une classification spontanée des granulés : des plus fines qui restent au fond et s'étalent sur une surface large aux plus grosses qui remontent en surface et tournent sur une zone réduite de forme d'un haricot.

D'un point de vue pratique, l'assiette doit être construite en matériau résistant à l'abrasion. L'état de surface de l'assiette doit permettre l'auto-amorçage des granulés et éviter les phénomènes de collage.

1.8.4.1.2 Variantes possibles de l'assiette granulatrice

Les variantes possibles de l'assiette granulatrice sont présentées sur la Figure 1.23. Il s'agit de rebord multiple, de plateau profond et de cône de granulation.

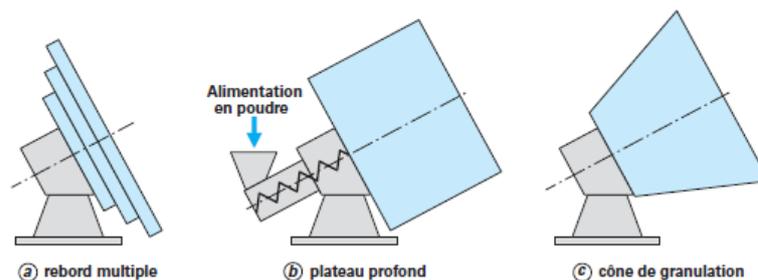


Figure 1.23 : Variantes possibles de l'assiette granulatrice

1.8.4.1.2.1 Rebot multiple

Le plateau central est entouré d'autres plateaux concentriques à rebord (Figure 1.23-a). Cette conception permet de produire des granulats plus denses car une fois éjectés du plateau central, les granulats continuent à se densifier dans les plateaux périphériques.

1.8.4.1.2.2 Plateau profond

Le rapport hauteur/diamètre est plus élevé que pour les appareils conventionnels. Il peut atteindre un rapport de 0,75 voire 1. Sa configuration permet d'augmenter la capacité de l'appareil à temps de séjour constant.

L'inertie du système est plus importante, aboutissant à un procédé devenant moins sensible aux fluctuations des conditions opératoires.

Dans une variante de cet appareil, l'alimentation de la poudre à granulée se fait par le fond de l'assiette (Figure 1.23-b). Cette configuration est plus adaptée pour l'alimentation des poudres ayant tendance à générer des poussières.

1.8.4.1.2.3 Cône de granulation

L'assiette est remplacée par un récipient tronconique dont le diamètre augmente avec la hauteur (Figure 1.23-c). Ce type d'appareil permet une bonne classification des granulats ainsi qu'une plus grande compacité en raison de la vitesse périphérique plus importante à mesure que l'on s'approche de la zone de soutirage des granulats.

1.8.4.1.3 Caractéristiques de l'assiette granulatrice

1.8.4.1.3.1 Choix des paramètres d'exécution du procédé

De nombreux paramètres de l'assiette granulatrice peuvent être réglés de manière à optimiser la production de granulats. Ces paramètres sont essentiels à contrôler puisque les agglomérats obtenus sont très sensibles aux conditions opératoires.

a) Vitesse de rotation du plateau

La vitesse de rotation notée n est réglée par rapport à la vitesse critique de rotation n_{crit} . En effet, selon la rugosité des parois et les forces de cohésion, plusieurs types de mouvement peuvent se manifester (Figure 1.24) : Glissement du lit ; entraînement-effondrement périodique ; cascade superficielle ou complète et centrifugation.

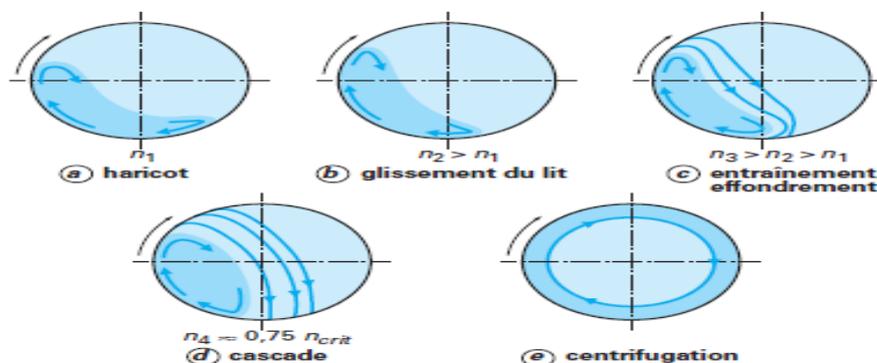


Figure 1.24 : Mouvement de la charge dans un plateau tournant à différentes vitesses

b) Angle d'inclinaison du plateau

Pour assurer un mouvement relatif entre les particules, l'angle d'inclinaison du plateau doit rester supérieur à l'angle de repos (éboulement) du produit.

c) Type d'alimentation

Alimentation en poudre : Effectuée en surface, elle favorise l'enrobage, donc le grossissement; immergée, elle réduit les risques d'émission de poussières mais perturbe les écoulements donc la classification naturelle. Pour que le débit d'alimentation soit constant, on utilise un doseur (dosimètre à décroissance de poids) plutôt qu'un distributeur (couloir vibrant). Si l'on doit produire des agglomérats compacts, la distribution granulométrique de la poudre doit être adéquate.

Alimentation en liant : La taille des gouttelettes est importante. Elle doit être proportionnée à la taille des particules à humecter. Des agglomérats petits exigent une pulvérisation fine sur la poudre ou les nucléus après leur introduction sous forme d'amorce, tandis que, sur des gros agglomérats, une aspersion suffit. Pour bien maîtriser la taille des gouttelettes, il faut éviter toute intersection des cônes de pulvérisation et ne pas non plus mouiller le fond de l'assiette sous peine de collage. Le débit de liant doit être proportionnel au débit de poudre.

d) Temps de séjour des granulats dans l'assiette

Le temps de séjour ou temps de granulation dépend du débit d'alimentation et de la capacité du plateau. Cette dernière est fonction de l'inclinaison, de la hauteur du rebord, de la géométrie et de la vitesse de rotation de l'assiette mais aussi de la coulabilité de la poudre. Quand le temps de séjour croît, la taille, l'étalement et la compacité des agglomérats croissent avec le nombre et l'intensité des chocs subis.

Il est à noter que la présence de pulvérisation fine permet d'aider à la nucléation et à l'obtention d'une forme sphérique.

1.8.4.1.3.2 Influence de paramètres de l'assiette granulatrice sur les propriétés des granulats

Les propriétés les plus importantes des granulats sont la taille et la distribution granulométrique, la porosité et la résistance mécanique des granulats. Ces propriétés étant influencées par les paramètres de l'assiette granulatrice.

a) Taille des granulats

La taille des granulats augmente avec l'augmentation du ratio de mouillage, du débit d'introduction de liant et du temps de séjour ainsi qu'avec la diminution de l'angle d'inclinaison.

De plus, l'augmentation du débit d'alimentation du solide conduit à une diminution de la taille moyenne (temps de séjour plus faible) mais aussi à une distribution granulométrique plus étalée des granulés

b) Porosité des granulats

La porosité des granulats dépend des forces de cisaillement qui conduisent à la densification des granulats. Cet effet s'intensifie avec la taille du plateau : les granulats sont d'autant plus compacts que le diamètre du plateau est grand.

c) Bilan

La Figure 1.25 montre l'influence des paramètres de conception et de conduite sur les caractéristiques des granulats produits.

Paramètres de conception et de conduite	Agglomérats			Conduite		Observations
	Taille	Resserment granulométrique	Compacité solidité	Maîtrise de la granulométrie	Temps de séjour t_r	
Diamètre de l'assiette D		↘	↗		↗	
Hauteur de l'assiette $H = 0,2 D$	↗		↗		↗	Ségrégation ↘
Vitesse de rotation $n \propto D^{-0,5}$	↘	↘ (1)	↗	↗	↗	(1) Forces de rupture ↗ Ségrégation ↘
Inclinaison de l'assiette $I \propto n$	↘		↗ (2)		↘	(2) bien que t_r ↘
Taux de liant	↗↗	↗	↗	↗		Latitude de réglage étroite entre <i>marche sèche</i> (effritement) et <i>marche humide</i> (collage)
Débit d'alimentation	↘	↘	↘		↘	
Taux de fines dans l'alimentation		↗	↗	↗		Il faut augmenter le taux de liant avec le taux de fines
Débit d'amorces	↘	↗	=			Il faut maîtriser le débit, la granulométrie et la teneur en humidité des amorces

Notations : les deux propriétés considérées varient en sens contraire (↘),
varient dans le même sens : (↗) un peu ou (↗↗) beaucoup.
n'ont pas d'influence l'une sur l'autre (=).

Figure 1.25 : Influence des paramètres de conception et de conduite sur les caractéristiques des agglomérats obtenus

1.8.4.1.3.3 Avantages et inconvénients de l'assiette granulatrice

a) Avantages de l'assiette granulatrice

L'assiette granulatrice présente une grande souplesse de réglage du diamètre (1 à 25 mm); une large plage de débits d'alimentation ; une obtention d'une granulométrie resserrée ; une consommation d'énergie faible en comparaison au compactage et à l'extrusion ; convient pour des particules fines ; une surveillance aisée et investissement faible par rapport à ceux requis au compactage ou à la mise en forme en tambour granulateur.

b) Inconvénients de l'assiette granulatrice

Les inconvénients de l'assiette se présentent ainsi : difficile de capter les poussières ; les débits de liant doivent être constamment proportionnés ; caractéristiques des agglomérats sensibles aux fluctuations d'humidité de l'alimentation ; technique plus exigeante en main d'œuvre que le compactage et enfin un coût de séchage élevé par rapport au compactage ou à l'extrusion.

1.8.4.1.4 Application industrielle

C'est dans l'industrie du ciment et des céramiques que les granulateurs à plateau tournant ont connu leur plus grand essor à partir des années 1940. On cherchait alors à produire par des procédés continus, des grandes quantités de granulés sphériques mono-dispersés de taille environ 20-25 mm. L'optimisation du procédé ayant permis d'obtenir des granulés de plus petites tailles (2 à 5 mm), son utilisation a ensuite été étendue à la granulation des engrais solides puis à celle des minerais de fer. L'utilisation de l'assiette granulatrice s'ouvre donc à un large panel sectoriel au niveau industriel puisque les différents systèmes de réglage, variation de la vitesse de rotation, variation de l'inclinaison de la cuve, réglage du débit du liant liquide augmentent considérablement ses possibilités d'utilisation.

La faisabilité et l'optimisation d'un procédé de granulation en plateau tournant se fait tout d'abord par des essais expérimentaux réalisés dans les appareils de taille pilote ou semi-pilote. Une fois la configuration et les paramètres opératoires optimaux définis, se pose alors le problème de la transposition à l'échelle industrielle du procédé.

Le diamètre du plateau est choisi en fonction du débit de production. Selon Klatt, la relation (1.1) existe entre ces deux paramètres :

$$m = 0,017D^2 \quad (1.1)$$

Avec m : débit de production en kg/s et D : diamètre du plateau.

L'angle d'inclinaison des plateaux industriels varie entre 30 et 70°. Le volume utile du plateau est d'autant plus important que l'angle d'inclinaison est faible.

La vitesse de rotation de l'assiette est définie à partir de la vitesse critique (1.2) :

$$n_{\text{crit}} = \frac{42,3 \sqrt{\sin(\beta - \delta)}}{\sqrt{D} \sqrt{\cos\delta}} \quad (1.2)$$

Avec n : vitesse de rotation en tour par minute,

β : angle de repos de la poudre

δ : angle d'inclinaison du plateau

Généralement, les plateaux granulateurs opèrent à $n = 0,75 n_{\text{crit}}$. L'équation de la vitesse critique (1.3) est issue du domaine de cimenterie mais peut être utilisée en première approximation pour d'autres applications. En l'absence de données concernant l'angle d'inclinaison, nous pouvons utiliser, en première approximation, la corrélation proposée par Klatt pour une valeur moyenne de l'angle d'inclinaison de l'ordre de 50°, avec D en m.

$$n_{\text{crit}} = \frac{22,5}{\sqrt{D}} \quad (1.3)$$

Concernant le rapport hauteur/diamètre du plateau, Bhrany a proposé une corrélation pour déterminer ce rapport (1.4).

$$\frac{H}{D} = C_3 \tan(\beta - \delta) \quad (1.4)$$

Avec C_3 est une constante, généralement proche de 2.

En pratique, la plupart des plateaux industriels possède un rapport H/D proche de 0,20.

1.8.5 Valorisation de sédiments de dragage en éco-modelé paysager

La valorisation des sédiments non immergeables dans la mise en œuvre des éco-modelés paysagers est considérée comme l'une des filières innovantes de valorisation des sédiments de dragage portuaire ce qui pourrait réduire la quantité des sédiments dragués (Figure 1.26). Ces éco-modelés ou buttes paysagères permettent de créer de meilleurs aménagements urbains et de développer des projets environnementaux. A ce jour, cinq buttes paysagères ont été

réalisées à proximité du Grand Port Maritimes du Dunkerque faites avec plus 100 000 m³ de sédiments marins de dragage.



Figure 1.26 : Eco-modélé paysager à base de sédiments non immergeables de GPMD

1.9 Conclusion

Les opérations de dragage constituent un enjeu majeur pour le Développement Durable et le maintien des activités portuaires. Elles présentent également un risque de contamination des eaux côtières pouvant affecter durablement les écosystèmes. La gestion des sédiments est un enjeu important à la fois du point de vue de leur quantité et de leur qualité. Les concentrations élevées des contaminants dans les matériaux de dragage ne facilitent pas leur gestion. L'immersion en mer et la mise en décharge de ces matériaux posent des problèmes environnementaux importants.

La gestion des sédiments non contaminés et contaminés favorise la valorisation en satisfaisant les exigences technico-économiques et environnementales et permet également d'atténuer la pression liée à la pénurie des matériaux de construction.

L'utilisation des déchets industriels (cendres volantes, MIOMs, laitiers, schistes, ...) a été exploré depuis plusieurs années dans le domaine du Génie Civil. Les sédiments de dragage, qui font l'objet de la présente étude, sont considérés comme des déchets par la directive n° 2008/98/CE du 19/11/08 et leur utilisation ne doit pas porter atteinte ni nuire à l'environnement et à la santé humaine. Les recherches bibliographiques ont montré que l'utilisation des sédiments en Génie Civil est une perspective intéressante. Parmi les voies potentielles de valorisation, on trouve le secteur routier par sa capacité d'absorber des quantités importantes de sédiments et par l'expérience acquise dans la valorisation des déchets. La valorisation des sédiments en béton et en granulats artificiels sont en cours de développement afin de trouver des solutions permettant de répondre efficacement à la problématique d'érosion littoral.

Les sédiments de dragage présentent des caractéristiques mécaniques généralement faibles. Afin d'améliorer leur performances mécaniques de ces matériaux, l'ajout d'un correcteur granulaire en complément du traitement au liant hydraulique est une solution efficace. Cet apport consiste à améliorer le squelette granulaire du matériau, répondant à une meilleure répartition granulométrique et permet de réduire les vides pour obtenir une compressibilité plus faible et une résistance mécanique plus élevée. Il atténue les paramètres de nature tels que l'argilosité, la teneur en matière organique (M.O.) et la teneur en eau initiale et il influe sur la mise en œuvre du matériau. Les sédiments traités rencontrent plusieurs problèmes liés aux éléments perturbateurs présents dans les sédiments tels que les métaux lourds, la matière organique et les sels minéraux (sulfates, nitrates et phosphates). La nature complexe et variable des sédiments nécessite une caractérisation systématique afin de mieux appréhender leur comportement physico-chimique, mécanique et environnemental. Les travaux de cette thèse rentrent dans le cadre d'une démarche globale de gestion des sédiments portuaires, en améliorant leurs performances, pour les valoriser efficacement dans le domaine de Génie Civil. Il est donc important d'analyser les enjeux, la faisabilité environnementale et technico-économique et les critères d'une interdiction formelle des rejets en mer de sédiments dont la teneur en certaines substances présenterait un risque de contamination des milieux marins ainsi que de développer une réflexion en vue d'une gestion viable différenciée des sédiments en fonction de leurs potentialités de valorisation technico-économique et des outils de modélisation numérique (eau, sédiments, contaminants...) pour appuyer des politiques adaptées et intelligentes.

Chapitre 2 : Caractérisation de sédiments de dragage du port de Saint-Louis

Chapitre 2 : Caractérisation de sédiments de dragage du port de Saint-Louis pour une utilisation en technique routière

2.1 Introduction

Dans ce chapitre de l'étude, nous nous sommes intéressés à l'identification des sédiments marins issus du port de Saint-Louis du Rhône dans la rade de Toulon. L'objectif consiste à établir une caractérisation mécanique, physico-chimique, minéralogique et environnementale de ces matériaux. Cette étude préalable permet de mettre en avant les principales caractéristiques des sédiments marins étudiés et de définir les paramètres de leur mise en œuvre. Cela permettrait d'évaluer le potentiel de valorisation des sédiments marins en technique routière ainsi que d'orienter la réflexion sur les solutions alternatives à envisager.

L'identification des sédiments marins bruts favorise la proposition d'une solution de traitement à base des ciments en se basant sur une méthodologie générale de valorisation en technique routière. Enfin, les caractéristiques des ciments sont étudiées pour connaître leurs propriétés et déterminer leurs quantités à ajouter lors du traitement.

Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet SEDIMED portant sur la valorisation des sédiments de dragage du VAR par la réalisation d'ouvrages réels de référence en se basant sur des essais, des études et des suivis scientifiques permettant d'en apprécier la faisabilité, le degré de risques et leur acceptabilité.

Ces travaux d'analyses ont également pour objectif d'anticiper les difficultés majeures lors de l'exécution des travaux prévus dans ce projet et d'orienter la réflexion sur les solutions alternatives à envisager.

2.2 Présentation du matériau étudié

Les sédiments de dragage étudiés dans cette étude sont issus du port de Saint-Louis du Mourillon (PSL) dans la rade de Toulon. Les prélèvements ont été réalisés entre 05 et 27 Juin 2012. Lors de cette campagne de prélèvements, les sédiments (PSL) ont été livrés en sept fûts par camions au département Génie Civil & Environnemental des Mines de Douai, le 30 Août 2012 (Figure 2.1).

Afin d'accroître la reproductibilité des résultats, nous avons homogénéisé soigneusement les sédiments selon la norme européenne NF EN 15002.



Figure 2.1 : Etat de sédiments de Saint-Louis à l'arrivée au laboratoire Mines Douai

L'homogénéisation est effectuée manuellement avec une pelle. Pour cela, nous avons vidé les sédiments reçus dans un grand bac puis nous avons procédé à la division des échantillons par quartage. Cette opération consiste à diviser les sédiments en quatre tranches de forme et de taille identiques puis éliminer les deux tranches opposées et mélanger soigneusement les parties restantes. Cette séquence est répétée jusqu'à l'obtention de la quantité de matériau nécessaire pour les essais d'identification (Figure 2.2).



Figure 2.2 : Homogénéisation et quartage de sédiments de Saint-Louis

Après les opérations d'homogénéisation et de quartage, nous avons tamisé les sédiments à 40 mm afin d'éliminer les macro-déchets. La masse totale du matériau est de 421 Kg, le pourcentage du passant à 40 mm est de 99,83 %. Le refus (0,17 %) est constitué de Coquillage, de fibre, de plastique et de gros Cailloux (Figure 2.3).



Figure 2.3 : Tamisage à 40mm de sédiments de Saint-Louis et l'état des macro-déchets

2.3 Caractérisation physico-chimiques de sédiments bruts de dragage

Dans le domaine des travaux routiers, la détermination de la teneur en eau, la distribution granulométrique, la valeur au bleu méthylène (VBS), les limites d'Atterberg et les taux de matières organiques constituent un préalable. Dans ce qui suit, en plus de la détermination de ces caractéristiques de base, une comparaison des résultats issus de différentes méthodes ou techniques d'identification a été entreprise.

2.3.1 Teneur en eau initiale (w %)

La teneur en eau définit l'état hydrique du matériau. Elle est désignée par w et exprimée en % selon l'équation (2.1) :

$$w (\%) = \frac{\text{Masse d'eau}}{\text{Masse sèche}} \times 100 \quad (2.1)$$

Dans le domaine du dragage, afin d'évaluer la consistance des boues, on préfère généralement l'utilisation de la siccité. Cette dernière, désignée par S, est définie en % par le rapport de la masse sèche et de la masse humide du matériau. La relation entre ces deux paramètres est donnée par l'équation (2.2) :

$$S (\%) = \frac{\text{Masse sèche}}{\text{Masse humide}} \times 100 = \frac{1}{1 + \frac{w}{100}} \times 100 \quad (2.2)$$

Les mesures de la teneur en eau ont été réalisées selon la norme NF P 94-050 avec un séchage en étuve à 40 °C pour éviter d'altérer les matières organiques puis à 105 °C pour évaluer l'insensibilité à la chaleur du matériau. Les résultats moyens obtenus sont reportés dans le Tableau 2.1.

On constate que les teneurs en eau initiales des sédiments PSL sont très faibles ce qui peut être expliqué par la nature des matériaux en présence. Les résultats à 40 °C et 105 °C sont

comparables, les matériaux étudiés sont donc insensibles à la chaleur. Il est à noter que les teneurs en eau des sédiments de dragage sont généralement très élevées, elles sont de l'ordre 150 % à 180 % au port de Havre (Boutouil, 1998), de 100 % à 360 % au port de Rouen (Colin, 2003) et de 100 % à 220 % pour le port Est de Dunkerque (Dubois, 2006 ; Tran, 2009 ; Miraoui, 2010 et Wang, 2011).

	Etuve à 40°C			Etuve à 105°C		
N°	1	2	3	1	2	3
W (%)	8,89	8,97	8,86	9,38	9,56	9,43
Moyenne		8,91			9,46	
S (%)	91,84	91,77	91,86	91,42	91,27	91,38
Moyenne		91,92			91,36	

Tableau 2.1 : Teneurs en eau initiales et siccités de sédiments de PSL à 40 °C et 105 °C

Nous avons également étudié l'évolution de la teneur en eau en fonction du temps afin d'estimer le temps nécessaire à la stabilisation de la masse sèche du matériau. La Figure 2.4 montre qu'un séchage de 1h30 min à 105 °C est suffisant pour atteindre la stabilité complète de la masse du matériau, ce qui correspond à 2h30 min à 40 °C.

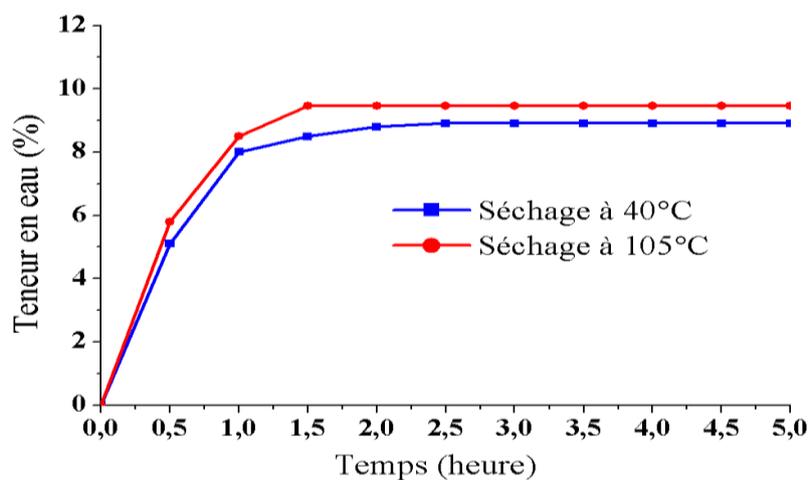


Figure 2.4 Teneur en eau en fonction du temps de calcination à 40 °C et 105 °C

2.3.2 Analyse granulométrique

Dans le secteur des travaux routiers en France, pour une classification des matériaux selon le « Guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme » (GTR.1992), la distribution granulométrique constitue le premier paramètre d'entrée dans les tables de

classification. Le but de cette analyse est de déterminer la distribution pondérale de la taille des différentes familles de grains des matériaux étudiés. Une courbe granulométrique permet d'évaluer quantitativement les différentes fractions des compositions granulométriques: argile, limon et sable (argile < 2 μm < limon < 63 μm < sable).

Dans cette étude, la courbe granulométrique des sédiments a été établie à l'aide de deux techniques :

- ✓ La diffraction de rayon laser à l'aide d'un granulomètre laser de type Coulter LS230 [norme NF ISO 13320-1].

La granulométrie laser est une technique reposant sur la diffraction d'un faisceau laser à la rencontre des particules en suspension dans un fluide. De plus, on considère que les particules sont sphériques, opaques et non poreuses. L'angle de diffraction de la lumière est inversement proportionnel à la taille des particules étudiées. Le granulomètre laser permet d'identifier des particules de tailles comprises entre 0,04 μm et 2000 μm . Les particules fines des sédiments marins sont désagrégées chimiquement par l'ajout de 5 % d'hexamétaphosphate de sodium et mécaniquement à l'aide des ultrasons.

La granulométrie laser est réalisée sur sept mesures des sédiments marins bruts, en utilisant le modèle de Fraunhofer permettant de calculer la distribution de taille des particules sphériques.

- ✓ Le tamisage à voie humide [XP P94-041, 1995 ; NF EN 933-1, 2012]

Cette méthode consiste à fractionner un matériau granulaire au moyen d'une série de tamis de tailles décroissantes. Les dimensions des mailles sont choisies en fonction du but de l'essai et de la nature des échantillons. Les sédiments marins ont été passés à travers différents tamis, selon les normes ci-dessus, par lavage à l'eau accompagnée d'une agitation manuelle.

Après tamisage, les refus sont récupérés et séchés jusqu'à stabilisation de leur masse sèche. La fraction inférieure à 80 μm est alors analysée par granulomètre laser [NF ISO 13320-1, 2000].

L'analyse des résultats obtenus pour les sédiments marins montre que les deux techniques donnent des courbes comparables pour les fractions granulométriques supérieures à 200 μm (Figure 2.5). Néanmoins l'écart est considérable pour les fractions inférieures à cette dernière.

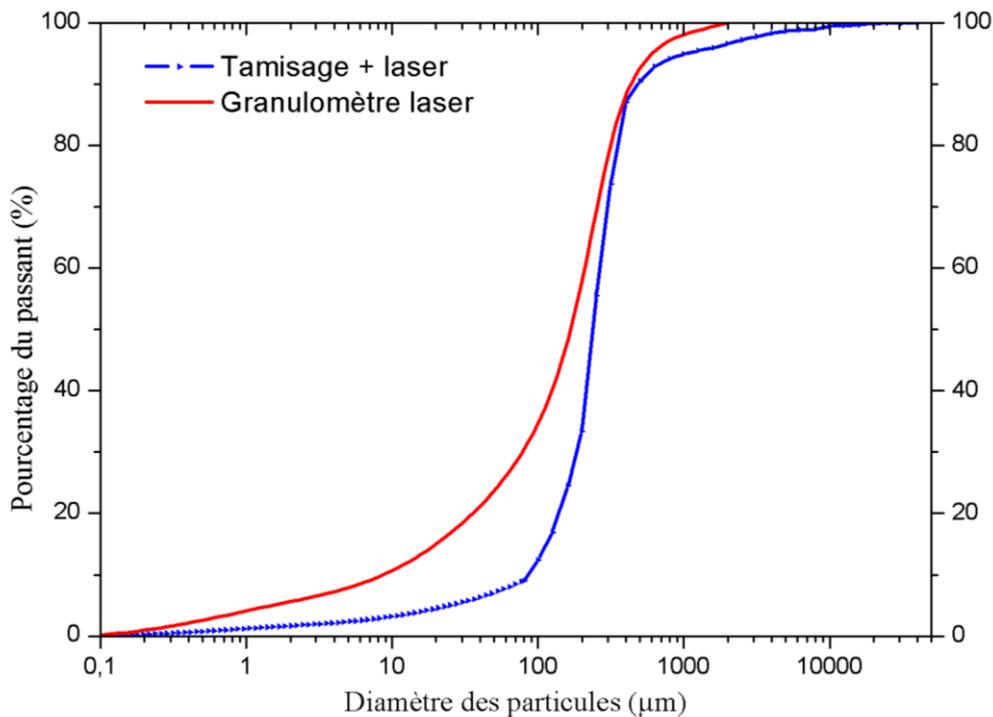


Figure 2.5 : Analyse granulométrique par tamisage associée au laser et par laser

Le Tableau 2.2 présente le récapitulatif des fractions granulométriques de sédiments PSL.

Taille des particules	Classification (GTR, 1992)	Analyse par laser	Analyse par tamisage associée au laser
Grains < 2μm	Fraction argileuse (%)	5,43	1,83
2μm < Grains < 63μm	Fraction limoneuse (%)	21,40	6,22
63μm < Grains	Fraction sableuse (%)	73,18	91,95

Tableau 2.2: Récapitulatif des fractions granulométriques de sédiments de PSL

Les indices granulométriques expriment la position et la dispersion de la distribution granulométrique. Ceux qui sont généralement utilisés sont les coefficients d'uniformité caractérisant la pente de la courbe granulométrique, également appelé coefficient de Hazen C_U (2.3) et la courbure C_C de la courbe granulométrique (2.4).

$$C_U = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (2.3)$$

$$C_C = \frac{d_{30}^2}{d_{60} \times d_{10}} \quad (2.4)$$

Où d_{10} , d_{30} et d_{60} représentent les diamètres correspondant respectivement à 10 %, 30 % et 60 % du passant.

Le coefficient d'uniformité permet d'estimer l'étalement de la granulométrie : $C_U > 6$, la granulométrie est dite étalée. Elle est dite bien graduée si le C_c est compris entre 1 et 3. Les résultats de ces coefficients sont reportés dans le Tableau 2.3.

Paramètres	Analyse par laser	Analyse par tamisage associée au laser
D₁₀ (µm)	9,00	85,00
D₃₀ (µm)	85,00	200,00
D₆₀ (µm)	200,00	280,00
C_U	22,00	3,29
C_c	4,01	1,68
Type de granulométrie	étalée mal graduée	étalée bien graduée

Tableau 2.3: Caractéristiques granulométriques de sédiments de PSL

Sur la base des résultats de l'analyse granulométrique par tamisage associé à l'analyse laser (Figure 2.5), dans le diagramme triangulaire de Taylor (Figure 2.6), le sédiment de PSL est classé sableux. Néanmoins, en prenant compte des résultats de la granulométrie laser, ce sédiment est classé sable-limoneux. Cette différence pourrait être expliquée par la différence du principe des deux méthodes.

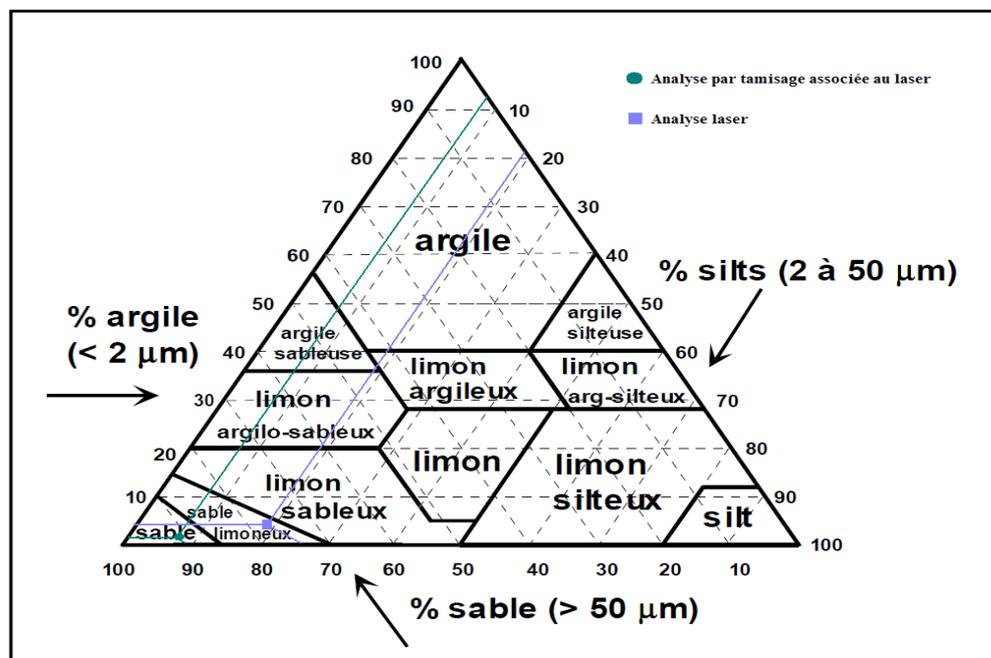


Figure 2.6: Classification triangulaire des sols fins (contenant moins de 30 % d'éléments de diamètre supérieur à 2 mm) (Degoutte et al., 2009)

2.3.3 Equivalent de sable

L'essai d'équivalent de sable est un essai simple permettant d'évaluer la proportion relative d'éléments fins et d'éléments grenus. Il se pratique sur les éléments de taille inférieure à 5 mm. Un échantillon de 120 g de matériau sec (< 5 mm) est placé dans une éprouvette contenant de l'eau et un défloculant. L'ensemble est mélangé ensuite laisser au repos. On observe à la base de l'éprouvette un dépôt solide, un flocculat de sol fin, puis un surnageant relativement clair. Les résultats du Tableau 2.4 montrent que le sédiment de dragage peut être considéré comme un sable propre.

	Essai n°1	Essai n°2	Essai n°3	Moyenne
Equivalent de sable (%)	99,57	98,97	97,65	98,73

Tableau 2.4 : Equivalent de sable de sédiments de PSL

2.3.4 Valeur au bleu de méthylène (VBS)

Dans cette étude, l'essai au bleu de méthylène est réalisé selon la norme NF P 94 068. Il a pour objet de caractériser l'Argilosité du matériau. Il utilise la propriété des molécules du bleu de méthylène à être adsorbé sur la surface des particules minérales. L'essai consiste à introduire progressivement du bleu de méthylène dans une suspension de matériau maintenue en agitation à vitesse constante (400 ± 100 tr/min). On prélève périodiquement, à l'aide d'une baguette de verre, une goutte de la suspension que l'on dépose sur un papier filtre. Dès qu'une auréole bleutée de diamètre 8 mm à 12 mm apparaît autour de la tâche, on considère que l'absorption du bleu de méthylène sur les particules d'argiles est terminée. A partir du volume de bleu de méthylène absorbé et de la quantité de matériau utilisé, la valeur du bleu de méthylène « VBS » est définie par l'équation (2.5) :

$$VBS = \frac{\text{Volume de bleu de méthylène (cm}^3\text{)} \times 0,01}{\text{masse sèche de la prise d'essai (g)}} \times 100 \quad (2.5)$$

L'analyse des résultats du Tableau 2.5 montre que les valeurs mesurées sur les sédiments de PSL sont inférieures à celles mesurées sur les sédiments de dragage du port de Dunkerque. Cette différence pourrait être expliquée par le pourcentage d'argile plus important dans ces derniers.

	Présente étude		Wang (2011)	Achour (2013)
VBS (g/100g)	0,21	0,23	-	-
Moyenne (g/100g)	0,21		3,10	3,40

Tableau 2.5: Valeur au bleu de méthylène de sédiments de PSL

2.3.5 Etats de consistance - Limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg sont déterminées uniquement pour les éléments fins d'un sol (fraction passant au tamis de 400 μm), car ce sont les seuls éléments sur lesquels l'eau agit en modifiant la consistance du sol.

Un matériau fin pourra passer d'un état solide à un état liquide, quand sa teneur en eau augmente ; le comportement intermédiaire aura des propriétés plastiques. La consistance d'un sol va donc varier en fonction de la teneur en eau. Des limites arbitraires ont été définies pour qualifier ces différents états. Ces limites sont pour des teneurs en eau croissantes (Figure 2.7) :

- la limite de plasticité W_p qui sépare l'état solide de l'état plastique ;
- la limite de liquidité W_L qui sépare l'état plastique de l'état liquide.

L'état solide peut être également séparé par la limite de retrait W_S entre un état solide sans retrait (ne contenant plus d'eau adsorbée) d'un état solide avec retrait, présentant donc une dimension de volume lié au départ d'eau adsorbée.

L'indice de plasticité mesure l'étendue du domaine de plasticité du sol. Il caractérise la largeur de la zone où le sol étudié a un comportement plastique et s'exprime par la relation : $I_p = W_L - W_p$.

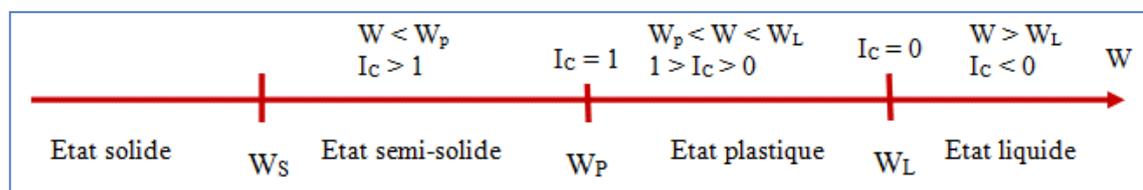


Figure 2.7 : Etats de consistance – Limites d'Atterberg

2.3.5.1 Méthode de Casagrande et méthode du rouleau

La limite de liquidité est déterminée à l'aide de la méthode de Casagrande [norme NF

P 94 051]. L'essai consiste à déterminer la relation entre le nombre de chocs imposés à une coupelle et sa teneur en eau. Par définition, la limite de liquidité W_L est la teneur en eau qui correspond à la fermeture de la rainure sur 1cm de longueur en 25 chocs.

La limite de plasticité n'a pas pu être déterminée par la méthode du rouleau [norme NF P 94 051]. Malgré plusieurs tentatives, nous n'avons pas pu former de rouleau de 3mm de diamètre. Le sédiment se décompose dès qu'on commence à le rouler ce qui pourrait être expliqué par des valeurs proches entre limite de liquidité et de plasticité. L'étendue du domaine de plasticité de ce matériau est trop faible.

La figure 2.8 permet de déterminer les limites de liquidité qui sont illustrées dans le Tableau 2.6. Les valeurs obtenues de la limite de liquidité sont reportées dans ce dernier.

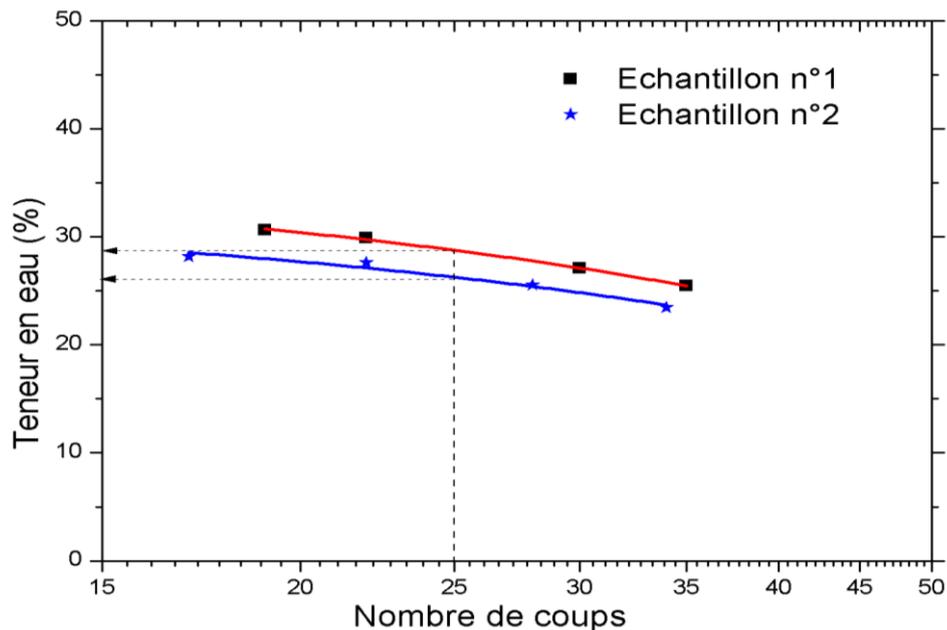


Figure 2.8: Teneur en eau en fonction de nombre de coups

	Essai n°1	Essai n°2	Moyenne
Limite de liquidité W_L (%)	29	26	27,50

Tableau 2.6: Limites de liquidité de sédiments de PSL - méthode de Casagrande

2.3.5.2 Méthode du cône de pénétration

En vue de comparer les résultats de la méthode de Casagrande et celle du cône de pénétration, une campagne d'essai au Fall-cône a été réalisée. Le principe de la méthode au cône consiste à mesurer l'enfoncement d'un cône normalisé (angle au sommet de 30°, masse de 80 g) pendant 5 secondes dans un échantillon de sédiment.

La limite de liquidité est définie comme la teneur en eau du matériau à 17 mm d'enfoncement du cône, d'après la norme française [norme NF P 94 052] et de 20 mm selon la norme anglaise [BSI 1990].

La limite de liquidité peut être obtenue à l'aide des résultats expérimentaux tracés sur la Figure 2.9. Les résultats correspondant aux enfoncements de 17 mm et 20 mm sont reportés dans le Tableau 2.7 permettant d'identifier cette limite. Les résultats déterminés par la méthode de cône de pénétration à 17 mm sont comparables à ceux déterminés par la méthode de Casagrande.

Cependant, on constate qu'il n'y a pas de différence majeure entre la teneur en eau à l'enfoncement de 17 mm et de 20 mm du cône de pénétration.

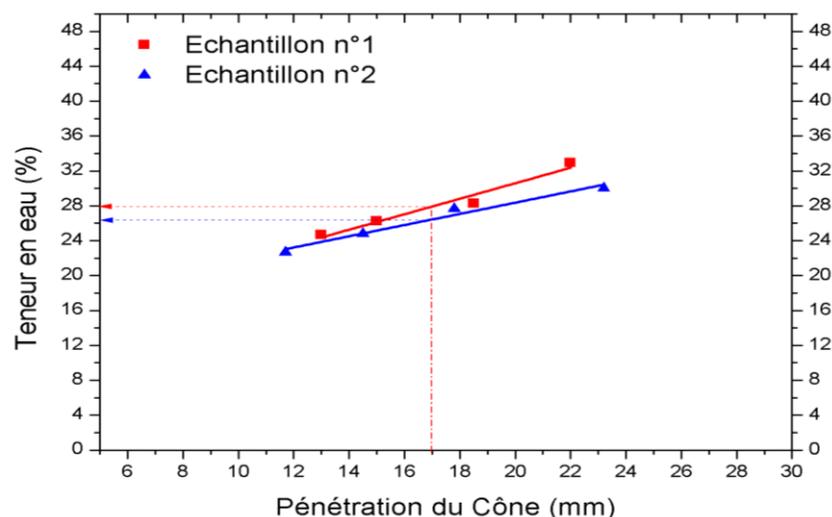


Figure 2.9: Teneur en eau en fonction de la pénétration du cône

	Essai n°1	Essai n°2	Moyenne
Limite de liquidité W_L (%) (d = 17 mm)	28,00	26,50	27,25
Limite de liquidité W_L (%) (d = 20 mm)	30,50	28,00	29,25

Tableau 2.7 : Limites de liquidité de sédiments PSL - Cône de pénétration

2.3.6 Masse volumique apparente et absolue

2.3.6.1 Masse volumique apparente ou en vrac

La masse volumique apparente est le rapport entre la masse et le volume apparent d'un même échantillon des sédiments marins bruts après passage à l'étuve à 40 °C. Le remplissage

de récipient de volume 1020,50 cm³ avec les sédiments marins est effectué au moyen d'un entonnoir muni de sa pige [NF P94-061-3].

Les résultats du Tableau 2.8 présentent une masse volumique apparente d'ordre de 1,21 g/cm³ sur une moyenne de trois essais.

	Essai n°1	Essai n°2	Essai n°3	Moyenne
Masse volumique apparente (g/cm³)	1,21	1,18	1,25	1,21

Tableau 2.8 : Masse volumique apparente de sédiments de PSL

2.3.6.2 Masse volumique des particules solides (γ_s)

La masses volumique des particules solides (masse volumique absolue) des sédiments marin a été mesurée à l'aide d'un pycnomètre à hélium de marque ACCUPYC1330. Cet appareil permet de mesurer le volume de sédiment sous forme de poudre, les échantillons sont séchés et finement broyés afin d'éviter de tenir compte de la porosité intergranulaire. Ils sont ensuite introduits dans une cellule spécifique. Après avoir placé la cellule dans l'appareil, l'hélium est injecté pour chasser l'air présent dans la cellule. Le volume de l'échantillon est alors la différence entre le volume de la cellule et celui d'hélium injecté.

Pour chaque prise d'essai, la masse volumique des particules solides est donnée par une moyenne de 80 analyses sous différentes pressions. Une moyenne de trois essais a été entreprit afin de vérifier l'homogénéité de la prise d'échantillon (Tableau 2.9).

On constate que les sédiments marins affichent des valeurs des masses volumiques absolues proches de celles préconisées pour les matériaux standards (environ 2,65 à 2,70 g/cm³). Cet écart peut être expliqué par la présence de sels et des matières organiques qui sont plus légères que les particules minérales.

	Essai n°1	Essai n°2	Essai n°3	Moyenne
Masse volumique absolue (g/cm³)	2,631	2,630	2,633	2,631

Tableau 2.9 : Masse volumique absolue de sédiments de PSL

2.3.7 Teneur en matière organique (MO) et pertes au feu (PF)

Les matières organiques possèdent des propriétés indésirables du point de vue géotechnique à savoir, une faible résistance mécanique, une structure meuble et spongieuse et un problème de gonflement ou de retrait. Sa capacité de rétention d'eau retarde le séchage et le rétrécissement des sédiments. Contenant plus de 3 % de matière organique, les sols

nécessitent une attention particulière pour leur valorisation. L'influence de la matière organique sur les caractéristiques des sédiments dépend de sa nature et de sa structure. Plusieurs études ont souligné les effets néfastes de la matière organique, en particulier sur l'hydratation des liants lors de la phase de traitement. Afin d'évaluer son pourcentage, nous avons procédé à des mesures de la teneur en matière organique par calcination au four électrique [Norme XP P94-047] qui consiste à déterminer la perte de masse d'un échantillon de fraction passant au tamis 2mm, préalablement séché à 40 °C puis broyé. L'échantillon est soumis à la calcination à 450 °C jusqu'à stabilité de masse. La teneur en matière organique (MO) exprime la proportion en masse du dégagement gazeux par rapport à la matière sèche initiale. Afin de déterminer le taux de perte au feu à 550 °C dans le matériau, la méthode de calcination telle que décrit dans la norme NF EN 15169 a été adoptée. Cette norme est dédiée aux déchets, boues et sédiments.

Les résultats des analyses de la teneur en matière organique et de perte au feu sont présentés dans le Tableau 2.10. De ces résultats, il apparaît que la perte au feu à 450 °C et à 550 °C ne dépasse pas les 2 %. Il en est de même pour la perte de masse à 450 °C et à 550 °C par la méthode thermogravimétrique (Figure 2.13). Ces résultats impliquent une faible teneur en matière organique dans ces sédiments expliquant ainsi les valeurs importantes du poids spécifique des grains solides mesurés. Dans le domaine routier, le taux de perte au feu est généralement limité à 3 %.

	Essai n° 1	Essai n° 2	Essai n° 3	Moyenne
Perte au feu à 450 °C (%)	1,31	1,37	1,43	1,37
Perte au feu à 550 °C (%)	1,46	1,55	1,67	1,56

Tableau 2.10 : Teneur en matière organique et perte au feu de sédiments de PSL

2.3.8 Friabilité des sables

Le but de cet essai consiste à mesurer l'évolution granulométrique des sables produite par fragmentation dans un cylindre en rotation à l'aide d'une charge broyante en présence d'eau.

Le matériau étudié est tamisé par voie humide à 0,2 mm et 4 mm ensuite séché à 105 °C. L'essai est effectué sur la fraction du matériau 0,2 mm - 4mm tel que décrit dans la norme NF P18-576 dont l'objectif principal est d'évaluer l'évolution des matériaux sableux sous le trafic de chantier.

Le coefficient de friabilité des sables caractérisant la résistance d'un sable à l'usure, déterminé au moyen d'un essai Micro-Deval est donné par la relation (2.6) :

$$F_S = 100 \times \frac{m}{M} \quad (2.6)$$

Avec : M est la masse de matériau soumise à l'essai, prise égale à 500 g et m est la masse des éléments inférieurs à 0,1 mm produits au cours de l'essai.

Les résultats du Tableau 2.11 montrent que le coefficient de friabilité de sédiments de PSL ne dépasse pas la valeur seuil de 60 % préconisée pour l'utilisation des matériaux en couche de forme (GTR, 2000). Néanmoins, nous ne disposons d'aucune valeur seuil pour la couche de fondation.

	Essai n° 1	Essai n° 2	Essai n° 3	Moyenne
Coefficient de friabilité F_S (%)	38,83	39,77	37,36	38,65

Tableau 2.11 : Friabilité de sédiments de PSL

2.3.9 Mesure de la surface spécifique et de la porosité

La surface spécifique et la porosité des sédiments marins ont été mesurées par adsorption de d'azote (méthode BET) sur l'appareillage ASAP 2010 de la société Micromeritics. Un échantillon pesant 2,0788 g a été dégazé pendant 4h avant l'essai.

La surface spécifique représente la surface totale par unité de masse du produit accessible aux atomes et aux molécules. Il s'agit donc de considérer toute la surface de chaque particule, porosité ouverte comprise.

Le calcul de surface spécifique se base sur le traitement analytique de l'isotherme d'adsorption déterminé expérimentalement ; il est ainsi possible de définir la quantité de gaz adsorbée en une monocouche complète, puis de calculer l'aire de cette couche, donc la surface spécifique de la poudre ou du solide.

Les résultats obtenus en termes de porosité cumulée en fonction des tailles de pores sont présentés sur la Figure 2.10. Le volume de pores cumulé mesuré est de l'ordre de 0,0055 cm³/g.

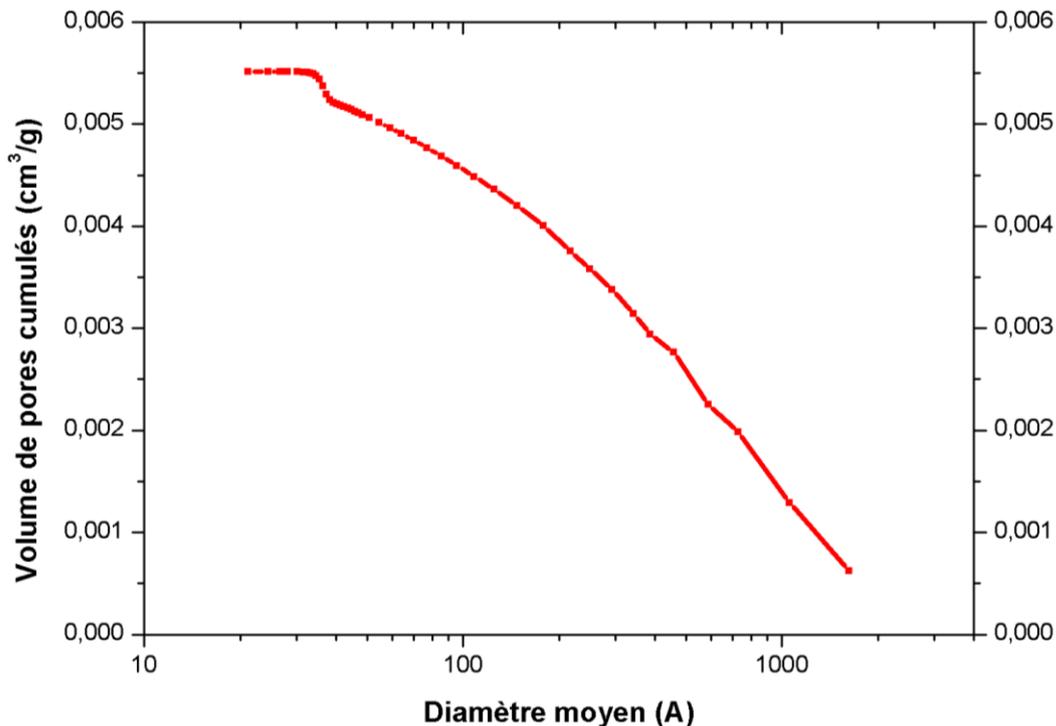


Figure 2.10 : Porosité cumulée en fonction de la taille des pores de sédiments de PSL

La valeur moyenne de surface spécifique mesurée, sur les sédiments marins, est de 0,9390 m²/g. Ce résultat est comparable à la valeur de la surface spécifique des sables filtrants 0-4 mm, égale à 0,6 m²/g (NF DTU 64-1), principalement utilisés pour la filtration et les travaux d'assainissement.

2.4 Caractéristiques de portance et de compactage

L'aptitude au compactage des sédiments bruts est évaluée à travers l'essai Proctor Modifié [norme NF P 94 093]. Le principe de cet essai consiste à compacter le matériau à différentes teneurs en eau selon un processus et une énergie donnée. Pour chaque teneur en eau, on mesure la masse volumique humide et on détermine la masse volumique sèche du matériau. A partir de la relation établie entre la teneur en eau et la densité sèche, les caractéristiques de compactage (la densité sèche et la teneur en eau optimale) sont déterminées. En association avec cet essai, des mesures de poinçonnement sur les éprouvettes compactées sont réalisées afin d'estimer l'Indice de Portance Immédiate (IPI) [norme NF P 94 078]. Ce paramètre permet d'évaluer l'aptitude d'un matériau à supporter directement sur sa surface la circulation des engins de chantier.

Les études Proctor-IPI sont réalisées à l'aide d'une machine de compactage automatique permettant de réaliser l'essai Proctor modifié ou normal (Figure 2.11).

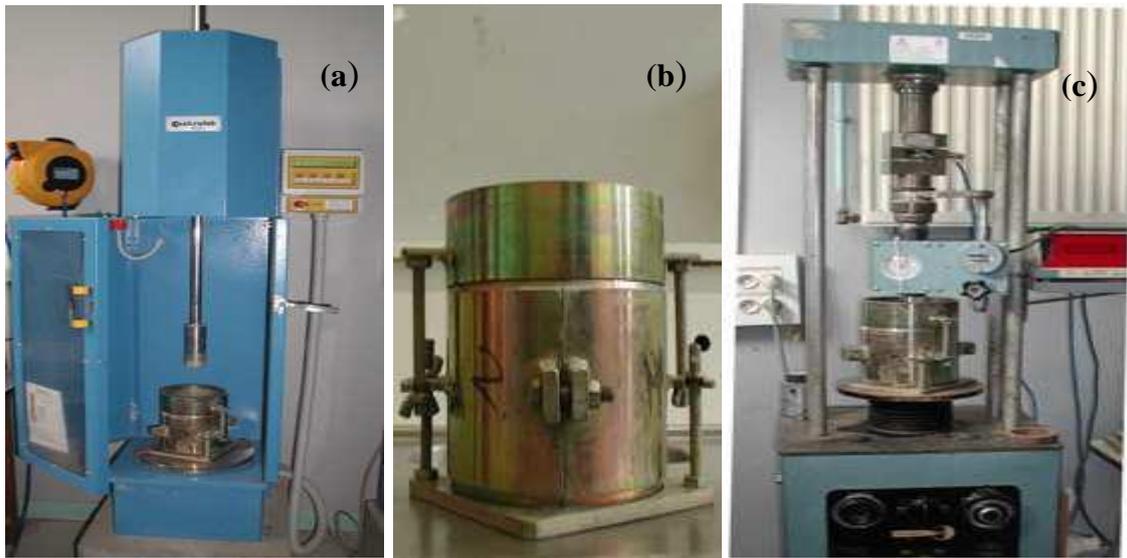


Figure 2.11 : Matériels de l'essai Proctor – IPI (a : machine de compactage ; b : moule CBR ; c : la presse pour mesurer l'IPI)

Une campagne d'essai Proctor modifié a été entreprise sur les sédiments de PSL. Les résultats présentés dans le Tableau 2.12 indiquent que les sédiments de PSL présentent une teneur en eau optimale de 14 % pour une densité sèche optimale de $1,78 \text{ g/cm}^3$. L'Indice Portant Immédiat correspondant l'optimum Proctor est de 23 % ce qui est prometteur pour une utilisation en couche de fondation, ($\text{IPI} \geq 25$, souhaitable = 35). A l'optimum Proctor, La compacité calculée est de 68 % (Tableau 2.12).

Les valeurs mesurées de l'Indice Portant Immédiat présentées sur la Figure 2.12 décroissent rapidement, après l'optimum Proctor, avec l'augmentation de la teneur en eau. Cette constatation peut présager une sensibilité à l'eau des sédiments de dragage étudiés. D'après le GTR, Ces valeurs impliquent une difficulté de circulation des engins sur le chantier.

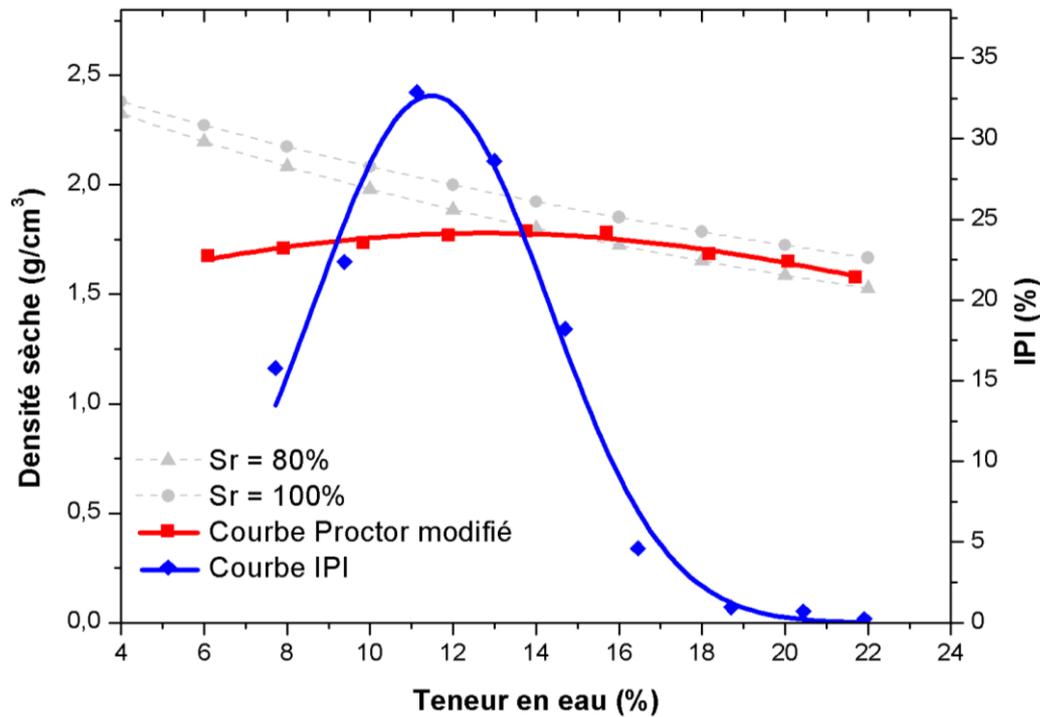


Figure 2.12 : Courbe Proctor Modifié – IPI de sédiments bruts de PSL

matériaux	W_{OPM} (%)	ρ_d (g/cm ³)	IPI à W_{OPM}	Compacité
Sédiments marins	14	1,78	23	68

Tableau 2.12 : Résultats d'essai Proctor Modifié – IPI de sédiments bruts de PSL

2.5 Analyse minéralogique

La connaissance de la composition minéralogique des sédiments est indispensable afin d'anticiper les difficultés qui pourraient apparaître dans leurs processus de valorisation. Cette analyse est réalisée par l'essai de la fluorescence X ainsi que l'essai de la diffraction des rayons X.

2.5.1 Analyse par fluorescence des rayons X

C'est une technique permettant l'analyse des éléments chimiques présents dans un matériau et la détermination de leur quantité respective. Les résultats d'analyse reportés dans le Tableau 2.13 montrent que les principaux éléments constitutifs de la matrice de sédiments de PSL sont l'oxygène, le silicium et le calcium.

La fluorescence des rayons X ne détecte pas le carbone total pour deux raisons : d'une part, le carbone produit moins de rayons X et d'autre part, ses rayons sont facilement absorbés suite à leurs faibles énergies. La teneur en carbone total est donc déterminée indirectement de la manière suivante :

$$C_{\text{total}}(\%) = C_{\text{minéral}}(\%) + C_{\text{organique}}(\%)$$

Le pourcentage du carbone minéral est estimé en se basant sur les résultats de l'analyse thermogravimétrique (ATG) permettant de mesurer la perte de masse en fonction de la température de calcination (Figure 2.13). Entre 600 °C et 800 °C, la perte de masse des sédiments marins est liée au dégagement de CO₂. Elle est de l'ordre de 6,03 % ce qui correspond principalement à la décomposition de la calcite.

Connaissant la masse molaire du carbone (12 g/mol) et de l'oxygène (16 g/mol), on peut estimer la teneur du carbone minéral selon la relation suivante :

$$C_{\text{minéral}}(\%) = \frac{12}{44} \times \text{Perte de masse}(\%) = \frac{12}{44} \times 6,03\% = 1,64\%$$

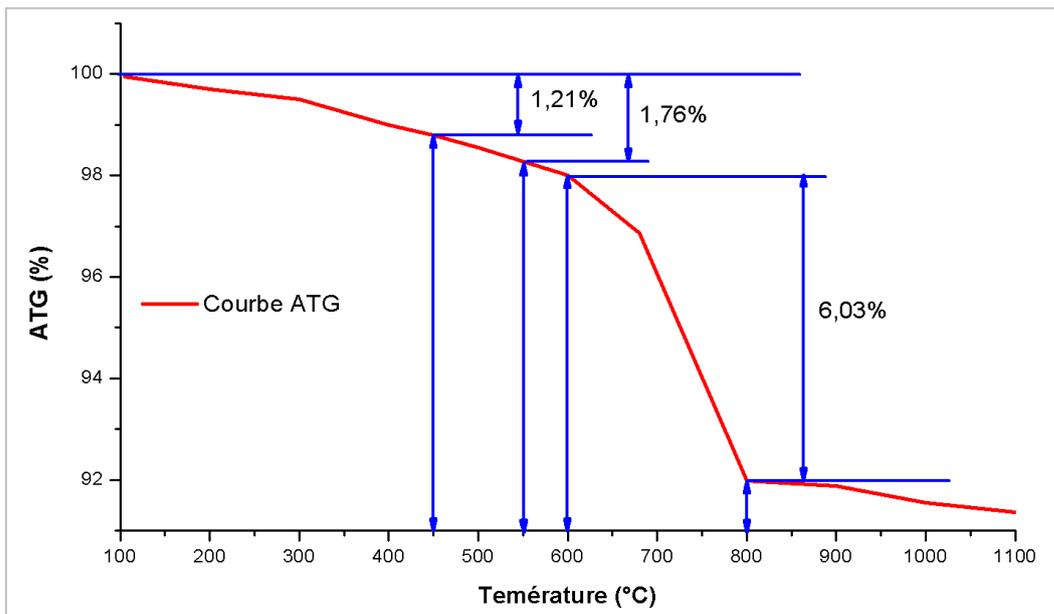


Figure 2.13 : Analyse thermogravimétrique de sédiments de dragage

Selon les travaux de Mustin (1987), il existe une relation linéaire entre la teneur en matières organiques et la proportion de carbone organique, elle est définie par la relation :

$$\% \text{ MO} = 1,724 \times \% \text{ CO} - 1,479 \implies C_{\text{organique}}(\%) = 1,76\%$$

En associant les proportions du carbone organique et inorganique, La teneur en carbone total est donc estimée à 3,4 %.

Eléments	Sédiment (%)	Eléments	Sédiment (%)	Eléments	Sédiment (%)
O	48,88	Fe	1,35	Mn	Traces
Si	30,81	Na	1,00	P	Traces
Ca	7,82	Mg	0,80	Cu	Traces
Al	3,67	S	0,30	Zn	Traces
C	3,40	Cl	0,30	Sr	Traces
K	1,35	Ti	0,30	Pb	Traces

Trace = pourcentage < 0,1%

Tableau 2.13 : Résultat de l'analyse semi - quantitative par fluorescence des rayons X exprimée en pourcentages massiques de sédiments de PSL

2.5.2 Analyse par diffraction de rayons X

L'analyse par diffraction des rayons X permet de préciser les phases minéralogiques en présence dans le matériau.

La Figure 2.14 montre que les sédiments de PSL sont majoritairement constitués de Quartz, la plus dominante des phases cristalline détectées, suivi de calcite à faible pourcentage. Ce résultat est en corrélation avec les principaux éléments mises en évidence par l'analyse de fluorescence des rayons X.

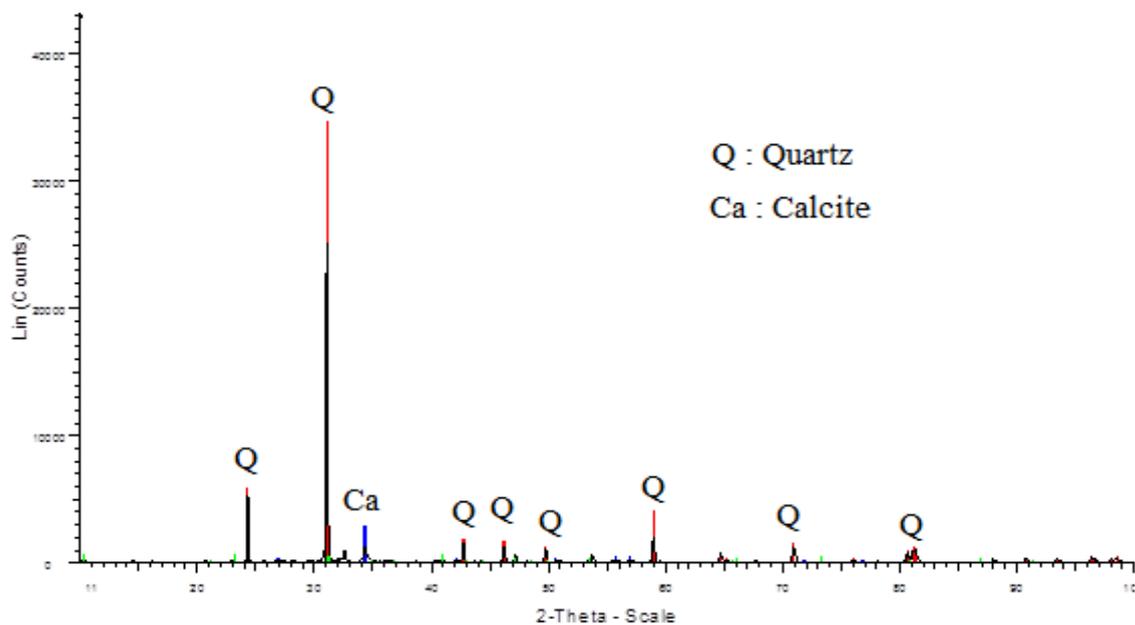


Figure 2.14 : Phases cristallines de sédiments de PSL

2.6 Classification des sédiments marins selon le GTR

Pour une utilisation en technique routière, Les paramètres d'état et de nature mesurés en phase de caractérisation physico-chimique permettent de définir les conditions de mise en œuvre. Les résultats obtenus sont synthétisés dans le Tableau 2.14.

	matériaux	Sédiments marins
Paramètres d'identification	Teneur en matière organique à 450 °C	1,37
	Perte au Feu à 550 °C (%)	1,56
	Masse volumique apparente (g/cm ³)	1,21
	Masse volumique absolue (g/cm ³)	1,63
	Valeur au bleu VBS	0,21
	Limite de liquidité W _L (%)	27,50
	Limite de plasticité W _P (%)	27,50
	Indice de plasticité I _p (%)	0,00
	63 μm < Grains	91,95
	2 μm < Grains < 63 μm	6,22
	Grains < 2 μm	1,83
	Minéraux principaux	Quartz, calcite

Tableau 2.14 : Synthèse des caractéristiques physiques de sédiments marins

Du point de vue du secteur de valorisation envisagé, le Guide français [GTR. 1992] permet de classer les matériaux routiers selon leurs caractéristiques physiques. Les sédiments marins du port Saint-Louis présentent un D_{max} inférieur à 50 mm, 9 % du passant à 80 μm, 96 % du passant à 2 mm et VBS = 0,21. Ils se positionnent donc dans la classe des sols sableux et graveleux avec fines, plus précisément dans la sous-classe B2 (Figure 2.15). Cette catégorie rassemble des sables argileux (peu argileux).

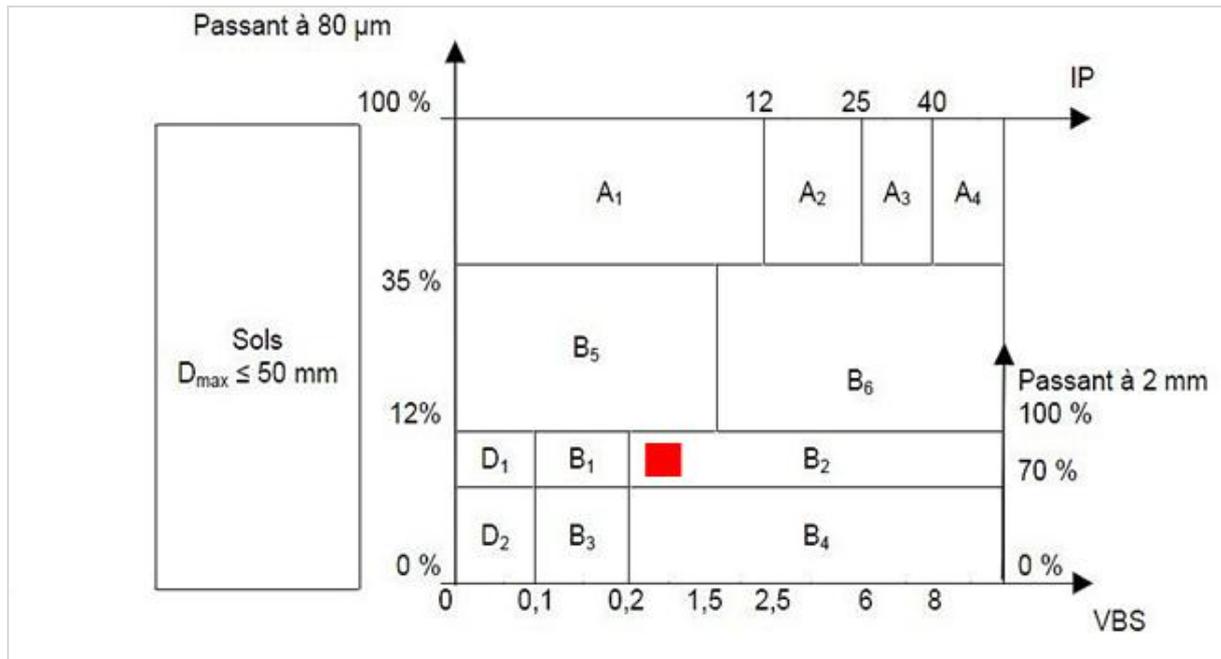


Figure 2.15 : Classification GTR de sédiments de PSL selon GTR. 1992

2.7 Analyse environnementale

L'impact environnemental de sédiments de PSL a été évalué à travers l'essai de lixiviation selon le guide acceptabilité des matériaux alternatifs en technique routière (SETRA, 2012). L'évaluation environnementale de ces matériaux de dragage montre que les quantités relarguées des éléments traces métalliques ne dépassent pas les seuils pour que le matériau soit candidat pour une valorisation en technique routière, permettant ainsi de justifier son utilisation en construction routière (Tableau 2.15).

Quantité relarguée cumulée à L/S = 10 l/kg (Essai de lixiviation NF EN 12-457-2)		
<i>Éléments</i>	Valeur en mg/kg de matière sèche de sédiment marin	Valeurs limites à ne pas dépasser en lixiviation pour être candidat à une utilisation en technique routière
As	0,029	2,0
Ba	0,783	100,0
Cd	0,012	1,0
Cr	0,020	10,0
Cu	0,054	50,0
Mo	0,023	10,0
Ni	0,042	10,0
Pb	0,017	10,0
Sb	0,024	0,7
Se	0,058	0,5
Zn	0,015	50,0
Chlorure	5967	15000
Sulfate	2494	20000
Fraction soluble	5200	60000
pH	7,87	[5,5 – 13,0]
Conductivité électrique (mS.cm⁻¹)	1,30	-
<i>Valeurs limites à ne pas dépasser en contenu total pour être candidat à une utilisation en technique routière</i>		
HCT	94,20	500
HAP	2,26	50
BTEX	0,05	6
PCB	0,07	1
COT	4560	60000

Tableau 2.15: Valeurs limites en lixiviation niveau 1 permettant de justifier l'utilisation des sédiments en technique routière selon le guide SETRA, 2012

2.8 Conclusion

Les sédiments bruts de PSL ont été caractérisés d'un point de vue physique, géotechnique, minéralogique et environnemental. Conformément au guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme, les sédiments bruts de PSL se positionnent dans la classe B (Sols sableux et graveleux) dont le diamètre maximal est inférieur à 50 mm et le passant à 80 μm est inférieur à 35 %. En fonction de la valeur au bleu de méthylène (VBS = 0,21), les sédiments bruts de PSL appartiennent à la sous classe B2. La plasticité de leurs fines les rend sensibles à l'eau. Leurs temps de réaction aux variations de l'environnement hydrique est court, tout en pouvant varier assez largement. Leur emploi en couche de fondation nécessite un traitement.

L'analyse de diffraction des rayons X a fait ressortir qu'ils sont majoritairement composés de quartz et de calcite à faible pourcentage. Leur teneur en matière organique est faible et leur masse volumique absolue ($2,63 \text{ g/cm}^3$) est comparable à celle des matériaux standards.

Enfin, la caractérisation environnementale de ces matériaux a montré la possibilité d'utilisation des sédiments bruts de PSL en technique routière, en se basant sur l'essai de lixiviation selon le guide acceptabilité des matériaux alternatifs en technique routières (SETRA, 2012).

Pour être utilisé en couche de fondation, un sol de classe B₂ doit présenter un IPI à l'optimum Proctor modifié ≥ 35 (GTR, 2000). Concernant les sédiments bruts de PSL, nous avons constaté que $\text{IPI}_{\text{OPM}} = 23$, leur valorisation n'est donc pas possible et nécessite un traitement aux liants hydrauliques et/ou ajout de matériau complémentaire.

Dans le paragraphe suivant, nous allons aborder la méthodologie utilisée pour l'étude de traitement des sédiments bruts (PSL) en vue de leur utilisation en couche de fondation et décrire les différents essais que nous avons mis en œuvre.

**Chapitre 3 : Valorisation de sédiments du port de
Saint-Louis en technique routière**

Chapitre 3 : Valorisation de sédiments du port de Saint-Louis en technique routière

3.1 Introduction

La caractérisation réalisée dans le chapitre précédant montre que les sédiments du port de Saint-Louis (PSL) présentent des performances mécaniques intéressantes. Toutefois, pour les valoriser en technique routière, plus particulièrement en couche de fondation, il est nécessaire d'améliorer leurs caractéristiques mécaniques et leurs Indices Portant Immédiat (IPI). Cette étude vise à mettre en place une méthodologie permettant de répondre aux critères d'utilisation de ces matériaux de dragage en couche de fondation. Le choix des liants hydrauliques et du correcteur granulométrique prend en compte le critère économique. L'étude du comportement mécanique et environnemental pour les formulations est effectuée afin de valider sur les deux plans l'utilisation des sédiments de dragage du port Saint-Louis (PSL) en assise de chaussée.

3.2 Méthodologie de valorisation de sédiments du PSL en technique routière

La démarche suivie pour valoriser les sédiments du PSL en technique routière est illustrée sur la Figure 3.1. L'étude du compactage permettra de déterminer les caractéristiques optimales (W_{OPM} , ρ_{dOPM}) du sédiment par l'essai Proctor modifié et l'aptitude de celui-ci à supporter la circulation des engins à travers l'Indice Portant Immédiat (IPI). Dans une seconde partie, la formulation des matériaux routiers est abordée en choisissant des produits de traitement tels que les liants hydrauliques et/ou des correcteurs granulaires. Les caractéristiques optimales des formulations sont déterminées sur la base d'essais de compacité. Cette étape est suivie de l'étude du comportement mécanique et de l'impact environnemental des formulations. Ainsi, l'aptitude des matériaux formulés à être utilisés en couches routières peut être vérifiée à travers cette étude.

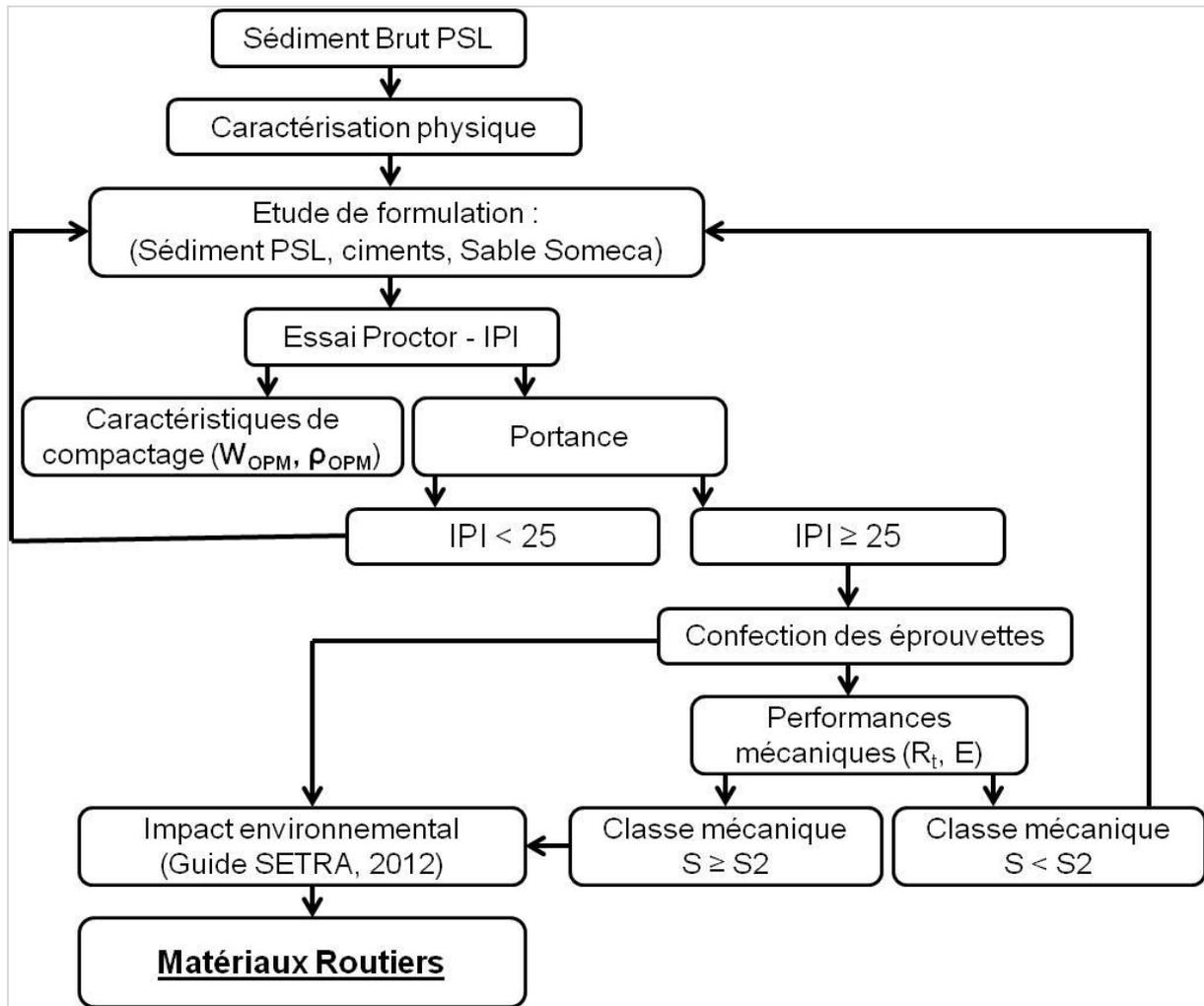


Figure 3.1 : Méthodologie adoptée pour la valorisation des sédiments du PSL

3.3 Préparation des sédiments du PSL

La caractérisation physique des sédiments du PSL a montré que leur teneur en eau n'est pas très élevée avec une valeur moyenne sur trois essais de 9,4 %. Cette valeur est dans la gamme de la teneur en eau optimale pour des matériaux sableux.

3.4 Choix des liants hydrauliques et leurs dosages

3.4.1 Liants hydrauliques

Le choix du liant hydraulique pour le traitement du sol est lié d'une part au critère technique : en fonction de la nature et des propriétés du matériau à traiter afin de choisir le liant le plus adapté permettant d'obtenir les performances mécaniques exigées. Deux paramètres primordiaux conditionnent le choix de type de traitement : la fraction argileuse et

la granulométrie car la réactivité des sols dépend de ces deux paramètres. Le guide de traitement des sols GTS (GTS, 2000) recommande, pour les sols sableux et/ou graveleux dont la VBS est inférieure à 0,5, un traitement au ciment. D'autre part, aux critères géographiques et économiques. En effet, le coût de transport d'un liant entre son lieu de production et de mise en œuvre a de fortes répercussions sur le budget global d'un chantier.

Deux ciments ont été utilisés dans cette étude : le ciment Cibelcor et le ciment Vicat.

3.4.1.1 Ciment Cibelcor

Le ciment Cibelcor utilisé dans cette étude est de type CEM I 42,5 R HSR LA de l'usine de Gaurain. Ce ciment est obtenu par broyage simultané d'un minimum de 95 % de clinker Portland et d'une faible quantité de sulfate de calcium. Il est utilisé pour ses propriétés de résistance aux eaux agressives et sa bonne tenue au gel. Ce ciment possède une haute résistance aux sulfates grâce à sa faible teneur en aluminat tricalcique, Il a été utilisé avec succès dans plusieurs travaux scientifiques de l'école des mines de Douai portant sur le traitement des sédiments de dragage portuaire (Wang, 2011 ; Miraoui, 2010 ; Tran Ngoc, 2009 et Dubois 2006) ce qui explique son choix. Sa distribution granulométrique est déterminée par la méthode de diffraction laser, les résultats sont présentés sur la Figure 3.2.

Les résultats des Tableaux 3.1 montrent les caractéristiques du ciment Cibelcor qui nous a été fourni par le cimentier. Pour la classe de résistance de ce ciment et sa densité, les valeurs communiquées ont été vérifiées expérimentalement.

											2 jours	7 jours	28 jours								
Résistance à la compression en (MPa)											23	40	58								
Caractérisation physique											Masse volumique (g/cm ³)		Surface massique (cm ² /g)								
											3,17	3400									
Caractéristiques chimiques (%)																					
PF	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Cl	Na ₂ O	C ₃ A											
1	21,40	3,30	4,00	63,30	2,40	2,80	0,57	0,03	0,53	2,00											

Tableau 3.1 : Caractéristiques du ciment Cibelcor

3.4.1.2 Ciment Vicat

Le ciment Vicat utilisé dans cette étude est de type CEM III/B 42,5 N-LH/SR CE PM NF de l'usine Fos Sur Mer au Sud de la France. C'est un ciment de haut fourneau composé au

minimum de 20 % de clinker et au maximum de 80 % de laitier et d'un ajout de sulfate de calcium. Il est utilisé pour ses propriétés de résistance aux eaux agressives et sa bonne tenue au gel. Ce ciment est moins cher et adapté à la stabilisation des sols. Sa distribution granulométrique est déterminée par la méthode de diffraction laser, les résultats sont présentés sur la Figure 3.2. Les résultats de cette figure montrent que le ciment Vicat contient plus de particules entre 0,4 et 20 μm que le ciment Cibecor. La fraction 20/100 μm est plus importante dans le ciment Cibecor. La grosseur maximale des particules composant le ciment Cibecor est de 40 μm contre 19 μm pour le ciment Vicat. Par conséquent, le ciment Vicat est plus fin que le ciment Cibecor ce qui est également confirmé par leur surface massique (Tableau 3.1 & 3.2)

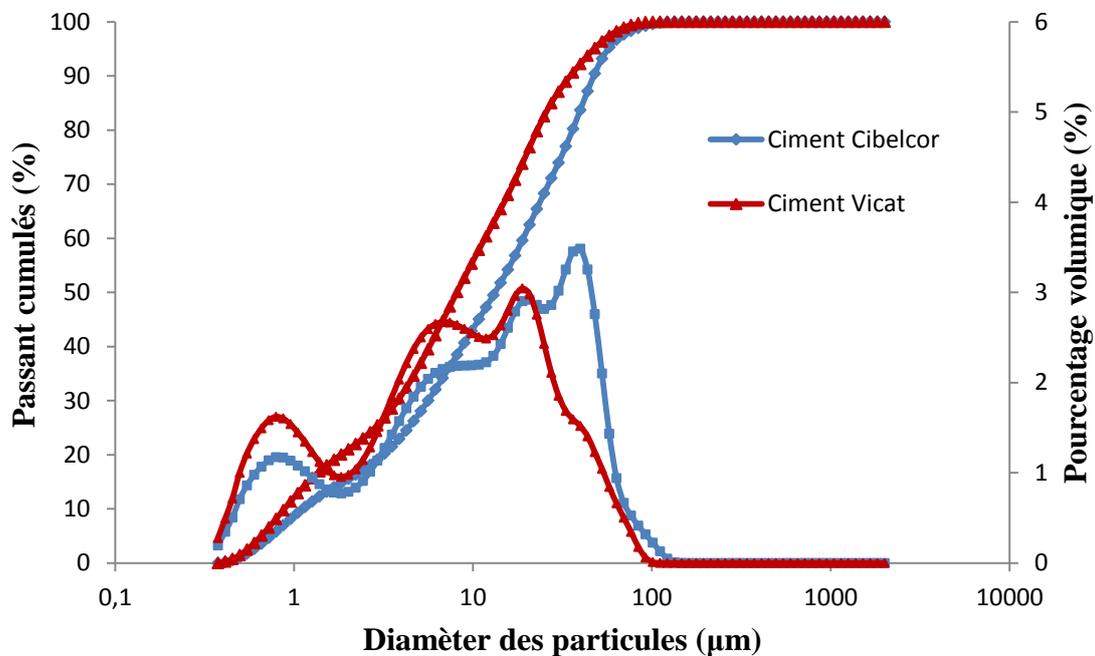


Figure 3.2 : Répartitions granulométriques des deux ciments utilisés

		2 jours	7 jours	28 jours						
Résistance à la compression en (MPa)		15	38	56						
Masse volumique (g/cm ³)			Surface massique (cm ² /g)							
Caractérisation physique		2,99	5390							
Caractéristiques chimiques (%)										
PF	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Cl	Na ₂ O	C ₃ A
0,88	-	-	-	-	-	2,72	-	0,05	0,34	7,80

Tableau 3.2 : Caractéristiques du ciment Vicat

3.4.2 Dosage en liants hydrauliques

Le dosage en ciment est fixé en accord avec les dosages habituellement employés pour le traitement des sols en technique routière. Le guide de traitement des sols (GTS, 2000) recommande, pour un matériau de type B2, un dosage en liant hydraulique de l'ordre de 6 %. Ce pourcentage est calculé par rapport à la masse sèche totale.

3.5 Evolution du pH et de la conductivité électrique en fonction du dosage en ciment

Afin de déterminer la quantité de ciment permettant d'atteindre des pH alcalins, nous avons réalisé des mélanges eau/sédiment/ciment de rapport L/S de 5 dans lequel un pourcentage croissant de ciment est incorporé jusqu'à l'équilibre du pH.

Dans un premier temps, nous avons mesuré le pH et la conductivité électrique du ciment incorporé en dosage croissant dans l'eau déminéralisée (50 ml) constituant ainsi des courbes de références, ensuite dans un rapport liquide sur solide de 5 (L = 50 ml et S = 10 g).

Les résultats de la Figure 3.3 montrent que, pour le même rapport L/S = 5, la valeur de pH se stabilise au voisinage de 12 pour un dosage en ciment Cibecor supérieur à 3 % et un dosage en ciment Vicat supérieur à 6 %. Par contre, un dosage de 0,5 % des deux ciments dans 50 ml d'eau déminéralisée est largement suffisant pour atteindre la stabilité du pH en l'absence des sédiments PSL.

Par conséquent, un dosage en ciments, Vicat ou Cibecor, de 6 % est suffisant pour atteindre des pH alcalins.

La Figure 3.4 indique que la valeur de la conductivité électrique augmente avec l'ajout de ciment, elle est importante en présence des sédiments PSL dans la solution. Ce constat

pourrait être expliqué par la présence des composés inorganiques dans ces matériaux et qui se solubilisent sous forme d'ions dans la solution.

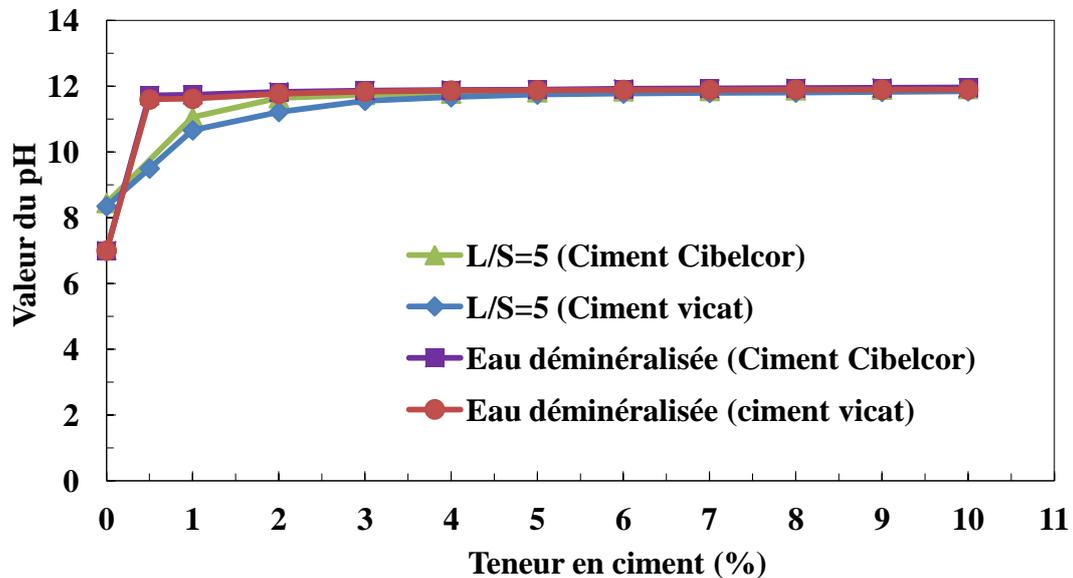


Figure 3.3 : Evolution du pH en fonction du pourcentage de ciment

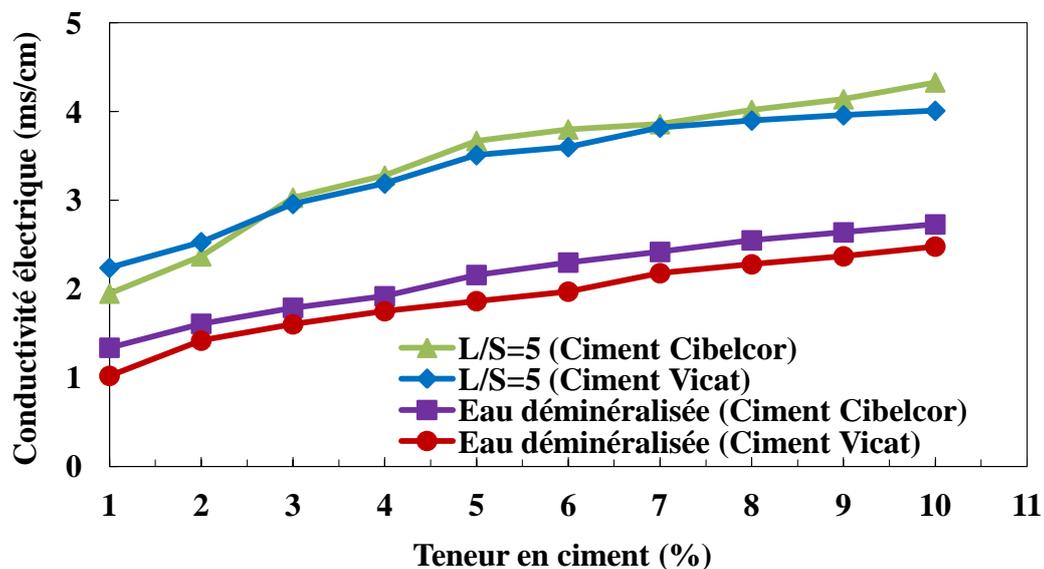


Figure 3.4 : Evolution de la conductivité électrique en fonction du pourcentage de ciment

3.6 Etude de comportement mécanique des sédiments traités aux ciments

L'utilisation des sédiments en technique routière nécessite de vérifier plusieurs critères à court et long par :

- Essais de poinçonnement permettant d'apprécier l'Indice Portance Immédiate (IPI) [NF P94-078, 1997; NF P94-093, 1999] ;
- Essais de compression uniaxiale pour apprécier les cinétiques de prise et de déterminer l'âge autorisant la mise en circulation de la couche traitée [NF P98-232-1, 1991] ainsi que la détermination des modules élastique en compression ;
- Essais de traction indirecte pour évaluer les résistances à la traction et les module élastiques en traction (R_t et E_t) [NF P98-232-3].

3.7 Caractéristiques de compactage des sédiments de dragage traités aux ciments

3.7.1 Composition des mélanges sédiments/liants étudiés

Pour améliorer les caractéristiques mécaniques des sédiments bruts, nous avons testé un traitement avec des ciments (Cibelcor et Vicat) dont les proportions se résument dans le Tableau 3.3.

Formulations	Sédiment PSL (% de MS)	Ciment Cibelcor (% de MS)	Ciment Vicat (% de MS)
Brut	100	0	0
A1	94	6	0
A2	92	8	0
B1	94	0	6
B2	92	0	8

Tableau 3.3 : Proportions de ciments utilisées pour le traitement des sédiments de dragage

3.7.1.1 Paramètres Proctor modifié des mélanges étudiés

Les Figure 3.5 et 3.6 rassemblent les résultats de l'étude Proctor modifié-IPI sur des mélanges traités aux ciments Cibelcor et Vicat. Ces résultats permettent d'établir des variations de la teneur en eau et de la densité sèche en fonction de la teneur en ciment utilisé. Elles sont illustrées sur les Figures 3.7 et 3.8. On constate que le traitement des mélanges à 6 % des ciments Cibelcor et Vicat entraîne une amélioration considérable de l'Indice Portant Immédiat (IPI) et une diminution de la densité sèche avec une légère augmentation de la teneur en eau à l'optimum Proctor. Par comparaison aux traitements à 6 %, le traitement des mélanges à 8 % des deux ciments n'apporte pas de variation significative. On observe tout de

même une légère augmentation de la densité sèche et une faible diminution de la teneur en eau et de l'IPI à l'optimum Proctor.

En comparant le traitement des mélanges aux ciments Cibecor et Vicat, on constate une évolution comparables des caractéristiques de compactages pour les deux ciments tandis que le traitement au ciment Vicat présente un indice IPI plus important que celui du ciment Cibecor. Cela pourrait être expliqué par la différence de composition des deux ciments ainsi que leur finesse.

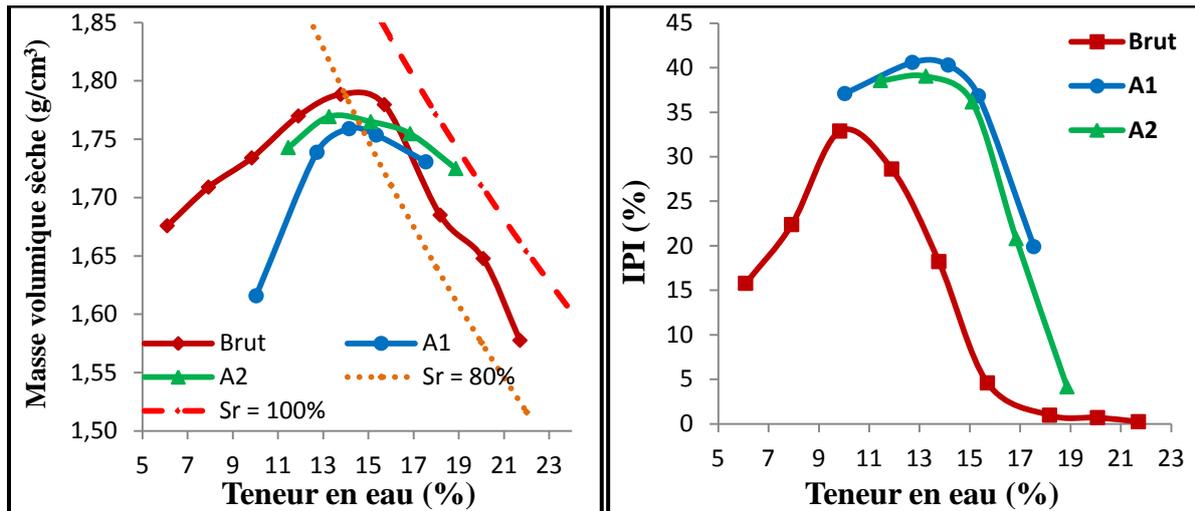


Figure 3.5 : Evolution de la densité sèche et de l'IPI en fonction de la teneur en eau des mélanges traités au ciment Cibecor

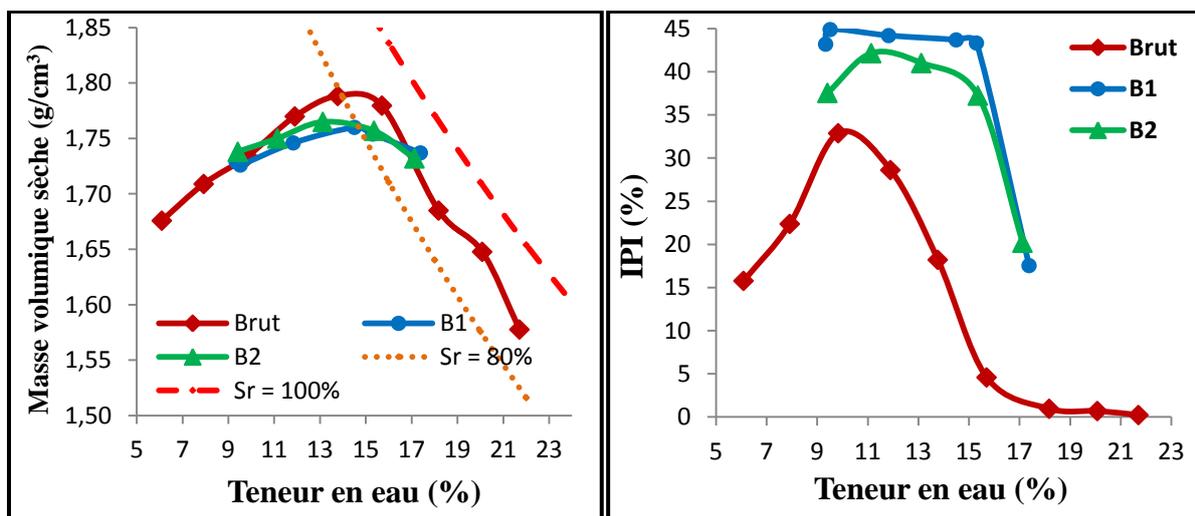


Figure 3.6 : Evolution de la densité sèche et de l'IPI en fonction de la teneur en eau des mélanges traités au ciment Vicat

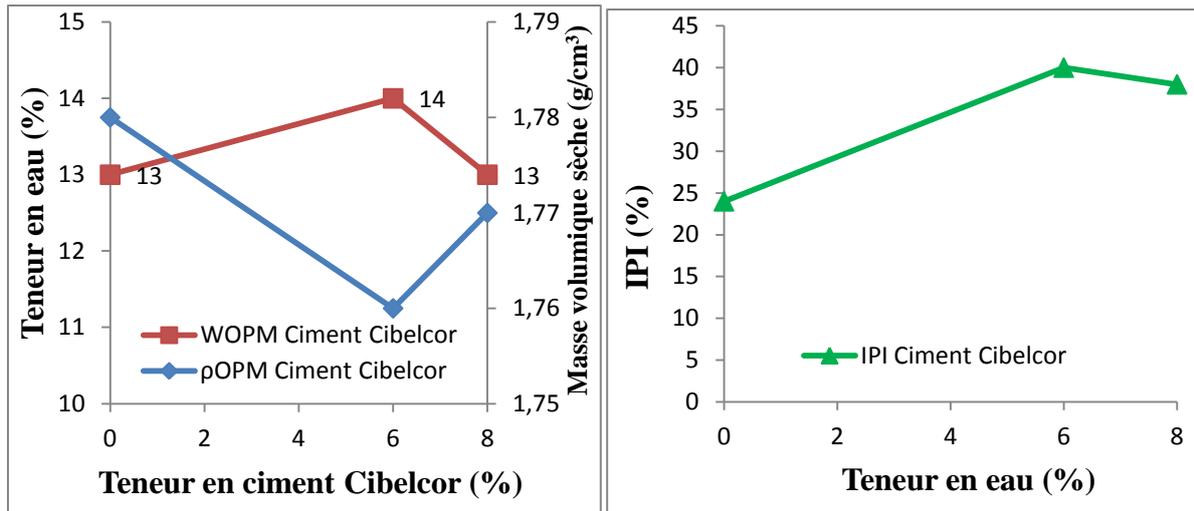


Figure 3.7 : Variation de WOPM et ρOPM en fonction du ciment Cibelcor

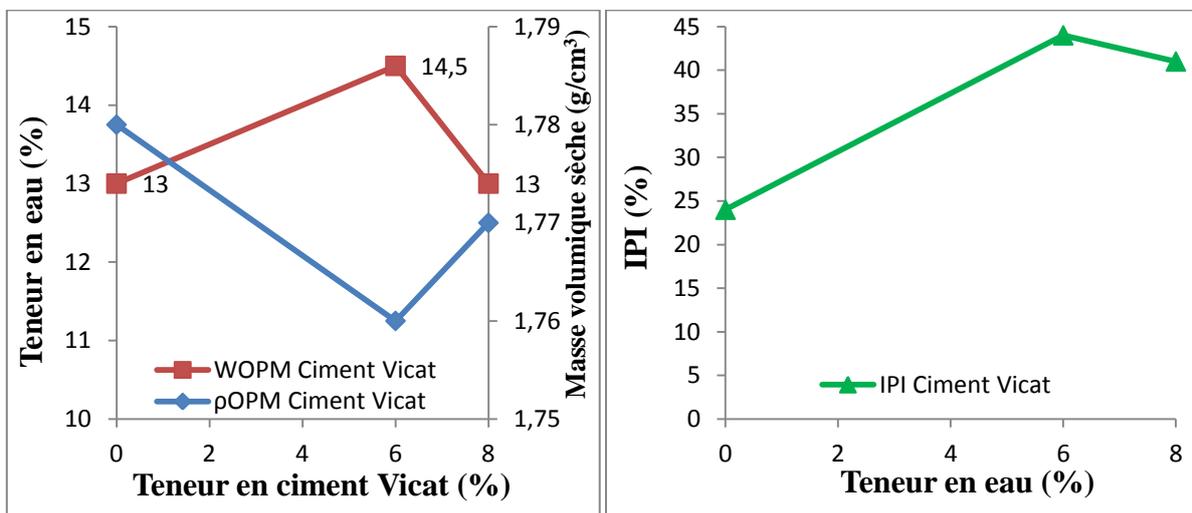


Figure 3.8: Variation de WOPM et ρOPM en fonction du ciment Vicat

3.7.1.2 Confection des éprouvettes

Pour la mise en œuvre d'une couche de fondation sur un chantier, le GTR préconise d'obtenir une qualité de compactage de niveau « Q2 » (GTR, 2000). Cela signifie qu'à la teneur en eau de l'Optimum Proctor Modifié, la densité moyenne en haut de couche doit être égale au minimum à 97 % ρ_{dOPM} et celle en fond de couche 95 % ρ_{dOPM} .

La confection des éprouvettes est réalisée selon la norme NF P98-114-3, les éprouvettes de 10 cm de longueur et 5cm de diamètre sont utilisées pour réaliser les essais mécaniques, en considérant que la taille maximale des matériaux est inférieure 6,3 mm. Le protocole de

confection utilisé est par compression statique, la description des moules et les modalités de conservation normale sont précisées dans la norme NF P98-230-2.



Figure 3.9 : Illustration de la confection des éprouvettes par compression statique

En ce qui concerne la confection des éprouvettes (Figure 3.9), la quantité de matériau humide de chaque éprouvette est calculée d'une part, selon l'équation (3.1) pour les essais de la compression uniaxiale et d'autre part, selon l'équation (3.2) pour les essais de la traction indirecte, en utilisant les caractéristiques de compactage. Les éprouvettes confectionnées sont conservées dans des boîtes en plastique hermétique à 20 °C.

$$M = \frac{V \times (1 + w_{OPM}) \times 0,97 \times \rho_{dOPM}}{100} \quad (3.1)$$

$$M = \frac{V \times (1 + w_{OPM}) \times 0,95 \times \rho_{dOPM}}{100} \quad (3.2)$$

Avec : M : masse théorique de l'éprouvette à la confection (g) ;

ρ_{dOPM} : masse volumique sèche à l'Optimum Proctor Modifié ;

V : volume de l'éprouvette (cm³) ;

w_{OPM} : teneur en eau à l'Optimum Proctor Modifié (%).

Les éprouvettes cylindriques « 5 x 10 » ($\Phi = 5 \text{ cm}$; $h = 10 \text{ cm}$) pour les essais de la compression uniaxiale ont été confectionnées en visant la teneur en eau à l'optimum Proctor W_{OPM} et 97 % de la masse volumique sèche à l'optimum ρ_{dOPM} . Par contre pour les essais de la traction indirecte, on vise la teneur en eau à l'optimum Proctor modifié W_{OPM} et 95 % de la masse volumique sèche à l'optimum ρ_{dOPM} .

3.7.1.3 Essai d'aptitude au traitement

Cet essai consiste d'une part, à suivre le gonflement volumique (Gv) éventuel pouvant se développer durant la réaction hydratation et d'autre part à mesurer le niveau de résistance à la traction indirecte (Rit) atteint à la fin de l'essai. Il a été réalisé dans des conditions de cure, particulièrement défavorables en comparaison de ce que peut subir le matériau dans l'environnement, accélérant les réactions de prise et d'hydratation des liants hydrauliques, conformément à la norme NF P94-100.

Après la phase de confection des éprouvettes d'élanement 1 ($\phi * h = 5 * 5$), ces dernières ont été entourées par des bandes en plastiques maintenues par des élastiques afin d'éviter qu'elles se dégradent pendant l'immersion. Les éprouvettes confectionnées sont immergées dans l'eau et maintenues à 40 °C pendant 7 jours, après 4h de conservation normale à 20 °C (Figure 3.10).

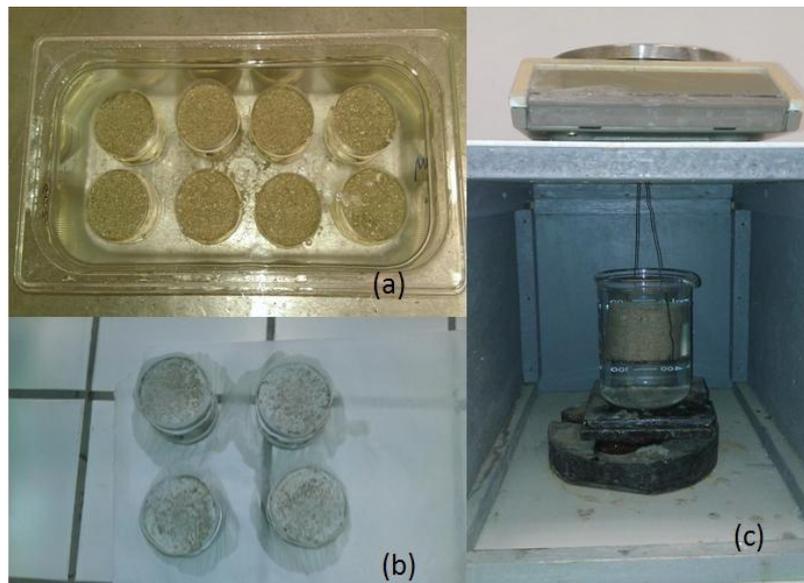


Figure 3.10 : Aptitude de sédiments au traitement, aperçu pendant (a) et après immersion (b) et pesée hydrostatique des éprouvettes (c)

Le volume initial des éprouvettes (V_i) est calculé immédiatement après leur confection, à partir des mesures du diamètre (D) et de la hauteur (h) déterminées au pied à coulisse. A la fin de l'essai, le volume final (V_f) des éprouvettes est déterminé par pesée hydrostatique. Après avoir épongé leurs surfaces, elles sont pesées à l'air (M_a) et dans l'eau (M_w). Ce volume est donc calculé selon l'équation 3.3 :

$$V_f = \frac{(M_a - M_w)}{\rho_w} \quad (3.3)$$

Finalement, le gonflement volumique exprimé en pourcentage est calculé selon l'équation 3.4 :

$$G_v = \frac{(V_f - V_i)}{V_i} \quad (3.4)$$

A la fin de l'essai, La résistance à la traction indirecte (R_{it}) est déterminée par compression diamétrale sur quatre éprouvettes. La force à la rupture de l'éprouvette permet de calculer la résistance (R_{it}) selon l'équation 3.5 :

$$R_{it} = 2 \times 10^{-2} \times \frac{F_r}{h \times D \times \pi} \quad (3.5)$$

Les résultats obtenus du gonflement volumique des éprouvettes cylindriques en fonction de la nature et du dosage en liant hydraulique utilisé sont présentés sur la Figure 3.11. Sur cette dernière, nous avons également indiqué les valeurs seuils recommandées (GTS, 2000). Il ressort de ces résultats que le traitement au ciment Cibelcor ou Vicat ne présente pas de risque de gonflement. Les valeurs obtenues avoisinant le 1 % appartiennent au domaine des traitements adaptés. Le gonflement volumique de ces mélanges vérifie le seuil minimal de 5% exigé par le guide de traitement des sols.

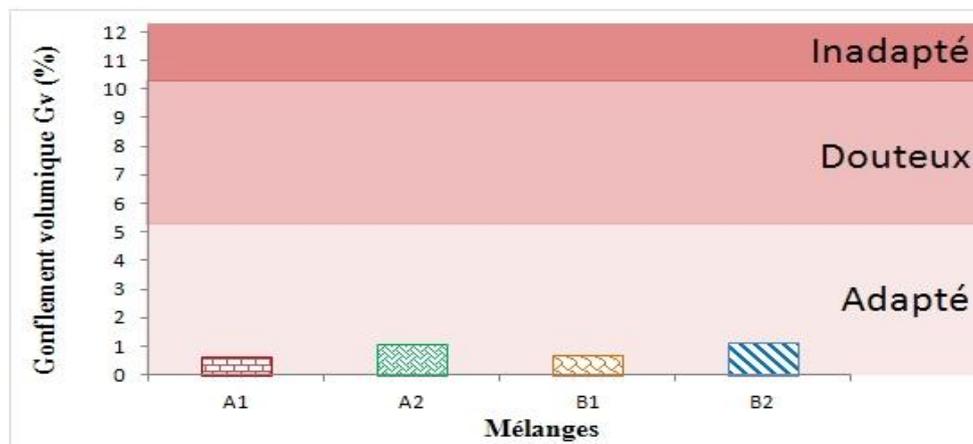


Figure 3.11 : Aptitude au traitement – gonflement volumique en fonction des mélanges élaborés

Les valeurs moyennes des mesures de la résistance à la traction indirecte (R_{it}) pour ces mélanges sont présentées sur la Figure 3.12. Nous y avons également précisé les valeurs préconisées par le guide GTS. Au niveau des performances mécaniques, les résultats obtenus montrent que les mélanges A2 et B2 sont conformes aux préconisations du guide GTS. Néanmoins, le mélange A1 et A2 appartient au domaine douteux.

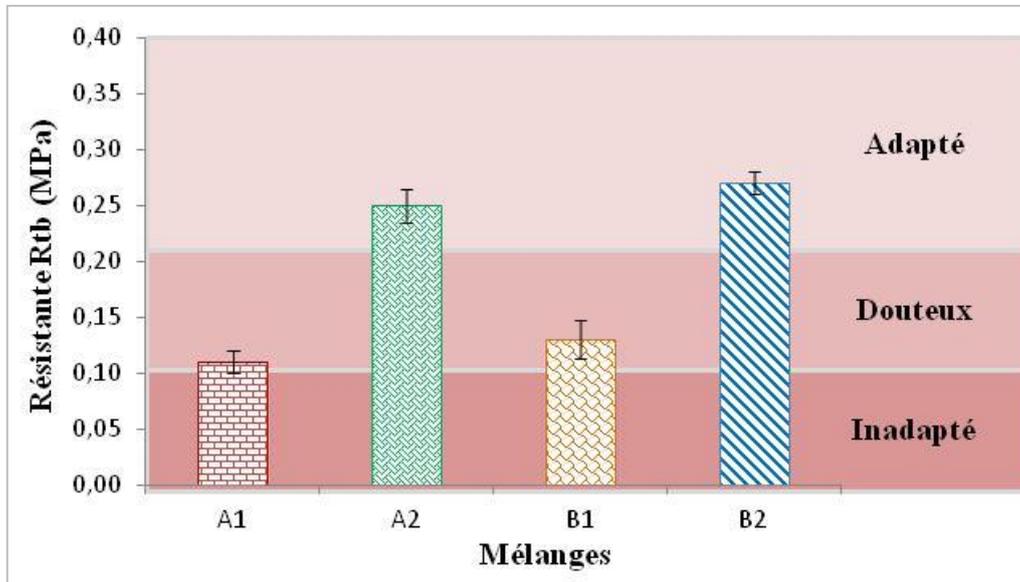


Figure 3.12 : Aptitude au traitement – résistance à la traction indirecte des mélanges élaborés

3.7.1.4 Résistances mécaniques et du modules d'élasticité

a) Résistance à la compression uniaxiale

L'essai de compression a plusieurs objectifs : Il permet de déterminer l'âge autorisant la circulation des engins de chantier sur la couche traitée, de vérifier la résistance de la couche à l'immersion au jeune âge ainsi que la résistance au gel. Seul le premier point est abordé dans cette étude.

La résistance à la compression uniaxiale est évaluée à 7 et 28 jours de cure normale. Le critère de traficabilité est jugé satisfaisant dès lors que la résistance en compression uniaxiale (R_c) est supérieure à 1 MPa. L'essai de compression a été évalué conformément à la norme NF EN 13286-41. Il s'agit d'estimer le temps nécessaire pour que cette condition soit vérifiée. Les courbes d'évolution des résistances à la compression uniaxiale permettent également d'apprécier les cinétiques de prise des différents liants. Trois échantillons sont confectionnés pour chaque mélange et chaque période de cure afin de déterminer la moyenne des résistances. Les résultats de la Figure 3.13 indiquent que seul le mélange B2 dépasse le 1 MPa à 7 jours de cure tandis que le mélange A2 remplit cette condition à 28 jours de cure. On

constate que les résistances à la compression uniaxiale des mélanges avec le ciment Vicat sont plus importantes que celles du ciment Cibelcor.

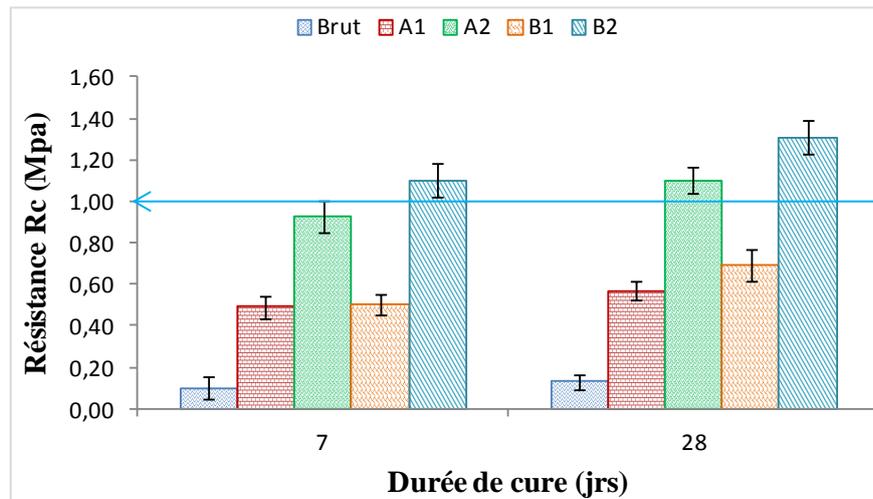


Figure 3.13 : Résistance à la compression uniaxiale des mélanges élaborés

b) Résistance à la traction et module de Young

La résistance à la traction et le module de Young des mélanges élaborés sont évalués au moyen de l'essai de traction diamétrale sur des éprouvettes cylindriques d'éclatement 2 à 28 jours de maturation selon la norme NF P98-232-3. Le principe de l'essai de traction diamétrale consiste à effectuer une compression diamétrale en appliquant une charge linéique sur deux génératrices diamétralement opposées de l'éprouvette cylindrique (Figure 3.14).

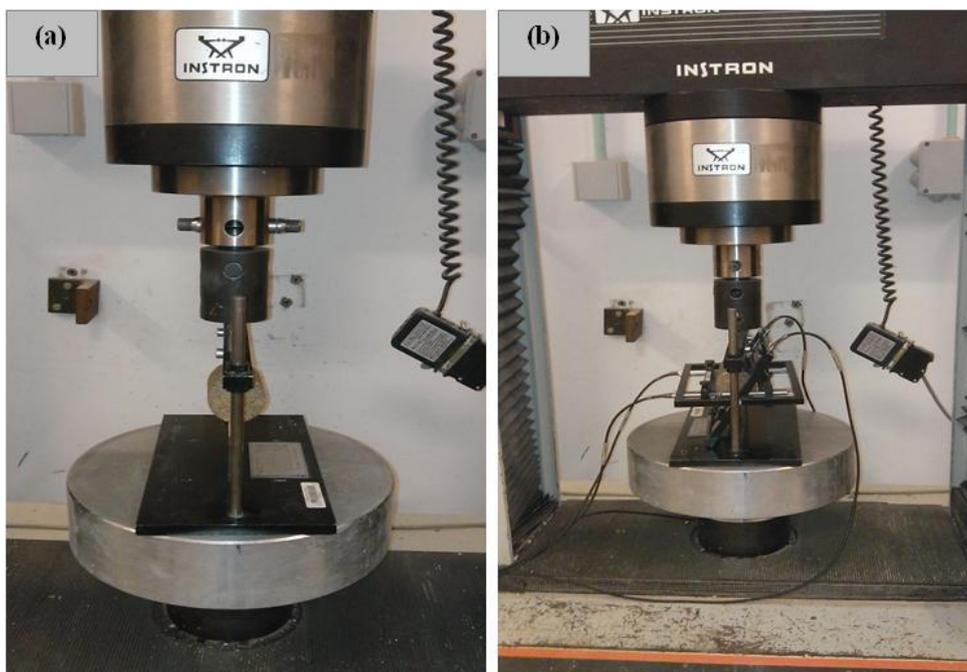


Figure 3.14 : Illustration de l'essai de traction diamétrale (a) et détermination de module de Young (b)

La résistance à la traction diamétrale est déterminée à partir de la force de rupture de l'éprouvette cylindrique (F_r), en utilisant l'équation (3.6) :

$$R_t = 0,8 \times R_{it} = 0,8 \times 2 \times 10^{-2} \times \frac{F_r}{\pi \Phi h} \quad (3.6)$$

Avec : R_t : résistance à la traction estimée de R_{it} (MPa) ;

R_{it} : résistance à la compression diamétrale (MPa) ;

F_r : force appliquée sur l'éprouvette au moment de la rupture (N) ;

Φ : diamètre de l'éprouvette (cm) ;

h : hauteur de l'éprouvette (cm).

Les résultats de la Figure 3.15 permettent d'apprécier l'effet du traitement des sédiments du port de Saint-Louis par les ciments Cibelcor et Vicat sur les résistances en traction et modules de Young des matériaux élaborés. Il est important de noter que malgré plusieurs tentatives, nous n'avons pas pu déterminer la résistance à la traction de sédiment brut. Après traitement, on constate une amélioration de la résistance à la traction et du module d'élasticité due à l'hydratation du ciment formant des C-S-H (silicates de calcium hydratés) en présence de l'eau. Ces derniers jouent un rôle de colle qui solidarise les grains de sédiment entre eux formant ainsi un matériau rigide. Cette rigidité dépend du pourcentage et du type de ciment incorporé. Le fait de passer d'un pourcentage de ciment de 6 à 8 % a un effet considérable sur les propriétés mécaniques. On double les résistances mécaniques et on triple pratiquement les modules. La comparaison des résultats des deux ciments révèle que le traitement au ciment Vicat présent des résistances en traction et des modules d'élasticités plus importants que le ciment Cibelcor.

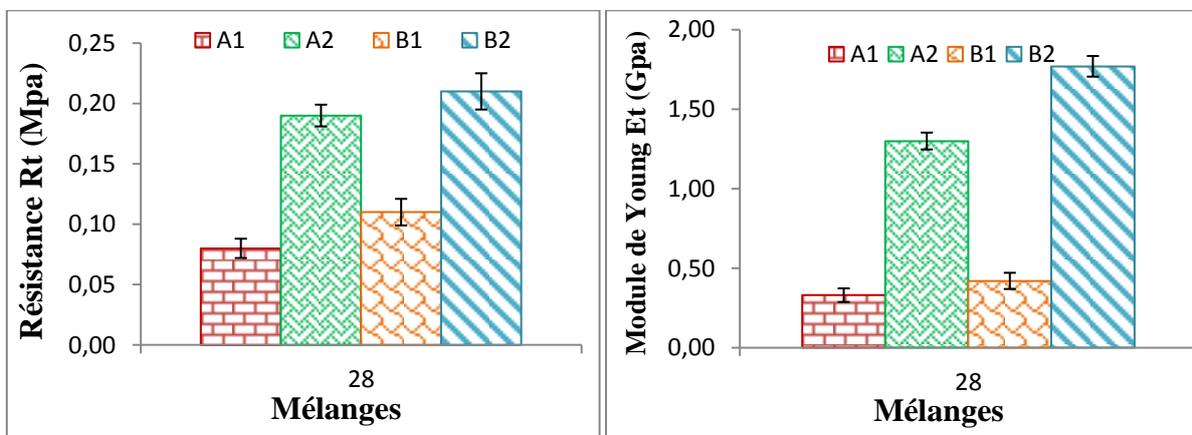


Figure 3.15 : Résistance à la traction et module de Young des mélanges élaborés

c) Etude de la performance mécanique des mélanges élaborés

La performance mécanique des mélanges élaborés est évaluée au travers du module d'élasticité et de la résistance en traction. Les résultats obtenus sont ensuite positionnés sur l'abaque de classification selon la norme NF P 98 114-3 pour vérifier la possibilité d'utilisation en couche de fondation des mélanges élaborés. Il est important de noter que les valeurs de référence pour la classification des matériaux sont définies après 360 jours de maturation. Lorsque la période d'étude au laboratoire ne permet pas d'effectuer la mesure à 360 jours, la norme NF P 98 114-2 propose une corrélation, dépendant du type de liant, entre les résultats à 28, 60 et 90 jours de cure normale à 20 °C et ceux de 360 jours. Les résultats obtenus sur les mélanges élaborés sont estimés à 360 jours en utilisant des coefficients empiriques donnés dans les équations (3.7) :

$$\frac{R_{t28\text{jours}}}{R_{t360\text{jours}}} = 0,6 \qquad \frac{E_{t28\text{jours}}}{E_{t360\text{jours}}} = 0,65 \qquad (3.7)$$

Pour chaque mélange élaboré, au moins trois éprouvettes cylindriques d'élanement 2 sont utilisées pour déterminer la résistance à la traction et le module d'élasticité. Les moyennes des résultats obtenus sont présentées dans la Figure 3.16. A partir de ces résultats, il apparaît que les mélanges élaborés ne présentent pas des performances mécaniques nécessaires pour une utilisation en couche de fondation. La valorisation des sédiments présente un intérêt technique et économique lorsque le mélange élaboré atteint au minimum la classe S2. Il est important de noter que le traitement au ciment Vicat présente des performances mécaniques plus élevées que le ciment Cibelcor. Le traitement à 8 % du ciment Cibelcor ou Vicat n'est pas suffisant pour atteindre les performances mécaniques adéquates pour l'utilisation en couche de chaussée. Augmenter, une fois de plus, le dosage en ciment ne présente plus une solution économiquement viable, il est donc nécessaire de faire appel à un correcteur granulaire afin d'améliorer la composition des mélanges granulaire, diminuer la teneur en eau et augmenter la densité optimale. L'ajout d'un correcteur granulaire local de la carrière Someca est donc envisagé.

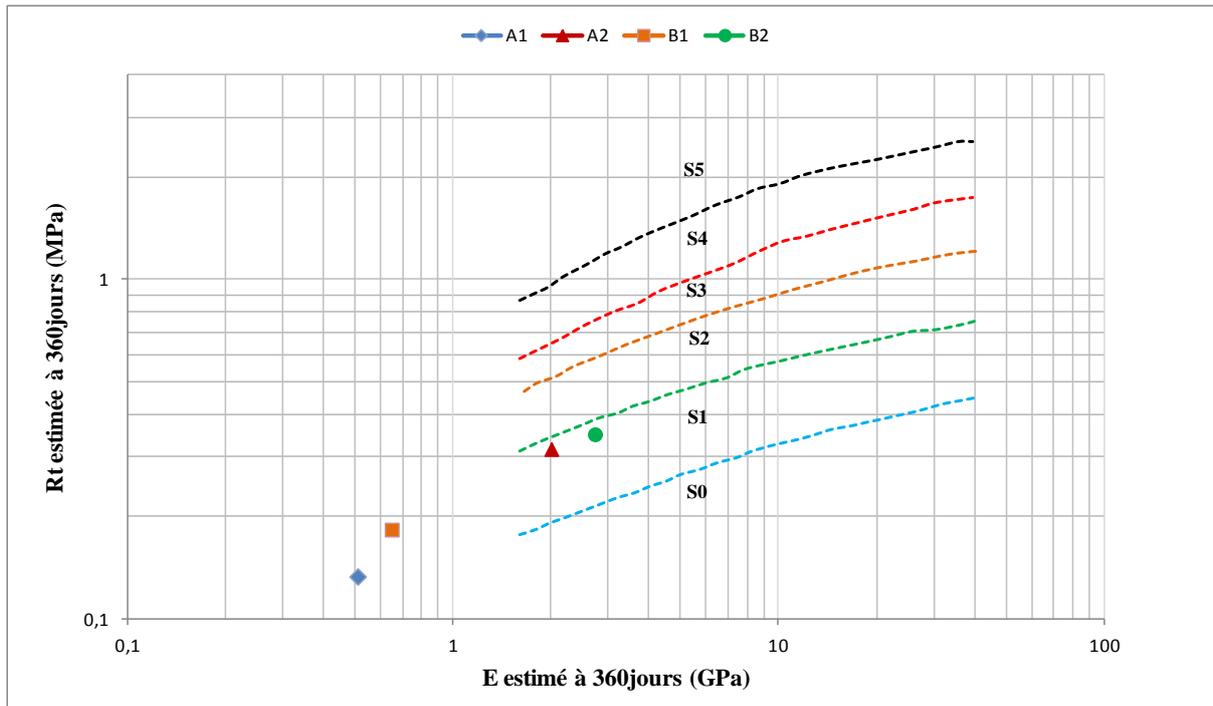


Figure 3.16 : Classification des mélanges à base de sédiment de dragage et des ciments Cibelec et Vicat

3.8 Etude de comportement mécanique des matériaux formulés

L'ajout d'un correcteur granulaire est nécessaire pour améliorer les caractéristiques mécaniques de sédiment du Port de Saint-Louis. Le choix du correcteur granulaire doit satisfaire les contraintes technico-économiques, et environnementales. Afin d'optimiser la distribution granulométrique des matériaux étudiés, le sable local de classe granulaire 0/6,3 mm fourni par le producteur Someca (issue de la carrière de Revest - commune du Revest-les-eaux) a été choisi.

La distribution granulométrique du sable utilisé est présentée dans la Figure 3.17. On constate que nos analyses granulométriques sont plus proches des valeurs inférieures du fuseau de fabrication. Ce matériau représente une distribution granulométrique étalée bien graduée.

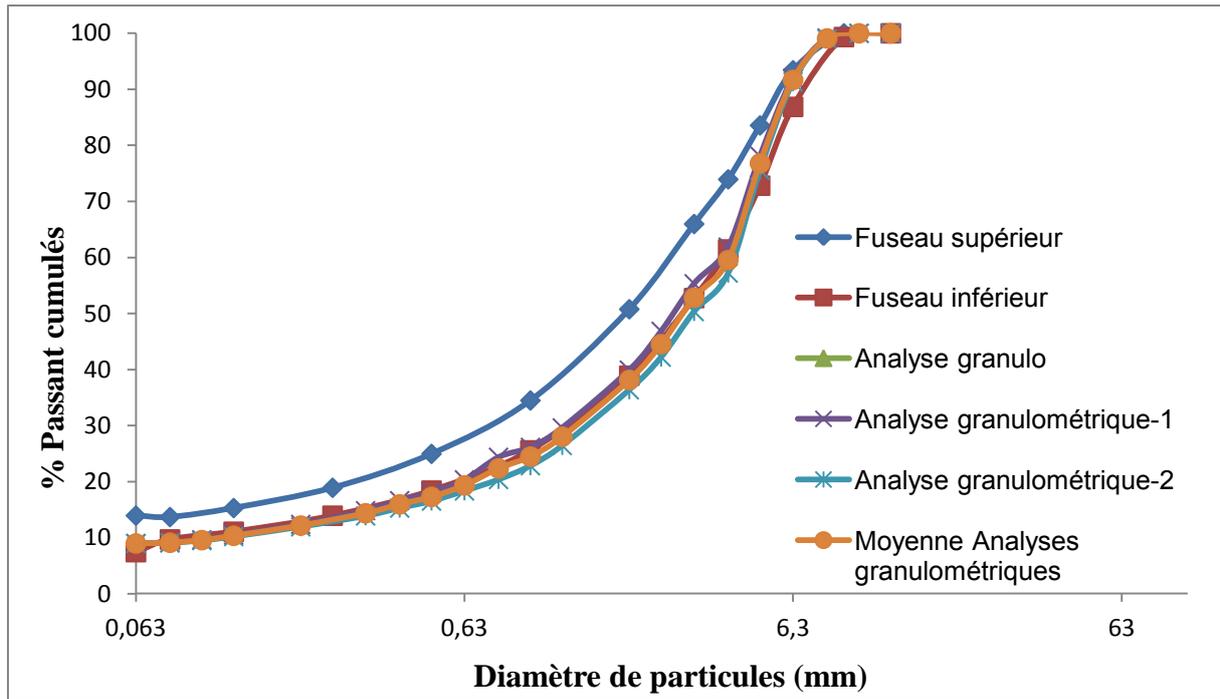


Figure 3.17 : Distribution granulométrique du correcteur granulaire

Des mesures de compacité ont été effectuées afin d'optimiser le taux de substitution du sédiment. Trois méthodes ont été utilisées pour effectuer les mesures de compacité :

- Mesure sans rehausse (moule remplie rasé et compacté) ;
- Mesure avec rehausse (rehausse enlevée après compactage puis le moule est rasé) ;
- Mélange mouillé à 5 % d'eau (mesure avec rehausse).

Le procédé de mise en place est celui utilisé pour la confection des éprouvettes permettant d'évaluer les performances mécaniques des matériaux pour une utilisation en assise de chaussée. Il s'agit d'une vibration associée à une force de compression de 10 kPa pour l'ensemble des essais. Les matériaux utilisés (Sable Someca et sédiment du port de Saint-Louis) sont compactés dans un moule cylindrique de 5 cm de diamètre et 12 cm de hauteur. C'est un moule conçu pour la confection d'éprouvettes cylindriques dans les études en laboratoire des matériaux routiers (Figure 3.18), le dispositif de l'essai expérimental se compose de :

- 1) cylindre de 5 cm de diamètre et de 12 cm de hauteur ;
- 2) rehausse de même dimension permettant de déverser le matériau non compacté ;
- 3) piston en acier de 3kg pour compacter les matériaux ;
- 4) chapeau permettant de fermer le moule cylindrique ;

5) deux coquilles en acier calées sur le chapeau pour assurer la dimension de l'éprouvette après compactage ;

6) presse de 6 tonnes permettant d'appliquer la charge de compactage.

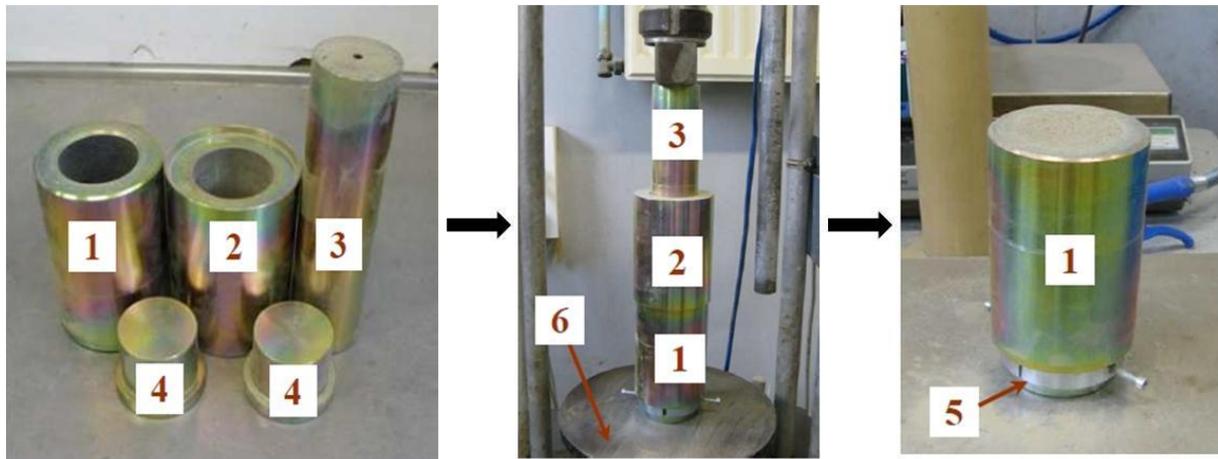


Figure 3.18 : Procédé de mise en place des matériaux [TRAN, 2009]

Les résultats obtenus sont présentés sur la Figure 3.19. Les trois méthodes donnent des résultats de compacité similaires. On constate que la compacité reste stable jusqu'au taux de substitution de sédiment de 30 %. Ensuite la compacité diminue progressivement avec l'augmentation du pourcentage de sédiment. Ces résultats montrent qu'un mélange de 30 % de sédiments et de 70 % de sable Someca semble être optimal. Le mélange 50 % de sédiment et 50 % du sable Someca représente un écart relatif de 6 % de la valeur maximale de la compacité, ce qui ne nous semble pas important, il est donc intéressant de pouvoir étudier la possibilité de valoriser un volume important de sédiment. Il est à signaler que l'ajout de 5 % d'eau n'a visiblement pas d'influence significative sur les résultats de compacité de ces mélanges binaires.

A travers cet essai deux mélanges ont été choisis (Tableau 3.4).

Mélanges	Sédiment PSL (% de MS)	Sable Someca (% de MS)
C1	50	50
D1	30	70

Tableau 3.4 : Mélanges du sable Someca et du sédiment du port Saint-Louis étudiés

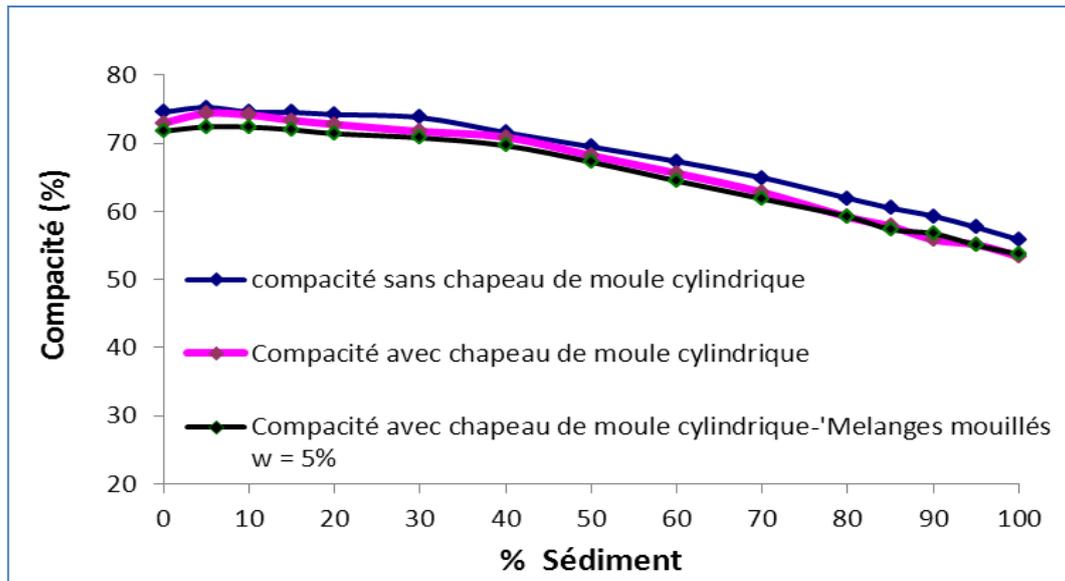


Figure 3.19 : Compacité des mélanges de sédiment de PSL et de sable Someca

3.8.1 Portance et compactage des mélanges bruts sédiment PSL-sable Someca

Les résultats de l'essai Proctor Modifié et d'IPI pour les mélanges bruts de sédiment PSL et de sable Someca sont présentés sur la Figure 3.20. Les caractéristiques optimales de ces mélanges sont reportées dans le Tableau 3.5. On remarque que l'augmentation de la teneur en sable Someca déplace l'Optimum Proctor Modifié vers des masses volumiques sèches plus élevées pour des teneurs en eau plus faibles. Ce comportement est souvent observé en raison de la densité des sables qui est plus élevée que celle des sédiments.

En outre, on constate une augmentation remarquable de l'Indice Portant Immédiat avec l'augmentation de la teneur en sable. Ces valeurs d'IPI se situent dans la gamme de celles préconisées pour la réalisation des couches de fondation. A court terme, les mélanges de sédiment et de sable peuvent être utilisés en technique routière. Il est donc important d'évaluer les performances mécaniques en termes de résistance à la compression uniaxiale, de la résistance à la traction et du module d'élasticité.

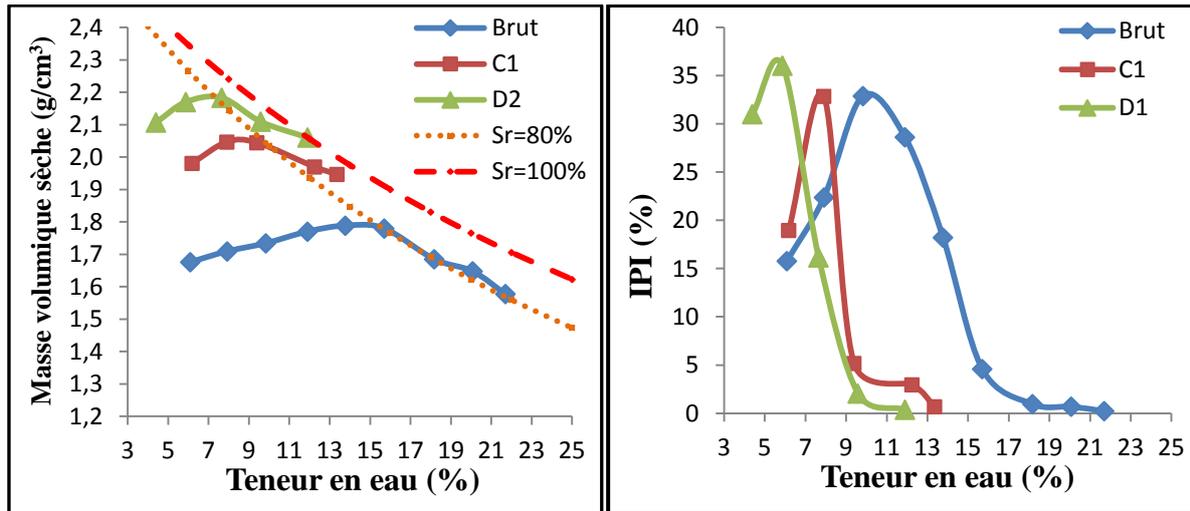


Figure 3.20 : Evolution de la densité sèche et d'IPI en fonction de la teneur en eau pour les mélanges bruts de sédiment /sable Someca

Mélange	W_{OPM} (%)	$\rho_{d\ OPM}$ (g/cm ³)	IPI à W_{OPM} (%)
<i>Brut</i>	14	1,78	24
<i>C1</i>	8	2,05	33
<i>D1</i>	6	2,17	36

Tableau 3.5 : Caractéristiques optimales de portance et de compactage des mélanges bruts de sédiment/sable Someca

3.8.2 Performances mécaniques des mélanges bruts sédiment PSL/sable Someca

L'analyse des performances mécaniques des mélanges bruts (Tableau 3.6 et 3.7) montre la nécessité d'un traitement aux liants hydrauliques pour une éventuelle utilisation en couche de fondation.

Durée de cure normale (jours)	Résistance à la compression uniaxiale (MPa)	Résistance à la traction (MPa)	Module de Young (GPa)
7	0,04	0,0060	0,66
28	0,05	0,0075	0,82

Tableau 3.6 : Valeurs des performances mécaniques du mélange C1

Durée de cure normale (jours)	Résistance à la compression uniaxiale (MPa)	Résistance à la traction (MPa)	Module de Young (GPa)
7	0,05	0,0068	0,78
28	0,57	0,0063	0,91

Tableau 3.7 : Valeurs des performances mécaniques du mélange D1

3.8.3 Portance et compactage des mélanges traités au ciment Cibelcor

La composition des formulations étudiées est reportée dans le Tableau 3.8.

Formulations	Sédiment PSL (% de MS)	Sable Someca (% de MS)	Ciment Cibelcor (% de MS)
A1	94,00	0,00	6
C2	47,00	47,00	6
D2	28,20	65,80	6

Tableau 3.8 : Composition des formulations formées de sédiment du PSL

Les résultats de l'essai Proctor Modifié et d'IPI pour les formulations du Tableau 3.8 sont présentés sur la Figure 3.21. Les caractéristiques optimales de compactage et de portance de ces formulations sont présentées dans le Tableau 3.9. On constate que l'ajout du ciment n'a pas eu d'effet sur la teneur en eau et la densité sèche à l'Optimum Proctor Modifié. Cependant, l'IPI à l'optimum a considérablement augmenté après l'ajout du ciment. Les valeurs d'IPI à l'optimum passent de celles recommandées pour la couche de fondation à celles préconisées pour la couche de base. Le traitement au ciment a donc amélioré la portance des mélanges sédiment/sable Someca.

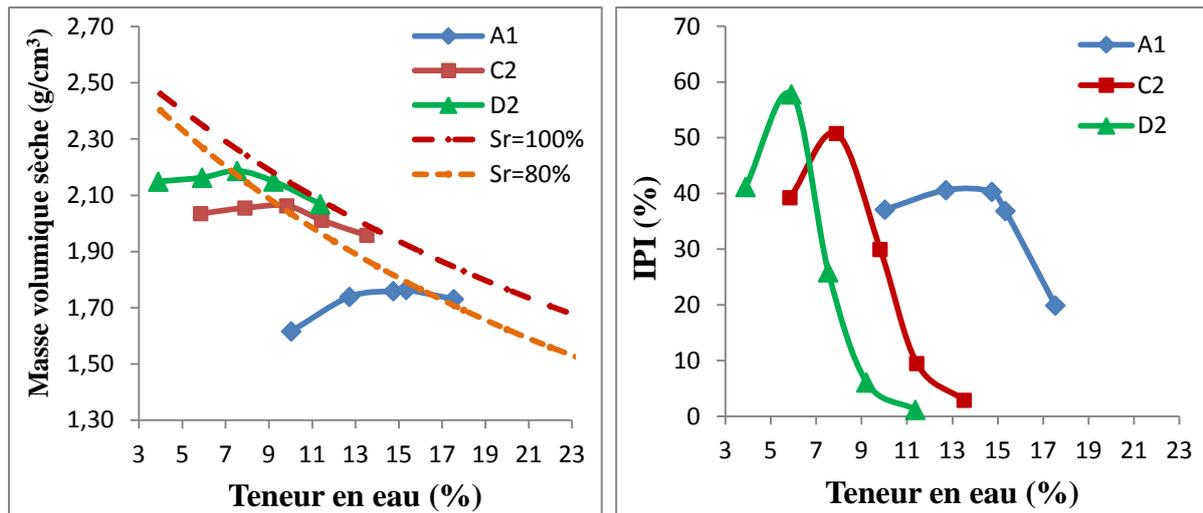


Figure 3.21 : Evolution de la densité sèche et d'IPI en fonction de la teneur en eau pour les formulations formées de sédiments de PSL

Formulations	$W_{OPM}(\%)$	$\rho_{dOPM}(\text{g/cm}^3)$	IPI à $W_{OPM}(\%)$
A1	14	1,76	40
C2	8	2,05	50
D2	6	2,16	57

Tableau 3.9 : Synthèse de l'essai Proctor-IPI pour les formulations issues de sédiments de PSL

3.8.4 Comportement mécaniques des mélanges traités au ciment Cibelcor

3.8.4.1 Résistance à la compression uniaxiale

L'évolution des résistances à la compression uniaxiale des formulations du Tableau 3.8 pour les échéances 7 et 28 jours est présentée sur la Figure 3.22. Les valeurs des résistances à la compression uniaxiale des mélanges croient avec la proportion du sable Someca introduit dans les formulations. La substitution de sédiment PSL par le sable Someca contribue à l'amélioration de la compacité volumique ce qui explique l'augmentation des résistances mécaniques (Figure 3.19). A travers ces résultats le critère de traficabilité est jugé satisfaisant pour les formulations C2 et D2.

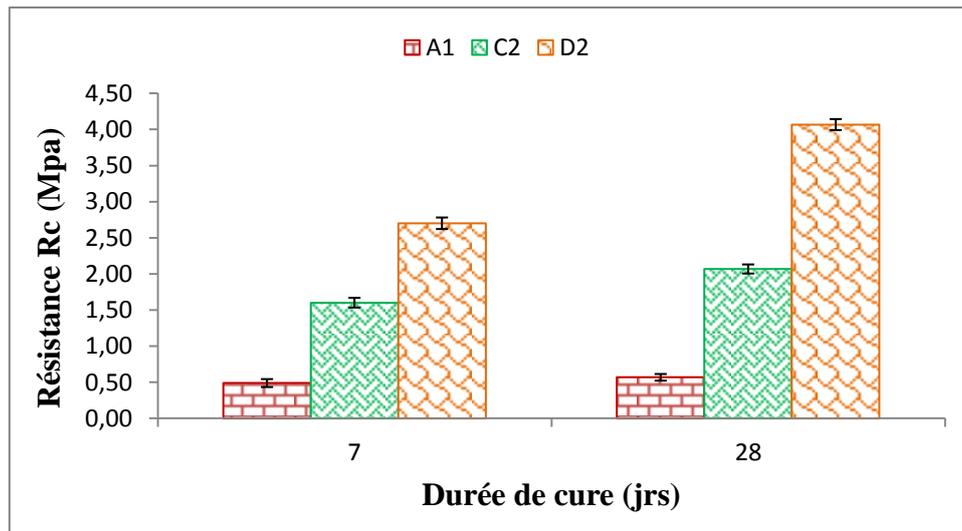


Figure 3.22 : Evolution de la résistance en compression des formulations issues de sédiments de PSL

3.8.4.2 Résistance à la traction et module élastique

Les résultats de la résistance à la traction et du module élastiques des formulations issues de sédiment PSL mesurés à 7, 28 jours et estimées à 360 jours sont présentés respectivement sur la Figure 3.23. Les résistances à la traction de toutes les formulations concordent avec les résultats obtenus avec la résistance à la compression uniaxiale. L'évolution de la résistance à la compression uniaxiale est pratiquement identique à celle de la résistance à la traction et du module élastique.

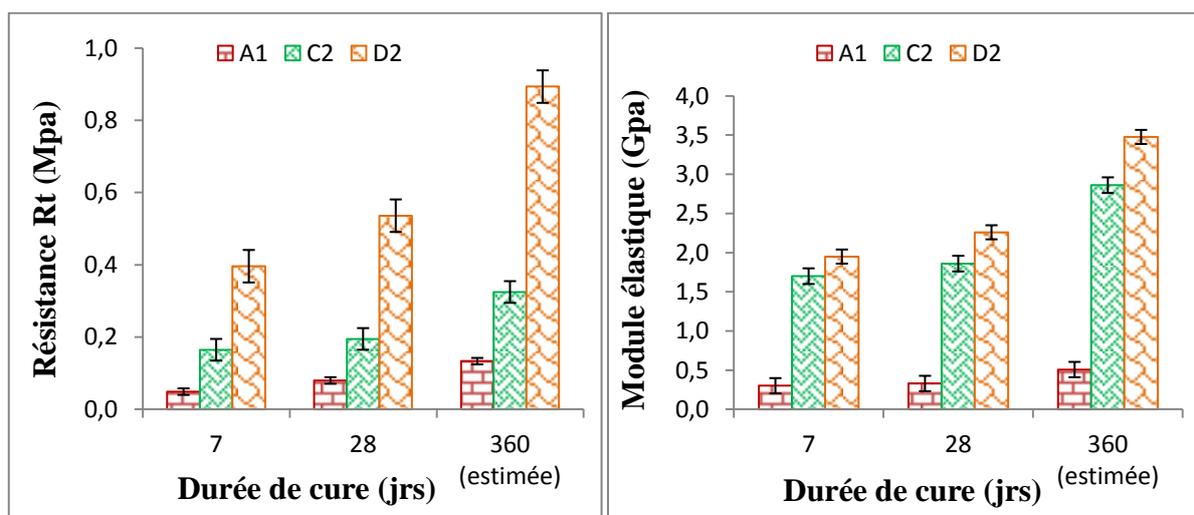


Figure 3.23 : Evolution de la résistance à la traction et le module élastique des formulations

3.8.4.3 Etude de performance mécanique des formulations

A partir des résultats obtenus de la résistance à la traction (R_t) et du module élastique (E), la classe mécanique des formulations étudiées a été déterminée à 360 jours à partir des résultats obtenus à 28 jours en positionnant les données sur l'abaque de performances mécaniques. La classification des formulations est présentée sur la Figure 3.24. Ces résultats indiquent que la formulation C2 se situe dans la classe S1. Cette classe de matériaux n'est pas conforme pour une utilisation en couches d'assises de chaussées. Cependant la formulation D2 se classe à la limite inférieure de la classe S4. A partir de ces résultats, il peut être avancé que cette dernière formulation est adéquate pour une utilisation en couches d'assises de chaussées.

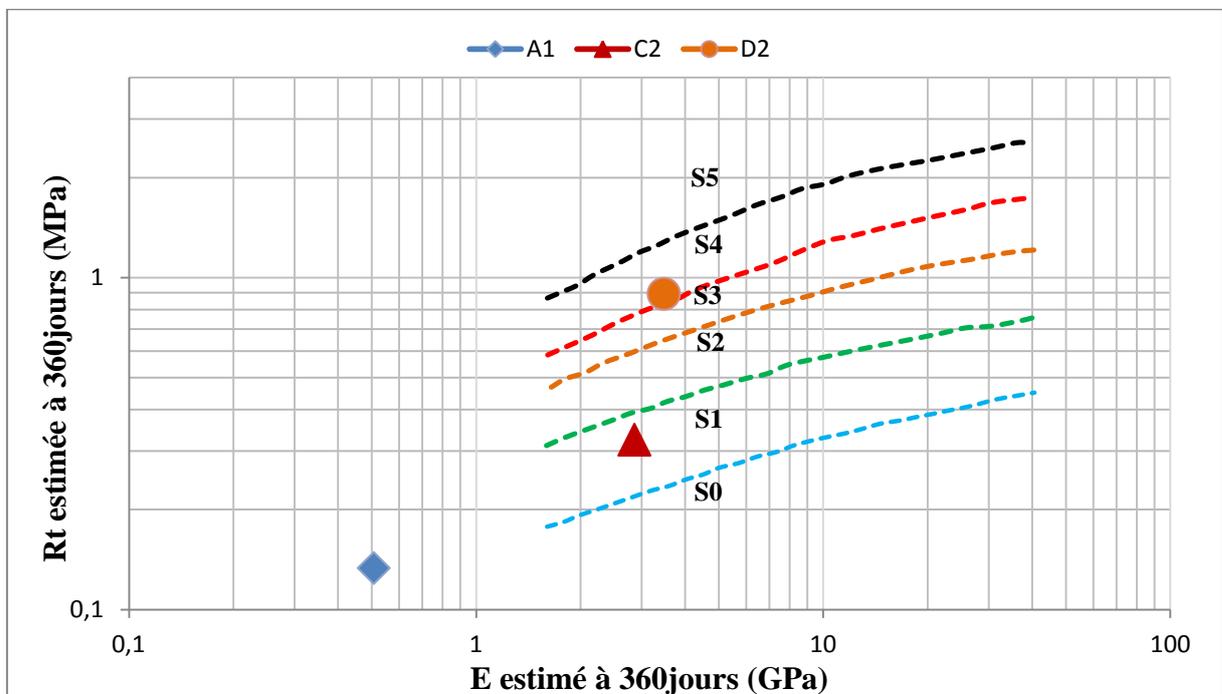


Figure 3.24 : Classification des formulations issues de sédiments de PSL sur des valeurs estimées à 360 jours

3.8.5 Optimisation de formulations issues de sédiments de PSL

Le but de cette optimisation est d'étudier la possibilité d'améliorer le pourcentage de sédiment utilisé dans les formulations C2 et D2. Nous nous sommes proposés d'étudier la formulation intermédiaire dont la composition est reportée dans le Tableau 3.10.

Formulations	Sédiment PSL (% de MS)	Sable Someca (% de MS)	Ciment Cibecor (% de MS)
E2	56,4	37,6	6

Tableau 3.10 : Composition de la formulation optimisée issue de sédiment de PSL

La première étape pour la confection des éprouvettes pour les essais mécaniques concerne la détermination de la masse de matériau à introduire dans le moule. Elle dépend des paramètres de compactage, la masse volumique sèche et la teneur en eau des sédiments traités. Pour les déterminer, nous avons utilisé l'interpolation linéaire des résultats de Proctor Modifié des deux formulations C2 et D2 (Tableau 3.9).

Les mesures de résistances à la compression uniaxiale et à la traction ainsi que le module d'élasticité sont déterminés aux échéances 7 et 28 jours (Tableau 3.11).

Durée de cure normale (jours)	Résistance à la compression uniaxiale (MPa)	Résistance à la traction (MPa)	Module de Young (GPa)
7	2,40	0,28	1,91
28	2,81	0,33	2,17
360 (estimée)	-	0,55	3,34

Tableau 3.11 : Valeurs des résistances mécaniques de la formulation optimisée

La classe mécanique de la formulation E2 est évaluée au travers de la résistance à la traction et du module élastique définies à 28 jours de cure et estimés pour 360 jours. Les résultats obtenus sont ensuite reportés sur l'abaque de classification de la norme NF P98-114-3 permettant ainsi de vérifier la possibilité d'utilisation de ce matériau en couche de fondation. La comparaison des résultats de la Figure 3.25 indique une amélioration de la quantité de sédiment PSL utilisé tout en se positionnant en classe S2. La formulation E2 présente des performances mécaniques adéquates pour une utilisation en couche de fondation. Les deux formulations qui nous semblent importantes à retenir pour l'étude de la durabilité des matériaux formulés sont les formulations D2 et E2.

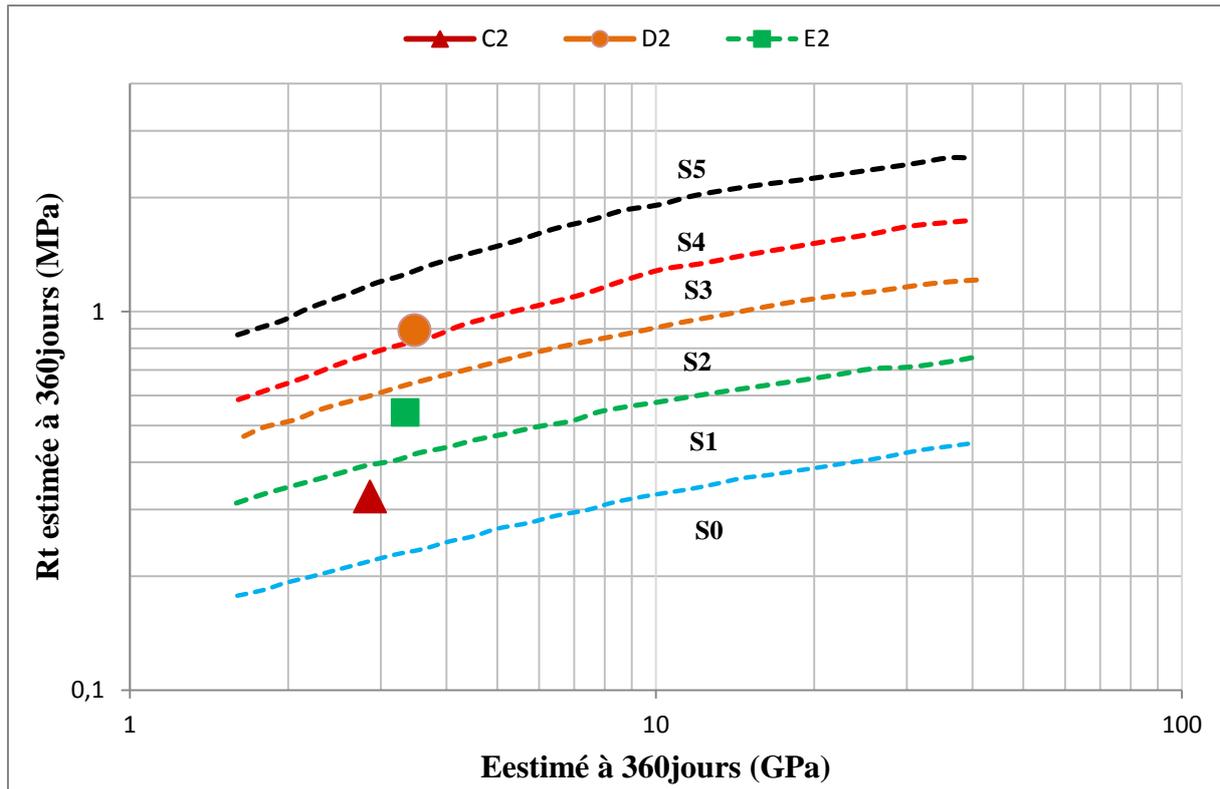


Figure 3.25 : Classification de la formulation optimisée issue de sédiment PSL

3.8.6 Discussion des résultats des performances mécaniques des matériaux élaborés

L'analyse des résultats obtenus permet d'évaluer l'influence de l'ajout de liant hydraulique et/ou correcteur granulaire sur les performances mécaniques des matériaux élaborés. Ces résultats montrent que les résistances mécaniques des matériaux formulés dépendent de la teneur en sédiment, du pourcentage du correcteur granulaire utilisée et du type de liant ainsi que son dosage. Il a été observé qu'en l'absence du liant hydraulique, l'apport du correcteur granulaire a une influence directe sur l'Indice Portant Immédiat mais pas sur les résistances mécaniques. Afin d'améliorer les performances mécaniques du sédiment PSL, il apparaît nécessaire d'associer le sable Someca au traitement au liant hydraulique. La comparaison des résultats du ciment Portland (Cibelcor (CEM I 42,5)) et du ciment de haut-fourneau (Vicat (CEM III/B 42,5)), montre que ce dernier, plus intéressant sur le plan économique, présente des caractéristiques de compactage et des performances mécaniques plus élevées que le ciment Portland. Il est donc intéressant de tester les formulations retenues avec ce ciment de haut-fourneau.

3.8.7 Evaluation environnementale des formulations retenues

Pour évaluer l'impact sur l'environnement des formulations retenues, des essais de lixiviations sur des échantillons après 28 jours de maturation, en monolithe selon la norme NF EN12457-4 et des échantillons broyés selon la norme NF EN 12457-2, ont été réalisés. Les résultats obtenus sont comparés aux valeurs seuils proposés par le guide méthodologique pour l'acceptabilité de matériaux alternatifs en technique routière (Tableau 3.12).

Les résultats de la campagne d'essais de lixiviation montrent que les échantillons de formulations D2 et E2, qu'ils soient broyés ou en monolithes, ne présentent pas de dépassement du seuil pour une utilisation en technique routière (SETRA, 2012). Ces résultats permettent de justifier l'utilisation de ces matériaux en couche de fondation. On remarque également que les concentrations en éléments traces métalliques ainsi que les teneurs en chlorures et sulfates des échantillons broyés sont supérieures à celles des échantillons en monolithe.

	Formulation D2		Formulation E2		Valeurs	
	Echantillon en monolithe	Echantillon broyé	Echantillon en monolithe	Echantillon broyé	Valeurs à respecter par au moins 100 % des échantillons (mg/kg de MS)	limites à ne pas dépasser en lixiviation pour être candidat à une utilisation en technique routière
Eléments	Valeurs en mg / kg M.S à 28 jours	Valeurs en mg / kg M.S à 28 jours	Valeurs en mg / kg M.S à 28 jours	Valeurs en mg / kg M.S à 28 jours		
As	0,045	0,094	0,045	0,086	1,50	2,0
Ba	1,044	2,340	1,204	2,130	60,00	100,0
Cd	0,018	0,041	0,019	0,039	0,12	1,0
Cr	0,067	0,093	0,031	0,059	1,50	10,0
Cu	0,070	0,173	0,084	0,183	6,00	50,0
Mo	0,036	0,081	0,036	0,071	1,50	10,0
Ni	0,031	0,129	0,065	0,134	1,20	10,0
Pb	0,024	0,068	0,026	0,048	1,50	10,0
Sb	0,039	0,067	0,037	0,055	0,18	0,7
Se	0,089	0,164	0,089	0,176	0,30	0,5
Zn	0,025	0,039	0,023	0,039	12,00	50,0
Chlorures	102	186	120	239	2400	15000
Sulfates	170	356	167	347	3000	20000
Fraction soluble	2794	9812	3471	10083	12000	60000
pH	12,1	12,3	12,2	12,7	[5,5 – 13,0]	-

Tableau 3.12 : Résultats des essais de lixiviation sur des formulations de sédiments de PSL

3.8.8 Réalisation et suivi d'essais lysimétriques

Le guide méthodologique « acceptabilité de matériaux alternatifs en technique routière – Evaluation environnementale » (SETRA, 2012), fournit une démarche d'évaluation de l'acceptabilité environnementale de matériaux alternatifs élaborés à partir de déchets et destinés à être utilisés en technique routière. La démarche d'évaluation environnementale repose sur une connaissance précise :

- du déchet à partir duquel est élaboré le matériau alternatif (étape 1) ;
- du mode d'élaboration du matériau alternatif et du matériau routier associé ainsi que de l'usage routier envisagé (étape 2) ;
- de la caractérisation environnementale des matériaux alternatif et routier (étape 3).

L'objectif global de l'étape de caractérisation environnementale est de démontrer, pour l'usage routier envisagé, que les émissions des matériaux alternatif et routier sont compatibles avec le respect des objectifs de qualité des eaux retenus dans le guide méthodologique. Cette étape envisage trois niveaux d'investigations permettant, au final, de graduer l'effort de démonstration en fonction du risque que présentent les matériaux concernés, vis-à-vis de l'environnement :

- le niveau 1 repose sur la réalisation d'essais de lixiviation et d'analyses en contenu total ;
- le niveau 2 repose sur la réalisation d'essais de percolation ;
- le niveau 3 repose sur la production d'une étude spécifique.

La production de l'étude spécifique, associée au niveau 3 de caractérisation environnementale, est à envisager lorsque les niveaux 1 et 2 de caractérisation environnementale ne permettent pas de justifier l'acceptabilité en technique routière d'un matériau alternatif et/ou routier, ou que les procédures ou les essais associés ne semblent pas adaptés à la nature ou au comportement de ces matériaux. Cette étude peut reposer sur des essais lysimétriques ou la réalisation et suivi de plots expérimentaux.

3.8.8.1 Les essais lysimétriques

L'objectif d'un essai lysimétrique est de simuler le relargage d'un matériau routier dans des conditions se rapprochant du scénario d'utilisation envisagé. En termes de représentativité, ces conditions sont intermédiaires entre celles des essais de laboratoire usuels (lixiviation, percolation) et celles d'un plot expérimental.

Une fois les facteurs d'influence identifiés et leur caractère déterminant évalué selon les prescriptions de la norme NF EN 12920+A1, les essais lysimétriques présentent généralement l'avantage, d'une part de pouvoir approcher plus fidèlement que ne le font les essais en laboratoire certains facteurs d'influence : granulométrie, épaisseurs des couches, compacité, et d'autre part, de pouvoir en contrôler d'autres (régime hydrique, taux d'infiltration) sans être dépendant d'une exposition imposée comme cela est généralement le cas pour un plot expérimental.

Une planche d'essai lysimétrique est un ouvrage à l'échelle 1 de taille réduite (4 à 10 m²) au sein duquel le matériau routier est mis en œuvre dans des conditions représentatives de l'usage routier étudié (épaisseurs et nature des couches supérieures y compris couche de roulement, compacité, etc.) et soumis à des conditions d'exposition contrôlées permettant de reproduire des conditions extérieures prédéfinies (météorologie) ou des qualités de pluie spécifiques à certains scénarios (pluies acides). Cette planche est équipée afin de collecter les eaux qui ont percolé à travers la structure ainsi que les eaux de ruissellement, de manière séparée.

Une planche témoin d'essai lysimétrique est également mise en œuvre. Cette dernière reproduit la même structure mais utilise, au lieu du matériau routier testé, un matériau naturel de référence (de préférence siliceux). Elle permet de valider le fonctionnement de la planche d'essai lysimétrique intégrant le matériau routier testé et, éventuellement, de relativiser les résultats.

Le schéma type de la planche expérimentale d'essai lysimétrique que nous avons conçu à l'Ecole des Mines de Douai est représenté dans la Figure 3.26.

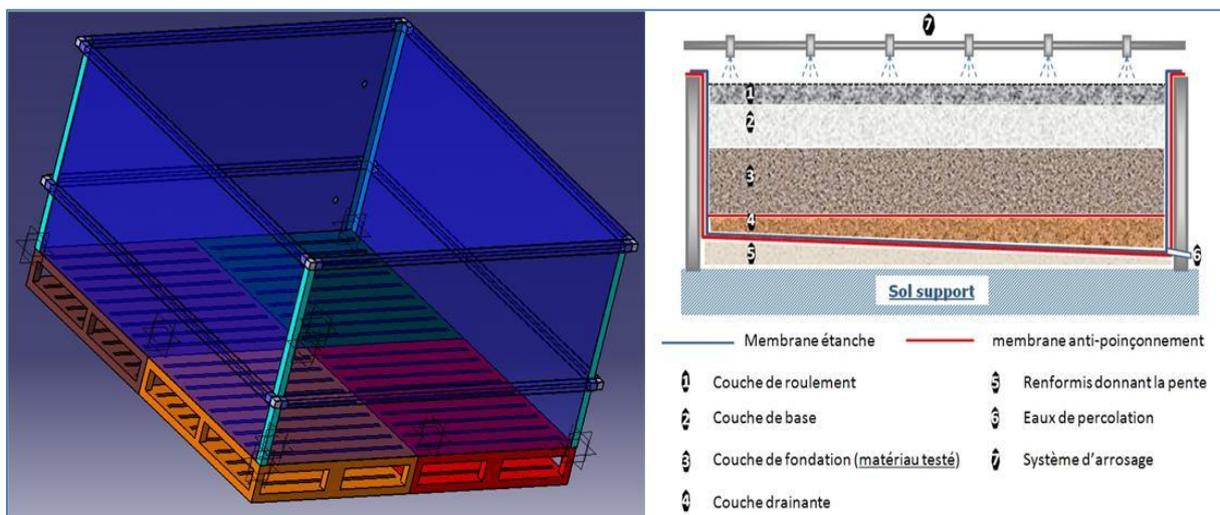


Figure 3.26 : Conception et modélisation de la planche expérimentale

Dans le but de valider à l'échelle réel les résultats obtenus en laboratoire au niveau mécanique et environnemental, nous avons mis en place une planche expérimentale d'essais lysimétriques de dimension (2m*2m*1m) est formée d'un coffrage carré en acier de 2 m de longueur et 1m de hauteur (Figure 3.27). Pour assurer l'étanchéité, la planche est entièrement couverte par des plaques en PVC de 2 mm d'épaisseur. Pour dimensionner cette planche, nous avons utilisé le logiciel ANSYS afin de tenir compte des déformations relatives du aux charges permanentes et d'exploitations. L'utilisation du système des palettes métalliques en support permet de réduire le poids de la structure. La stabilité du système est testée par ce logiciel, après une phase d'optimisation de la structure, une épaisseur minimale de 1mm est largement suffisant pour parois latérales et la plaque support. Le système de renforcement est constitué des tubes carrés (40mm*40mm*2mm) en 1/3 inférieur pour répondre aux efforts horizontaux liés au compactage des matériaux puis au sommet de la structure pour renforcer la structure de lysimètre et faciliter la manutention et l'accès des matériaux. Ces tubes sont reliés entre eux par des connecteurs de tube carré et boulonnés sur les cornières L de dimension 40mm*40mm*1m, d'épaisseur 2 mm. Ces dernières permettent de retenir les Tôles en acier.

Les couches de sable et de graviers sont en pente pour faciliter la récolte des éluats en un seul point du dispositif. Elles sont séparées par un géocomposite de drainage afin de récupération d'eau de percolation. Un géotextile doit être utilisé entre la couche de sédiment et celle de graviers afin de séparer les matériaux de granulométrie différente.

Le système d'arrosage est équipé de trois arroseurs à buse réglable sachant que chaque buse est reliée à un manomètre qui assure la régularité et intensités d'injection tout au long de l'expérimentation.

Cette planche expérimentale doit être alimentée de manière suivante :

- La première période d'alimentation consistera à arroser le matériau à un débit élevé jusqu'à l'obtention de la première goutte en sortie, de façon à mouiller le matériau et obtenir les premiers percolâts.

- La deuxième période concerne la totalité du suivi. Un débit continu sera appliqué pour étudier la réponse du matériau à un régime continu insaturé. Le débit choisi doit être supérieur ou égale à la pluviométrie locale.

En ce qui concerne le stockage des eaux de percolation entre deux prélèvements, deux techniques successives doivent être mises en œuvre. La première a consisté à recueillir les eaux de percolation dans un fût fermé en contact avec l'air, ce qui engendrait leur carbonatation et la précipitation de sels. Pour éviter ce phénomène, ces eaux doivent être

retenues au fond de lysimètre dans la couche drainante (gravier roulé), sans contact avec l'atmosphère ni avec le matériau.

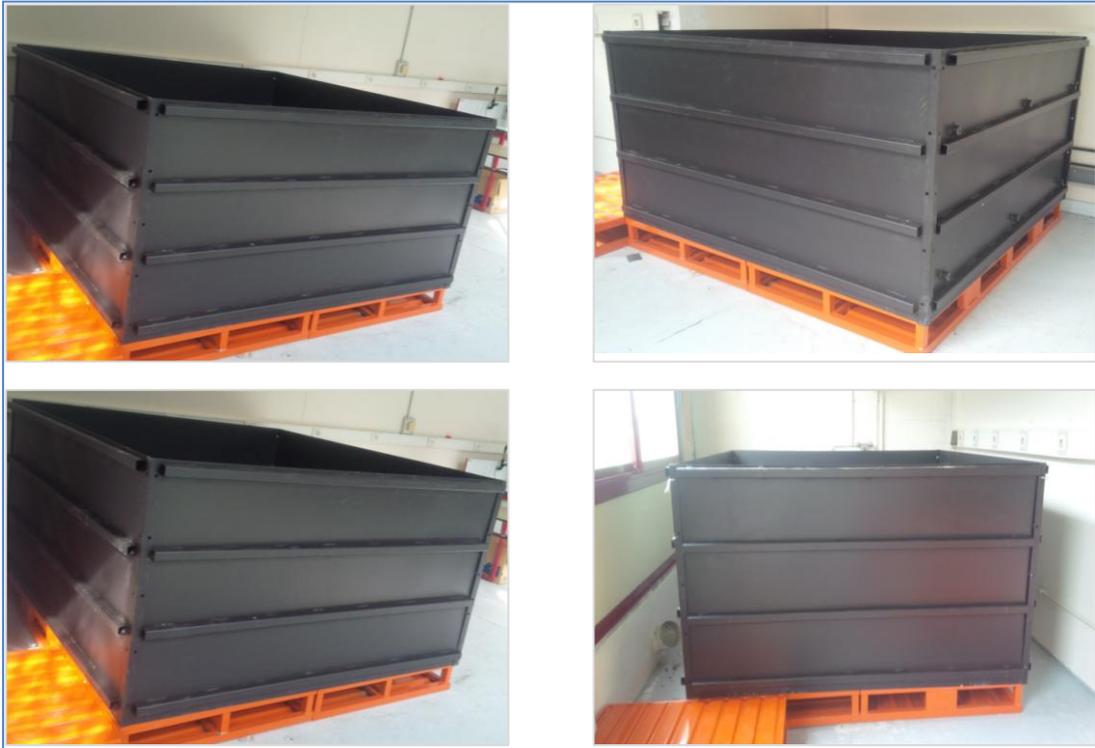


Figure 3.27 : Réalisation de la planche expérimentale des essais lysimétriques

3.8.8.2 Suivi environnemental et mécanique

La planche expérimentale pour les essais lysimétriques permet, en outre, d'assurer un suivi environnemental et mécanique de la structure de l'ouvrage et ainsi de valider les études de laboratoire correspondantes. La description du suivi mécanique et géotechnique (nature, essais, fréquence) sera réalisée conformément aux spécifications et normes en vigueur.

Le suivi environnemental consiste à faire un suivi de la composition chimique des solutions percolées et ruisselées à travers un dispositif de récupération d'eau de percolation et de ruissellement. L'analyse du taux de dissolution des éléments peut renseigner sur leur ordre de mobilité dans chaque type de matériaux.

Pour le suivi mécanique, la réalisation de carottage des matériaux de la structure en fin, voire en cours de suivi du plot expérimental est conseillée pour mieux comprendre et valider les hypothèses, de comportement et de relargage, émises à partir des données de suivi environnemental. Cette opération de prélèvement doit être prévue dès la conception du plot expérimental. La périodicité du carottage doit être déterminée en fonction des évolutions attendues du matériau. A défaut de carottage en cours de suivi, des prélèvements peuvent être

faits au terme de l'expérimentation. Les zones de carottage doivent être comblées par un matériau chimiquement inerte vis-à-vis des composés recherchés et sans dommage pour le suivi mécanique et géotechnique.

3.9 Conclusion

Dans ce troisième chapitre, nous avons étudié la possibilité d'utiliser le sédiment PSL en couche de chaussée routière, plus particulièrement en couche de fondation. Ce matériau présente des caractéristiques mécanique et géotechnique moins bonne. Afin de les améliorer, nous avons utilisé d'une part, un traitement aux ciments Cibelcor et Vicat permettant d'améliorer l'Indice Portant Immédiat et les résistances mécaniques. Néanmoins, ce traitement n'aboutit pas à un matériau adéquat pour une utilisation désirée. D'autre part, l'apport du correcteur granulaire ne permet pas d'augmenter les performances mécaniques pourtant il améliore les caractéristique de compactage. De par les faibles résistances mécaniques de sédiment traité aux ciments et aux mélanges sédiment/correcteur granulaire, un correcteur granulaire (sable Someca) en combinaison avec le traitement au ciment Cibelcor à été proposé comme solution pour améliorer ces performances mécaniques. Les caractéristiques mécaniques évaluées à travers la résistance à la compression, la résistance à la traction, le module élastique et l'Indice Portant Immédiat montrent que l'ajout du ciment Cibelcor et du sable Someca permettent d'augmenter significativement les caractéristiques mécaniques de sédiment de type sable argileux. Deux formulations D2 et E2 ont été retenues, elles appartiennent respectivement à la classe S2 et S4. Ces formulations peuvent donc être considérées comme aptes pour la valorisation en couche de fondation.

La comparaison des résultats du ciment Portland (Cibelcor (CEM I 42,5)) et du ciment de haut-fourneau (Vicat (CEM III/B 42,5)), montre que ce dernier, plus intéressant sur le plan économique, présente des caractéristiques de compactage et des performances mécaniques plus élevées que le ciment Portland. Il est donc intéressant de tester les formulations retenues avec ce ciment de haut-fourneau.

L'impact environnemental des formulations retenues est vérifié à travers l'essai de lixiviation sur des échantillons en monolithe et des échantillons broyés après 28 jours de maturation. Les résultats obtenus permettent de constater que les concentrations en éléments

traces métalliques ainsi que les teneurs en chlorures et sulfates sont inférieurs aux valeurs seuils proposées par le guide méthodologique d'acceptabilité de matériaux alternatifs en technique routière. L'utilisation de ces matériaux, dans le domaine routier et plus précisément en couche de fondation, est donc possible. Les résultats de lixiviation indiquent également que les ETM et les chlorures et sulfates des échantillons en monolithe sont inférieures à celles des échantillons broyé.

Chapitre 4 : Valorisation de sédiments du port de Dunkerque en béton

Chapitre 4 : Valorisation de sédiments du port maritimes de Dunkerque dans le béton

4.1 Introduction

L'objectif du travail expérimental présenté dans ce chapitre est d'étudier l'effet d'incorporation des sédiments de dragage dans le béton par l'étude de caractérisation de ce dernier ainsi que d'élaborer et d'optimiser différentes formulations de béton à base de sédiments GPMD respectant les exigences du cahier des charges pour une utilisation en travaux maritimes.

Les matériaux rentrant dans les formulations ont été caractérisés à travers l'étude de différents paramètres physiques comme la densité et la capacité d'absorption d'eau. Les sédiments de dragage sont utilisés dans différentes formulations de béton dans lesquelles varie le volume des granulats ainsi que la qualité du mélange hydraulique. Les études sont menées avec quatre fractions volumiques de substitution (5, 10, 20 et 40 %) de la fraction sableuse par des sédiments de dragage.

Les résistances en compression et les modules d'élasticité de tous les bétons ont été mesurés à différents échéances. L'étude de durabilité est appréhendée à travers les essais de la porosité accessible à l'eau et de l'attaque sulfatique externe sur trois bétons respectant les exigences du cahier des charges pour une utilisation en travaux maritimes. Les résultats expérimentaux obtenus ont permis d'analyser l'influence de l'ajout des sédiments de dragage sur les performances des bétons.

4.2 Les constituants des bétons

La fabrication du béton à base de sédiments de dragage nécessite des ingrédients de base tels que les gravillons, le sable, le sédiment, le ciment, l'eau et les adjuvants. La Figure 4.1 présente les échantillons de matériaux utilisés dans le cadre de cette étude.

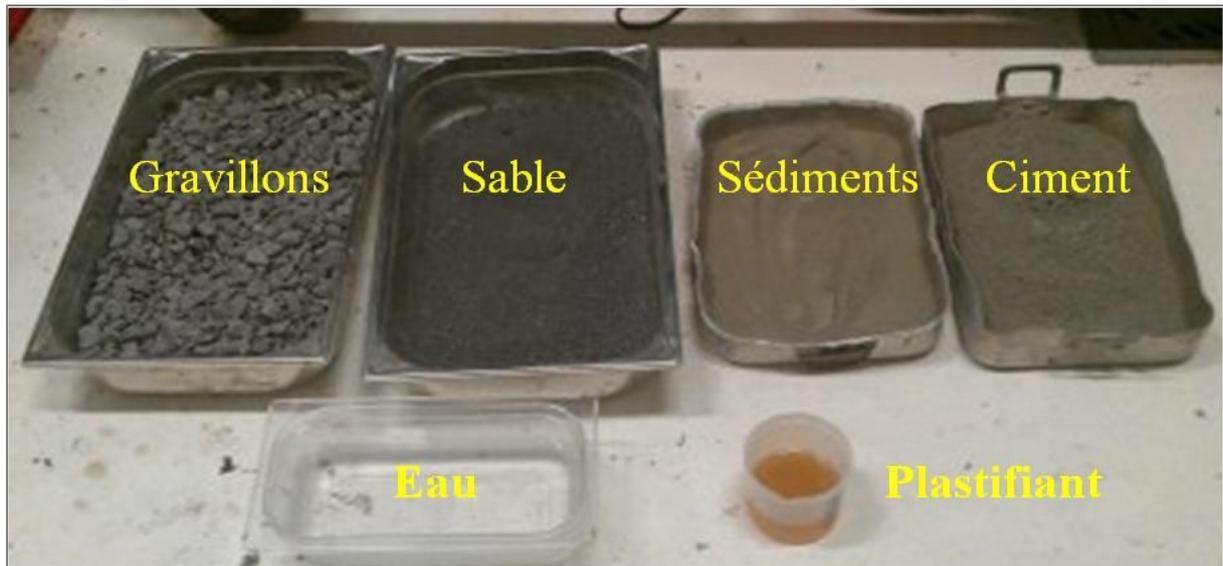


Figure 4.1: Matériaux utilisés pour la fabrication béton

4.2.1 Granulats naturels

Les granulats naturels fins et grossiers utilisés dans cette étude sont des granulats calcaires concassés provenant de la carrière de Tournai, fournie par la société Holcim France. Les coefficients d'absorption d'eau de la fraction fine et grossière sont respectivement de 1,73 % et 0,55 % selon la norme EN 1097-6. L'analyse granulométrique de ces matériaux a été réalisée par la norme EN 933-1. Les résultats de ces analyses granulométriques sont résumés dans la Figure 4.2.

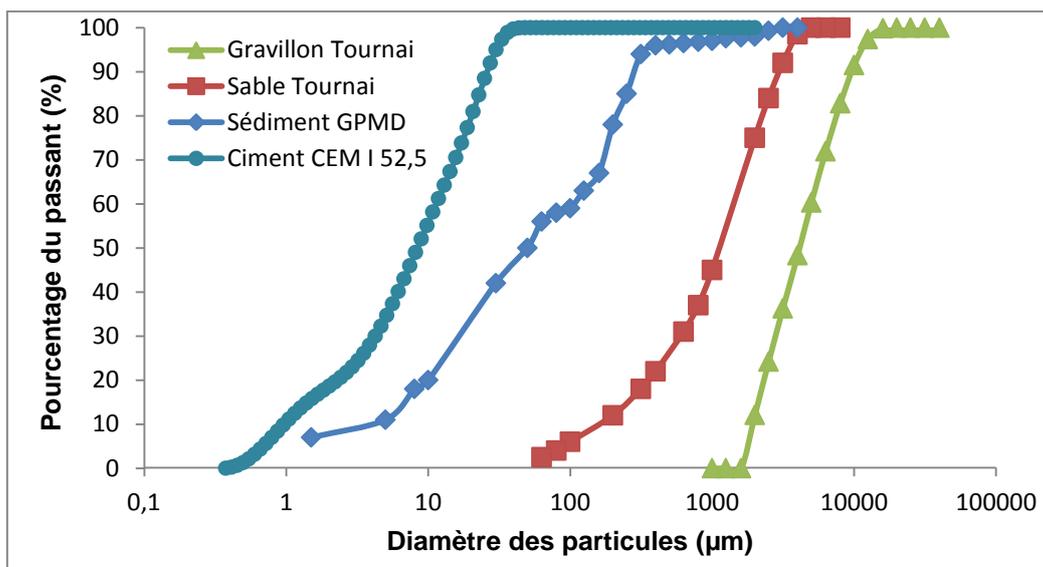


Figure 4.2 : Analyses granulométriques du gravillon et sable de Tournai, de sédiment et ciment utilisé

4.2.2 Ciment utilisé

Le liant hydraulique utilisé pour cet étude est un ciment Portland CEM I 52,5 N-SR3 (2) CE PM-CP2 NF de l'usine LÄGERDORF. C'est un ciment courant résistant au sulfate (SR3), pour travaux en mer (PM), à teneur en sulfure limité pour l'utilisation en béton précontraint (CP2). Il est constitué principalement de clinker et nous a été fourni par la cimenterie Holcim. Le Tableau 4.1 montre les caractéristiques du ciment utilisé pour cette étude (fournies par le cimentier). Pour la classe de résistance du ciment et sa densité, les valeurs communiquées ont été vérifiées expérimentalement.

	2 jours	7 jours	28 jours							
Résistance à la compression en (MPa)	36	49	63							
	Masse volumique (g/cm ³)	Surface massique (cm ² /g)								
Caractérisation physique	3,15	4400								
Caractéristiques chimiques (%)										
PF	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Cl ⁻	Na ₂ O	C ₃ A
0,9	21,70	3,80	4,30	65,50	0,64	2,66	0,41	0,03	0,50	2,90

Tableau 4.1 : Caractéristiques physico-chimiques et mécaniques du ciment CEM I utilisé

4.2.3 Sédiment de dragage portuaire GPMD

Le GPMD prévoit pour les sédiments sains d'être immergés en mer, tandis que les sédiments non-immérgeables d'être gérés à terre avec une perspective de développer des filières de valorisation. Dans le cadre de cette étude, les sédiments non-immérgeables sont traités par la déshydratation naturelle sur une plate-forme de 7 ha, cette plate-forme est composée de trois bassins de décantation pour une capacité qui peut atteindre 50 000 m³ de sédiments. Les sédiments ont été récupérés dans un de ces trois bassins de la zone du port Est ensuite ils ont été homogénéisés dans un cube en plastique. Cette opération est suivie immédiatement d'un quartage dans des fûts plastiques hermétiques d'un volume de 54L.

Afin de limiter les variations du rapport E/C au moment de la fabrication du béton due à la capacité d'absorption des sédiments de dragage étudiés, nous avons décidé de les sécher à 60 °C ensuite les émietter au concasseur à mâchoire. Les étapes suivies sont illustrées dans la Figure 4.3.



Figure 4.3 : Préparation des sédiments GPMD pour la formulation béton

Les résultats présentés dans le Tableau 4.2 montrent que le sédiment GPMD a une teneur en eau initiale d'environ 123 %. La masse volumique absolue est de 2,52 g/cm³ et la perte au feu est de 8,25 % et 11,62 % respectivement à 450 °C et 550 °C. Les valeurs obtenues de la matière organique, de la masse volumique absolue et de la valeur au bleu de méthylène sont comparables à ceux des précédents travaux (Achour, 2013 ; Dia, 2013 ; Wang, 2011). Donc il n'y a pas eu de variation significative de ces paramètres au cours du temps.

Paramètres	Sédiment GPMD (Présente étude)	Sédiment GPMD (Achour, 2013)		Sédiment GPMD (Wang, 2011)	Sédiment GPMD (Dia, 2013)	
		P1	P2			
		W (%) à 105 °C	123,0			95,0
MO (%) à 450 °C	8,25	9,20	9,40	6,27	-	
PF (%) à 550 °C	11,62	-	-	9,93	11,10	
ρ_s (g/cm ³)	2,52	2,55	2,56	2,53	2,54	
VBS	3,17	3,20	3,60	3,10	3,20	
Limites d'Atterberg	WL (%)	79,5	111,0	72,0	76,1	82,0
	WP (%)	37,9	51,8	40,1	35,3	38,0
	IP (%)	41,6	59,3	32,5	40,8	44,0

Tableau 4.2 : Bilan des paramètres de caractérisation des sédiments GPMD

4.2.4 Plastifiant réducteur d'eau

Le PRELOM[®] 600 (P) est un adjuvant liquide prêt à l'emploi issu de la dernière génération de polycarboxylate BASF, à effets ciblés. Il a été développé pour l'industrie du béton où qualité,

durabilité, performance, ouvrabilité et faible viscosité sont requises. Il s'agit d'un plastifiant réducteur d'eau recommandé pour l'industrie du béton prêt à l'emploi.

Il se différencie des plastifiants de dernière génération, par la faible viscosité qu'il confère aux bétons de consistance S3 et S4. Cette faible viscosité de béton alliée à un long maintien de maniabilité permet au PRELOM[®] 600 d'améliorer considérablement l'aspect du béton frais, mais également son comportement dynamique et par conséquent sa mise en œuvre. C'est un produit recommandé pour la fabrication des bétons courants de consistances S3 et S4 nécessitant un long maintien de l'ouvrabilité. Son effet optimal est généralement obtenu par son incorporation dans le béton en différé, c'est-à-dire après l'addition de 70 % de l'eau de gâchage dans le malaxeur.

Les caractéristiques du PRELOM[®] 600 sont données dans le Tableau 4.3 :

	Aspect	Masse volumique	pH	Teneur en chlore	Extrait sec	Na ₂ O _{éq}
PRELOM[®] 600	Liquide	1,04 g/cm ³	6,1	< 0,1 %	18,5 %	< 2 %

Tableau 4.3 : Caractéristiques du plastifiant réducteur en eau PRELOM[®] 600

4.2.5 L'eau de gâchage

L'eau joue un rôle déterminant dans la fabrication des bétons à base de liants hydrauliques. C'est un constituant très important du béton car elle peut influencer la qualité de ce dernier. Donc, il faut être attentif à son dosage car son excès nuit à la durabilité du béton et diminue ses résistances mécaniques. Il intervient dans toutes les étapes de la vie du matériau par ses propriétés physico-chimiques. De plus, l'eau de gâchage remplit deux fonctions essentielles : une fonction physique qui confère au béton frais, en association avec les autres constituants (ciment, adjuvants, fines...), les propriétés rhéologiques adaptées à l'ouvrage à réaliser et une fonction chimique contribuant au développement des réactions d'hydratation du ciment.

L'eau utilisée dans la fabrication des bétons est l'eau du robinet du réseau de distribution. Elle est présentée dans la matrice cimentaire à l'état durci sous différentes formes :

- l'eau chimiquement liée : c'est l'eau consommée au cours des réactions d'hydratation, et qui est également combinée avec d'autres composants dans les hydrates de la matrice cimentaire ;
- l'eau adsorbée : il s'agit principalement des premières couches d'eau soumises au champ des forces superficielles au niveau des surfaces du réseau poreux ;

- l'eau capillaire : elle est constituée de la phase condensée remplissant (par condensation capillaire) le volume poreux au-delà de la couche adsorbée et séparée de la phase gazeuse par des ménisques ;
- l'eau libre : elle est constituée de la phase condensée qui n'est plus sous le champ d'influence des forces superficielles (elle est en équilibre avec la phase gazeuse par l'intermédiaire d'une interface plane).

4.3 Caractérisation des propriétés physiques des granulats

4.3.1 Masses volumiques

La masse volumique des granulats est une caractéristique fondamentale influençant les caractéristiques mécaniques des granulats et par conséquent les performances mécaniques du béton.

Pour les matériaux granulaires utilisés, les masses volumiques en vrac, réelles et absolues ont été mesurées conformément à la norme EN 1097. La masse volumique apparente a été déterminée selon le mode opératoire de la norme EN 1097-3. On l'obtient par la relation 4.1 :

$$\rho_v = \frac{M - M_0}{V} \quad (4.1)$$

Avec : M_0 : masse du récipient utilisé, M : masse M_0 à laquelle s'ajoute la masse de l'échantillon mise en place sans vibration et V le volume de récipient.

La masse volumique réelle des grains solides est définie comme le rapport de la masse d'un échantillon de granulats sur le volume de ses grains. Le volume des grains est délimité selon la norme EN 1097-6 par l'enveloppe extérieure du grain, pores compris.

Deux masses volumiques réelles sont alors définies en fonction de l'état hydrique du granulat. Les deux états les mieux définis sont l'état sec et saturé superficiellement sec.

La masse volumique réelle déterminée par séchage en étuve ρ_{rd} est définie par le rapport de la masse des granulats séchés en étuve et le volume qu'ils occupent dans l'eau y compris les pores fermés et ceux accessibles à l'eau. Elle est donnée par la relation 4.2

$$\rho_{rd} = \rho_w \times \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)} \quad (4.2)$$

Où : ρ_w Masse volumique de l'eau ;

M_1 : Masse dans l'air des granulats saturés et superficiellement secs ;

M_2 : Masse dans l'eau du panier contenant l'échantillon de granulats saturés ;

M_3 : Masse dans l'eau du panier vide, en grammes ;

M_4 : Masse de la prise d'essai séchée à l'étuve dans l'air.

La masse volumique réelle saturée à surface sèche ρ_{ssd} est définie comme le rapport de la masse des grains, y compris la masse d'eau présente dans les pores accessibles à l'eau ($M_s + M_e$), et le volume qu'ils occupent dans l'eau y compris les pores fermés et ceux accessibles à l'eau. Elle est donnée par la relation 4.3:

$$\rho_{ssd} = \rho_w \times \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)} \quad (4.3)$$

La masse volumique de granulats saturée à surface sèche exige le séchage de la surface des grains solides. Le séchage est effectué en suivant la procédure préconisée par la norme EN 1097-6. Cette dernière consiste à étaler la prise d'essai imbibée pour obtenir une couche régulière au fond d'un plateau, puis à exposer les granulats à faible courant d'air chaud pour évaporer l'eau de surface, en les remuant au fur et à mesure jusqu'à ce qu'on ne puisse plus voir de trace de l'humidité en surface.

Pour s'assurer que le séchage de surface de la fraction 0/4 mm est atteint, un moule tronconique normalisé est utilisé de telle sorte que le plus grand diamètre est dirigé vers le bas. Il est rempli avec une partie de l'échantillon au cours de séchage qui est tassé à 25 reprises à l'aide d'un pilon. Le séchage est atteint quand le cône s'effondre en soulevant le moule (Figure 4.4).

La détermination de la quantité d'eau absorbée par la fraction 0/4 mm est assez délicate du fait de la difficulté à éliminer l'eau intergranulaire de la fraction fine.

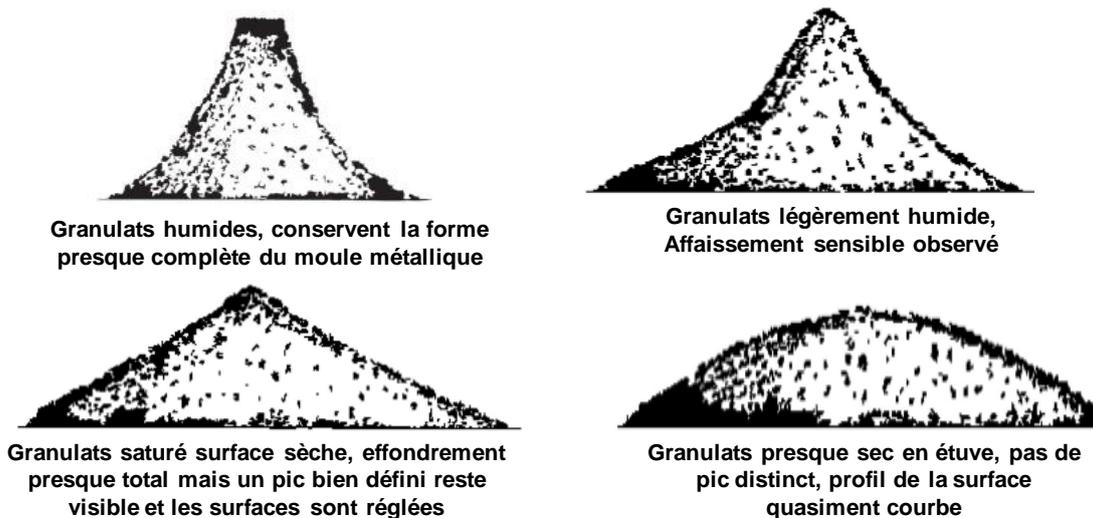


Figure 4.4 : Indications relatives à l'état saturé surface sèche des sables selon la norme EN1097-6

La masse volumique absolue est caractérisée par le rapport de la masse d'un échantillon de granulats séchés en étuve et le volume qu'ils occupent dans l'eau y compris les pores fermés mais sans tenir compte des pores accessibles à l'eau. Elle est donnée par la relation 4.4 :

$$\rho_a = \rho_w \times \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)} \quad (4.4)$$

Les résultats des masses volumiques permettent également de calculer la porosité intergranulaire ρ_{inter} des les granulats utilisés. Elle est donnée par la relation 4.5 :

$$\rho_{inter} = 1 - \frac{\rho_v}{\rho_{rd}} \quad (4.5)$$

Les résultats obtenus pour les granulats de Tournai sont présentés dans le Tableau 4.4. Pour chaque masse volumique, le résultat retenu est la moyenne de trois essais différents. Nous constatons que les masses volumiques de la fraction 0/4 mm sont supérieures à celles de la fraction 4/14 mm, de même pour la porosité intergranulaire. Ce constat pourrait être expliqué par le pourcentage important d'éléments fins dans la fraction 0/4 mm.

Granulats	Masses volumiques				Porosité intergranulaire
	ρ_v (Kg/m ³)	ρ_{ssd} (K/m ³)	ρ_{rd} (Kg/m ³)	ρ_a (Kg/m ³)	$\rho_{inter} = 1 - \frac{\rho_v}{\rho_{rd}}$
Sable (0/4mm)	1620	2760	2710	2840	0,40
Gravillon (4/14mm)	1512	2680	2670	2710	0,44

Tableau 4.4 : Masses volumiques des granulats de Tournai

4.3.2 Absorption d'eau

La connaissance du coefficient d'absorption d'eau (WA_{24}) des granulats est nécessaire afin d'ajuster l'eau de gâchage rentrant dans la formulation béton. Le coefficient d'absorption est défini comme étant le rapport de l'augmentation de la masse d'un échantillon de granulats à sa masse sèche, après passage à l'étuve, du fait de la pénétration de l'eau dans les pores accessible pendant 24h. C'est une caractéristique intrinsèque des granulats permettant d'estimer l'aptitude des granulats à influencer sur la rhéologie du béton. Il est déterminé selon la norme NF EN 1097-6 et s'exprime suivant l'équation 4.6 :

$$WA_{24} = \frac{100 \times (M_1 - M_4)}{M_4} \quad (4.6)$$

Les résultats de Tableau 4.5 montrent que la fraction 0/4 mm absorbe trois fois plus d'eau que la fraction 4/14 mm. En effet, l'absorption d'eau augmente lorsque la taille des granulats augmente car l'accroissement de la surface spécifique entraîne une augmentation de la demande en eau.

Granulats	WA ₂₄	WA ₂₄	WA ₂₄	Moyenne
Sable (0/4 mm)	1,80	1,84	1,73	1,79
Gravillon (4/14 mm)	0,48	0,57	0,61	0,55

Tableau 4.5 : Valeurs de coefficient d'absorption des granulats de Tournai

4.3.3 Demande en eau des sédiments

Pour la mesure du coefficient d'absorption de l'échantillon représentatif, une étape primaire est nécessaire. Cette étape consiste à séparer les grains de l'échantillon en deux classes de taille respectivement inférieure et supérieure à 63 µm. Pour les grains ayant un diamètre supérieur à 63 µm, la mesure du coefficient d'absorption a été déterminée selon la norme NF EN 1097-6 comme dans le cas des sable et gravillon. Par contre, pour les grains de diamètre inférieur à 63 µm, aucune norme n'existe à notre connaissance pour déterminer leur coefficient d'absorption. Afin de déterminer ce dernier, nous avons donc utilisé l'essai de demande en eau sur la fraction inférieure à 63 µm (Sedran, 1999). Cet essai consiste à malaxer une quantité de sédiments de fraction inférieure à 63 µm (400 g) avec une quantité d'eau croissante dans un malaxeur à mortier dont on aura pris la précaution d'humecter la cuve et la pale, à l'aide d'une éponge essorée (norme NF EN 196-1).

Le cycle de malaxage est le suivant: une minute à vitesse lente, quinze secondes d'arrêt pour racler la cuve à l'aide d'une spatule, ensuite une minute à vitesse rapide. Tout en maintenant le malaxage à vitesse rapide, l'eau est ajustée à l'aide d'une pissette. Lorsque la pâte homogène est obtenue, le poids de la pissette avant et après l'essai donne directement la quantité d'eau ajoutée. L'essai est reproduit avec une quantité d'eau légèrement inférieure à celle obtenue lors du premier essai pour la répétabilité de l'essai.

La Figure 4.5 présente les différents états obtenus lors de l'essai de demande en eau sur les sédiments GPMD. Avec l'ajout de l'eau, on passe d'une poudre humide à un état de petites boulettes ensuite pour une petite quantité d'eau supplémentaire à une pâte homogène. Dès

l'arrêt du malaxage, cette pâte est divisée en deux morceaux. Ces derniers s'écoulent et n'en font plus qu'un, dès que l'on tapote la cuve du malaxeur. Ainsi, la pâte homogène est atteinte. La quantité d'eau permettant d'atteindre la pâte homogène permet de déterminer le coefficient d'absorption de la fraction inférieure à 63 µm (Tableau 4.6).



Figure 4.5 : Etat de sédiment GPMD lors de l'essai de demande en eau

Sédiment GPMD	WA ₂₄			Moyenne
Fraction (63 µm / 4 mm)	1,24	1,46	1,32	1,34
Sédiment GPMD	Demande en eau			Moyenne
Fraction (0 / 63 µm)	73,47	71,32	73,93	72,90

Tableau 4.6: Valeurs du coefficient d'absorption des sédiments GPMD

4.3.4 Résistance mécanique – Essai Los Angeles (LA)

Les essais de résistance mécanique des granulats sont utilisés pour s'assurer de la dureté des matériaux. La valeur de LA détermine l'usage de matériaux en terme de résistance finale des ouvrages réalisés. Cet essai permet de mesurer la résistance à la fragmentation par chocs sur la fraction 10/14 mm selon la norme EN 1097-2. Le coefficient Los Angeles est donné par la relation 4.7 :

$$LA = 100 \times \frac{m}{M} \quad (4.7)$$

Où m est la masse sèche de la fraction du matériau passant, après l'essai, au tamis de 1,6 mm et M est la masse sèche de la prise d'essai conventionnellement égale à 5000 g.

Les résultats obtenus sont reportés dans le Tableau 4.7. Les valeurs moyennes du coefficient LA sont inférieures à la valeur spécifiée par la norme NF P 18-545, préconisant une valeur limite supérieure de 40 pour les granulats destinés à la confection de bétons courants.

Granulats	LA	LA	LA	Moyenne
Gravillon (10/14 mm)	19,20	22,14	21,40	22

Tableau 4.7 : Valeurs du coefficient de los Angeles des granulats de Tournai

4.3.5 Propreté des sables

Les deux essais permettant de caractériser la propreté des sables sont l'essai d'équivalent de sable ES et l'essai au bleu de méthylène VBS. L'essai ES, réalisé sur la fraction 0/2 mm selon la norme NF EN 933-8 permet d'apprécier uniquement la propreté globale du matériau, sans distinguer la nature des fines en présence. Il paraît donc nécessaire de le compléter par l'essai VBS afin d'évaluer de façon plus sélective la propreté des sables. Le principe de VBS est de déterminer la capacité d'adsorption des fines actives par fixation du bleu de méthylène, et de mettre ainsi en évidence l'activité des fractions fines.

Les résultats du tableau 4.8 montrent que le sable de Tournai est un sable propre présentant des caractéristiques qui conviennent mieux aux bétons de qualité supérieure. La teneur en fines de 5,41 % permettant ainsi d'éviter les effets secondaires liés à l'augmentation du rapport E/C pour maintenir la maniabilité du béton.

Sable Tournai	Essai n°1	Essai n°2	Moyenne
Teneur en fines (%)	5,25	5,56	5,41
ES (%)	98,31	96,55	97,43
VBS (g / 100 g)	0,23	0,26	0,245

Tableau 4.8: Valeurs de l'équivalent de sable et au bleu de méthylène du sable de Tournai

4.4 Formulation et composition de bétons selon la méthode Dreux-Gorisse

Les méthodes de formulation des bétons sont nombreuses. Leur principe de base repose, pour la plupart d'entre elles, sur la recherche de la compacité granulaire maximale. La raison pour laquelle certaines méthodes recourent à la mesure de la compacité des constituants granulaires et d'autres à une courbe granulaire de référence supposée donner la compacité optimale avec les constituants granulaires utilisés. En pratique, il s'agit de mettre en place un mélange optimal de différents constituants afin d'obtenir le béton respectant le cahier des charges et présentant le coût minimum.

La méthode qui a été utilisée dans cette étude est la méthode de Dreux-Gorisse. Cette méthode permet de définir de façon simple et rapide une composition adaptée au béton étudié. Afin d'obtenir la meilleure composition, il est nécessaire de caractériser les bétons à travers les essais d'affaissement et de résistance.

4.4.1 Principe de formulation béton

Selon l'approche de Dreux, les proportions des constituants granulaires du mélange (sans le ciment) sont définies à partir d'une courbe granulaire de référence. Cette courbe est issue de l'observation du comportement expérimental de « bons » bétons ayant donné satisfactions. Elle ne se réfère à aucune théorie, bien que la courbe granulaire ressemble à celle proposée par Caquot. La compacité maximale du mélange hydraulique est alors supposée atteinte lorsque la courbe du mélange réel coïncide avec cette courbe de référence.

La construction de la courbe repose sur des abaques et des tableaux tirés de l'expérience, qui sont habituellement admis comme référence pour décrire le comportement des bétons courants. Pour déterminer les proportions volumiques des constituants granulaires, seul objectif de l'application de la méthode, deux étapes ont été effectuées :

- Tracer la courbe granulaire de référence OAB sur le graphique granulométrique : selon Dreux, quelque soit le nombre de granulats, la courbe granulaire de référence du mélange est représentée par deux segments de droite. Trois points suffisent alors pour la tracer : O l'origine, A le point de brisure et B l'extrémité. Les points O et B sont invariants quelque soient les mélanges; le point O a pour coordonnées (0,08 ; 0 % de passants) et le point B (D ; 100 % de passants). D est le diamètre du gros granulats. Si $D \leq 20$ mm, le point A a pour coordonnées $(\frac{D}{2} ; 50 - \sqrt{D} + K + K_s + K_p)$; si $D > 20$ mm, l'abscisse du point A est $(5 + D)/2$. et l'ordonnée est la même que précédemment. Les valeurs de K et K_p sont estimées à partir des tableaux associés à la méthode. Elles tiennent compte de la forme des granulats, du dosage en ciment, de la vibration et du mode de mise en œuvre du béton. K_s est déduit du module de finesse du sable (MF est compris entre 2,2 et 2,8) selon la relation 4.8 :

$$K_s = 6 \times MF - 15 \quad (4.8)$$

- Ayant tracé la courbe granulaire de référence sur le diagramme granulométrique, qui comporte aussi les courbes granulométriques des matériaux, il s'agit ensuite de trouver les proportions volumiques des différents granulats dans le mélange. Elles sont trouvées par une interpolation graphique appelée « lignes de partage ». Ces lignes relient le point 95 %

(passants) d'un granulat au point 5 % du granulat suivant. Les points d'intersection entre ces lignes et la courbe granulaire de référence donnent directement les proportions respectives des granulats, en pourcentage du volume réel des constituants granulaires.

4.4.2 Cahier des charges

Les ouvrages en béton construits en site maritimes sont sollicités par des agressions physico-chimiques, qui varient selon leur situation par rapport au milieu marin. La résistance du béton aux conditions environnementales auxquelles il est soumis pendant la durée d'utilisation de l'ouvrage impose le respect d'exigences précises. La norme NF EN 206-1 précise les valeurs limites pour la composition et les propriétés du béton pour chaque classe d'exposition.

- Classe d'exposition : XS3
- $(E_{\text{eff}}/L_{\text{equi}})$ max : 0,50
- Classe de résistance minimale (MPa) : C35/45
- Teneur minimale en liant équivalent (kg/m^3) : 350
- Classe de consistance : S3
- Classe de teneur en chlorure : Cl 0,4
- Type de ciment : Ciment PM-ES (Prise Mer « NF P 15-317 » - Eau sulfaté « NF P 15-319 »).

4.4.3 Formulations bétons

Cinq compositions béton ont été déterminées puis ajustées expérimentalement afin de répondre aux exigences du cahier des charges. Ils contiennent 0, 5, 10, 20 et 40 % de sédiment de dragage en substitution de la fraction sableuse. Ces formulations sont respectivement nommées B0, B5, B10, B20 et B40. Les compositions calculées sont reportées dans le Tableau 4.9.

Bétons	E_{eff}/C	C (kg/m^3)	G (kg/m^3)	S (kg/m^3)	SD (kg/m^3)	Plastifiant (% extrait sec)
B0	0,45	350	1060	650,0	0,00	0,18%
B5	0,45	350	1060	617,5	30,45	0,36%
B10	0,45	350	1060	585,0	60,89	0,38%
B20	0,45	350	1060	520,0	121,78	0,42%
B40	0,45	350	1060	390,0	243,57	0,50%

Tableau 4.9 : Compositions des formulations de béton

4.4.4 Malaxage

Les recommandations de la fiche technique de plastifiant réducteur d'eau ont été prises en compte. La procédure de malaxage a été effectuée à partir des matériaux secs.

Les constituants sont introduits dans l'ordre suivant: gros granulats, sable, liant et sédiment de dragage portuaire. Après un malaxage à sec de l'ordre d'une minute, l'eau de gâchage a été ajoutée et le malaxage a été poursuivi pendant deux minutes (Norme NF P 18-404).

Des gâchées de 8 litres ont été réalisées pour la détermination de la consistance des bétons. Le malaxeur utilisé pour ces gâchées est un système de malaxage des graves traitées GTmax de type 264D. Par contre pour la fabrication des bétons, nous avons utilisé est un malaxeur Couvrot de type 1A-2. Il est équipé de plusieurs pales afin d'optimiser le malaxage. Des gâchées de 30 litres ont été réalisées pour l'ensemble des essais.

4.4.1 Mise en place du béton

La mise en place de béton a été réalisée à l'aide d'une table vibrante Couvrot afin de faciliter l'opération de compactage du béton frais. Les éprouvettes cylindriques $\Phi 11 \times 22$ cm ont été remplies en trois couches quasi-identiques, chacune vibrée pendant dix secondes.

4.4.2 Confection des éprouvettes

Pour chaque formulation, neuf éprouvettes $\Phi 11 \times 22$ cm ont été confectionnées. Trois éprouvettes ont été destinées aux essais de caractérisation mécaniques (E_C et f_C), pour chaque période de cure, à 7, 14 et 28 jours.

4.5 Caractérisation des bétons à l'état frais et durci

4.5.1 Essais réalisés sur bétons frais

4.5.1.1 Consistance et masse volumique apparente

A la fin de chaque opération de malaxage, l'essai d'affaissement au cône d'Abrams et la masse volumique apparente sont déterminés pour chaque gâchés. La mesure de l'affaissement a été réalisée selon la norme NF EN 12350-2, elle permet de contrôler d'ouvrabilité du béton, celle-ci doit rester constante pour l'ensemble des formulations de bétons étudiés. La masse volumique apparente quant à elle est le rapport entre la masse de béton contenu dans une éprouvette cylindrique $\Phi 11 \times 22$ cm et son volume.

La quantité de plastifiant réducteur en eau est ajustée pour maintenir la même consistance du béton S3 (Affaissement entre 10 et 15 cm). Nous constatons qu'elle a tendance généralement à augmenter avec la fraction volumique des sédiments GPMD. Cette différence pourrait être expliquée par l'imprécision liée à la méthode de demande en eau.

La Figure 4.6 présente les résultats de l'affaissement et de masse volumiques des formulations béton étudiées. Pour une même maniabilité de classe S3, nous observons que la masse volumique apparente des bétons à l'état frais a tendance à diminuer au fur et à mesure que la substitution du sable de Tournai par les sédiments GPMD devient importante. Cette tendance pourrait être expliquée par la différence de masse volumique entre le sable et les sédiments utilisés. Quant à l'affaissement, on remarque une augmentation de 0 à 5 % puis une diminution qui semble se stabiliser si on tient compte des barres de dispersion.

D'un point de vue pratique (mise en œuvre, confection des éprouvettes), nous n'avons pas constaté, outre le changement d'aspect, une différence entre les bétons à base de sédiments et le béton témoin.

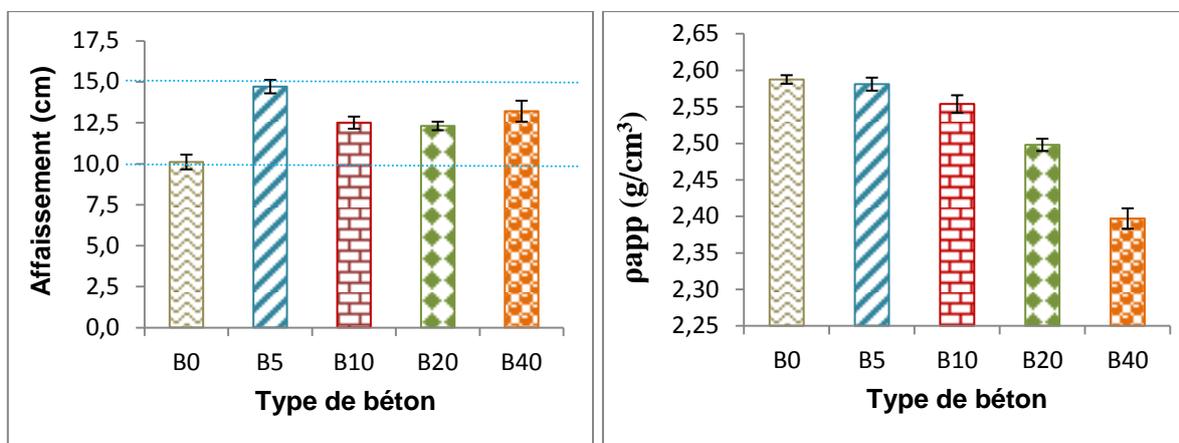


Figure 4.6 : Valeurs de l'affaissement et de la masse volumique apparente des formulations de bétons

4.5.1.2 Teneur en air occlus

La teneur en air occlus étant fonction non seulement de taux de fines dans les mélanges hydrauliques mais également du temps de malaxage. Nous avons donc réalisées des gâchées sur une durée de 3min, suivie directement de mesures de l'air occlus à l'aide d'un aéromètre à béton d'une capacité de 8 litres. Ces essais ont été réalisés selon la norme EN 12350-7. Les résultats de la Figure 4.7 indiquent que l'augmentation du taux d'incorporation de sédiments dans le mélange hydraulique accroît la teneur en air occlus du béton frais. On sait que la résistance du béton est une fonction directe de sa compacité et les vides provoqués par l'air occlus affectent la résistance à la compression de la même manière que les vides de toute autre origine. La présence de 5 % de vide dans le béton peut réduire la résistance de plus de 30 % et même un pourcentage de vide de 2 % peu produire une perte de résistance de plus de

10 % (Glanville, et al., 1947), ce qui est en accord avec la loi de Féret qui relie la résistance à la quantité d'eau et d'air présente dans la pâte du ciment hydraté.

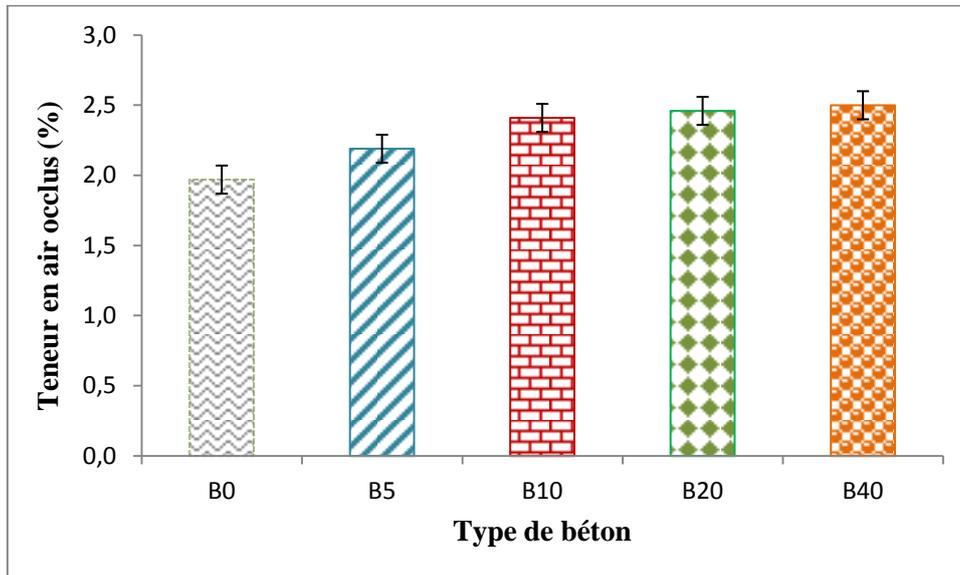


Figure 4.7 : Teneur en air des formulations béton

4.5.2 Essai réalisés sur bétons durcis

4.5.2.1 Détermination du module d'élasticité statique

Le module élastique est défini comme étant le rapport de l'effort appliqué sur la déformation de l'éprouvette béton. Il est mesuré sur trois éprouvettes cylindriques $\Phi 11 \times 22$ cm de chacune des formulations à l'aide d'une presse hydraulique INSTRON de 3000 KN.

Un dispositif de mesure à l'aide de trois capteurs de déplacement LVDT a été mis en place afin d'évaluer le module d'Young. La mesure a été réalisée selon la norme NF EN 12390-13 en exerçant trois cycles chargement/déchargement au tiers de la charge de rupture f_c . Le module d'élasticité a été déterminé selon la pente de recharge de la courbe contrainte/déformation. Un exemple de la courbe contrainte/déformation est représenté à la Figure 4.8 pour le béton B10. Le module d'élasticité calculé, représentant la moyenne des trois capteurs, est de 23,156 GPa.

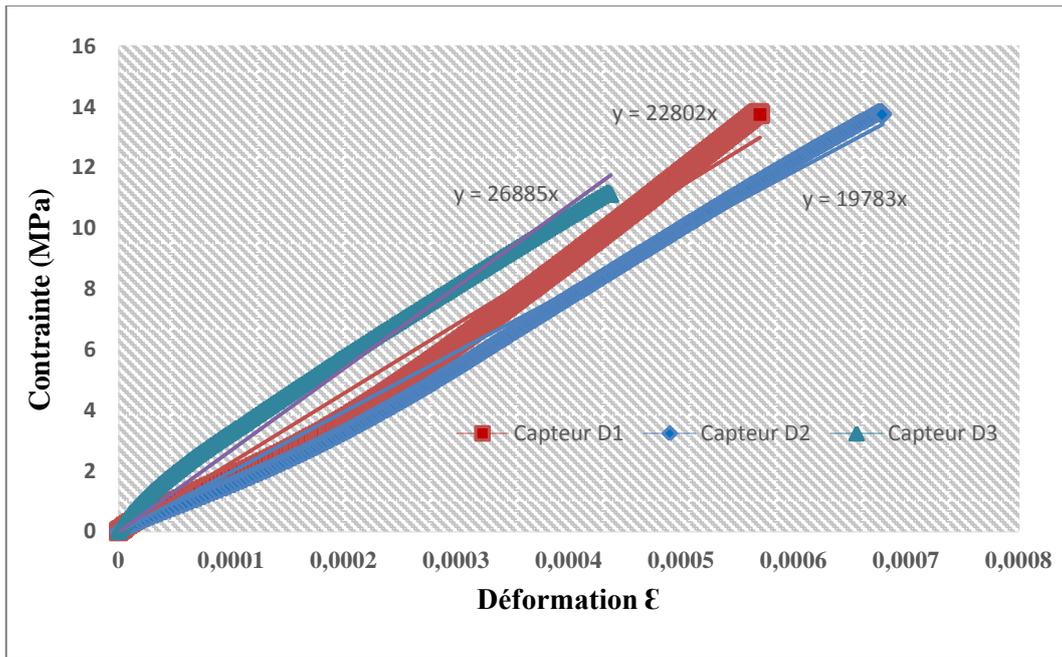


Figure 4.8 : Calcul du module d'élasticité du béton B10 par les capteurs de déplacement

Les valeurs de modules d'élasticité pour chaque formulation E_C présentés sur la Figure 4.9 sont la moyenne des mesures effectuées sur trois éprouvettes cylindrique $\Phi 11 \times 22$ cm après 28 jours de cure à 20 °C. L'évaluation des résultats de la Figure 4.9 montre que la valeur du module d'élasticité a tendance à baisser avec l'augmentation du taux de substitution. Cette tendance pourrait être expliquée par la faible résistance mécanique des sédiments en comparaison à des granulats naturels.

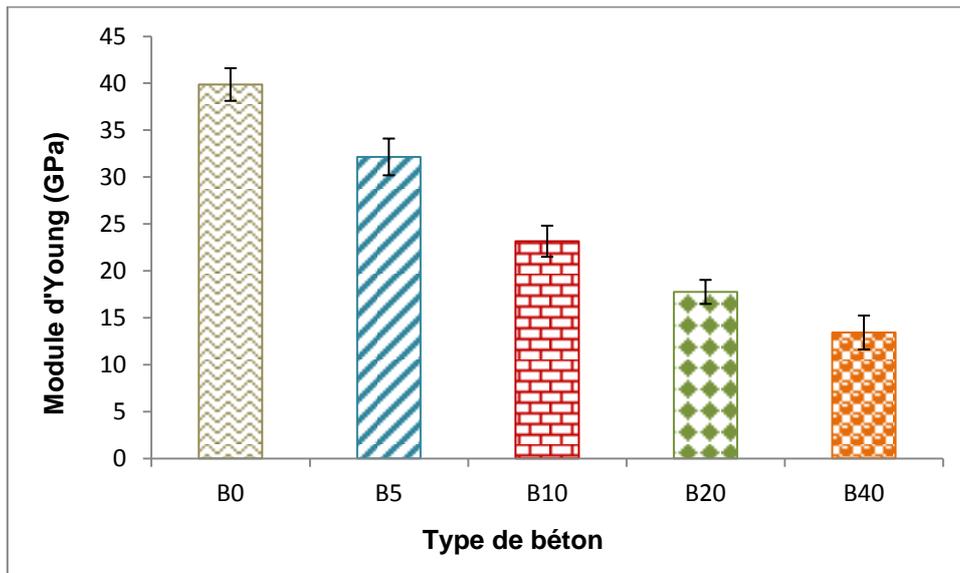


Figure 4.9: Valeurs des modules de Young des bétons

4.5.2.2 Résistance à la compression

L'essai le plus couramment utilisé sur béton durci est la mesure de la résistance à la compression. Ceci est dû à la facilité d'exécution de l'essai et à l'importance intrinsèque de la résistance à la compression lors de la conception structurelle du béton.

Des essais destructifs sont réalisés selon la norme NF EN 12390-3 sur trois éprouvettes $\Phi 11 \times 22$ cm de chacune des formulations afin de déterminer les résistances en compression et comparer les résultats obtenus. Avant la réalisation de l'essai, les éprouvettes bétons sont surfacées à l'aide d'un mélange de soufre et du sable de la Fontainebleu. Le surfacage a pour le but d'obtenir des surfaces planes et l'orthogonalité par rapport à la génératrice du cylindre. La presse utilisée dispose d'un système de rotule avec appui fixe. Ce dernier permet l'aligner l'axe de l'éprouvette avec celui de la machine tandis que la rotule corrige les défauts de perpendicularité.

Les résultats de la Figure 4.10 indiquent d'une part, une chute de résistance à la compression passant de 59 MPa pour le béton témoin à environ 24 MPa à 40 % incorporation de sédiments. D'autre part, une augmentation des résistances de 7 à 28 jours beaucoup plus marquée pour le béton B0 que B40. Ces résultats peuvent être expliqués par l'effet de matières organiques sur l'hydratation de ciment mais également par le taux de fines dans chaque béton.

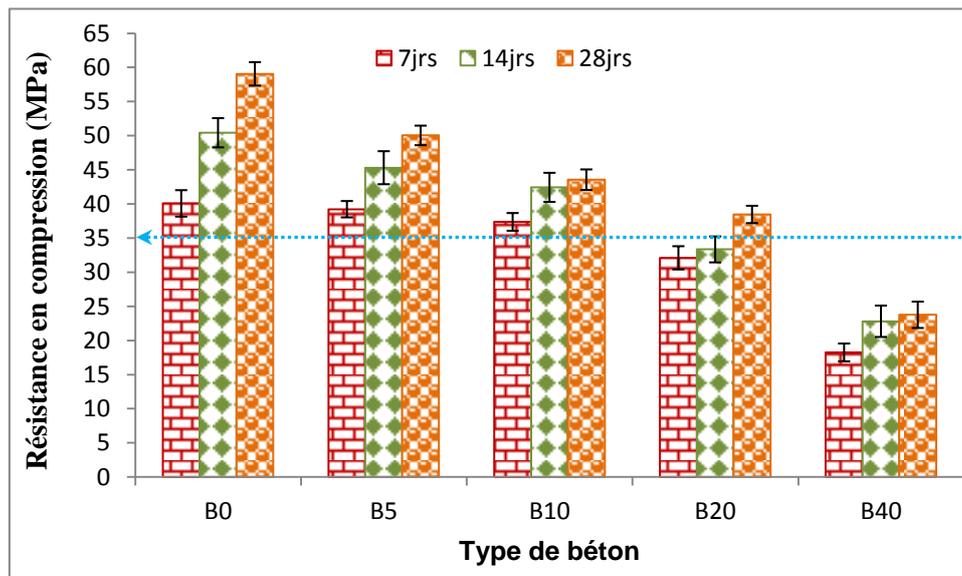


Figure 4.10 : Valeurs des résistances à la compression des bétons

4.5.2.3 Porosité accessible à l'eau

La porosité est le paramètre principal régissant la résistance mécanique des bétons. Il est donc nécessaire de déterminer ce paramètre afin d'expliquer les différences de résistance en compression des bétons étudiés. La procédure de mesure consiste à saturer sous vide les échantillons à tester ensuite à les saturer dans l'eau pendant 24h. La mesure de la pesée de l'échantillon saturé dans l'eau et dans l'air ainsi que sa masse après séchage à 105 °C jusqu'à masse constante permet de déterminer la porosité accessible à l'eau (NF P 18-459). Trois mesures par bétons ont été réalisées. Les résultats illustrés dans la Figure 4.11 montrent que cette porosité croît avec l'augmentation du taux d'incorporation de sédiments. Ce constat pourrait être expliqué par la présence élevée de fines dans les sédiments. En effet, les matériaux argileux sont disposés en feuillets laissant des vides entre eux engendrant ainsi une grande porosité de ces matériaux. La diminution des résistances mécaniques à l'état durci de bétons peut être expliquée par l'augmentation de la porosité.

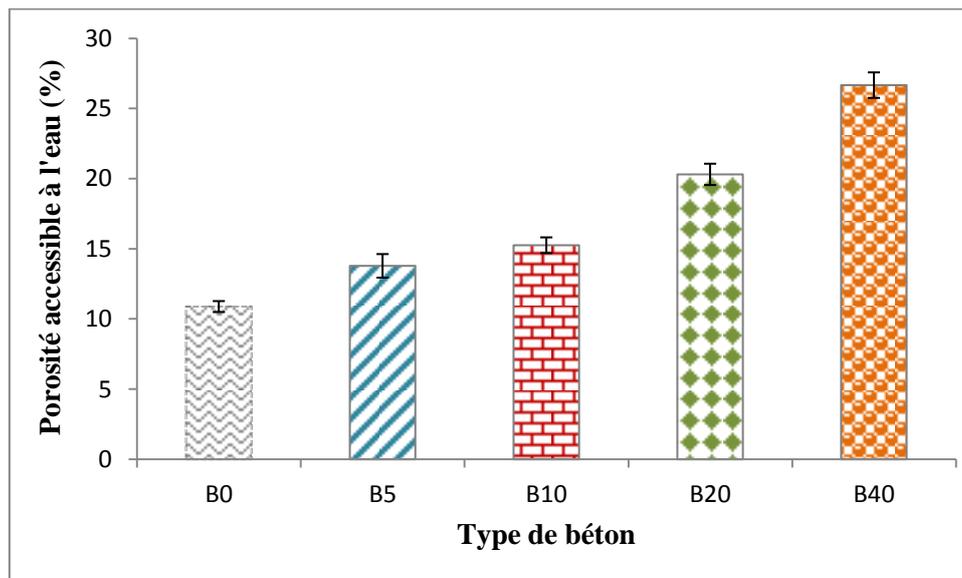


Figure 4.11 : Porosité accessible à l'eau des formulations de bétons

4.5.2.4 Masse volumique des particules solides

La masse volumique des particules solides (masse volumique absolue) a été déterminée à l'aide d'un pycnomètre à hélium de type Accupyc 1330. En connaissant la masse de l'échantillon, la masse volumique absolue est déterminée par le rapport entre la masse des grains solides et leur volume. Les mesures ont été réalisées sur les matériaux broyés et séchés

à 40 °C, la masse volumique absolue obtenue est la moyenne de trois essais. Les résultats de la Figure 4.12 présentent une chute de la masse volumique absolue en augmentant le taux d'incorporation de sédiments. Cette constatation pourrait être expliquée par la présence de matières organiques présentes dans le sédiment qui sont plus légères que les particules minérales et également par d'une proportion différente des constituants minéraux de chaque béton.

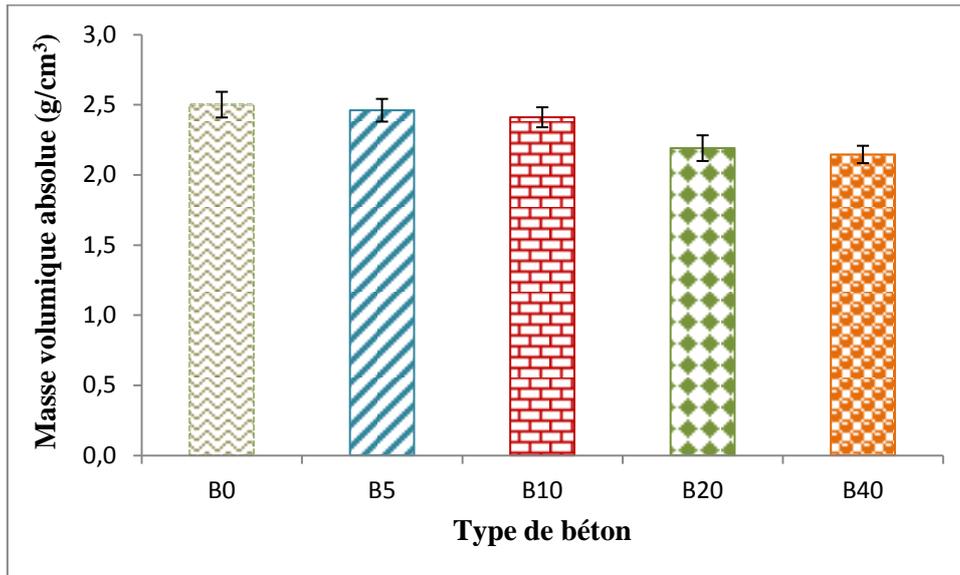


Figure 4.12 : Valeurs de la masse volumique absolue des formulations de bétons

4.5.2.5 Etude microscopique des bétons B0, B10 et B20

Le béton est caractérisé par une microstructure poreuse avec des pores de différentes tailles et de distribution aléatoire. La structure poreuse du béton ainsi que la distribution des pores au sein de ce matériau jouent un rôle très important non seulement sur les résistances mécaniques mais également sur les phénomènes de transport et d'interaction avec le milieu extérieur. Cette interaction dépend fortement des pores interconnectés. C'est pour cela que la porosité, ainsi que sa distribution, est un paramètre très important pour la caractérisation de béton. Les analyses à l'échelle microscopique telles que la porosité au mercure, la diffraction aux rayons X (DRX) et la microscopie électronique à balayage (MEB) apportent des informations complémentaires à l'étude macroscopique dans l'objectif d'appuyer les discussions concernant la nature des dégradations observées.

A) Porosité au mercure des bétons B0, B10 et B20

L'objectif principal de cette étude de porosité des bétons B0, B10 et B20 est de déterminer l'influence de la quantité de sédiment incorporé sur les propriétés du réseau poreux de ces matériaux. La porosité est un paramètre essentiel caractérisant la texture d'un béton. Elle constitue également un moyen d'investigation de la structure des bétons. Afin de pouvoir cerner et expliquer les résultats des essais destructifs et non destructifs, des mesures de la porosité au mercure sur des échantillons de bétons ont été déterminées à l'aide d'un porosimètre au mercure AutoPore IV de Micromeritics. Trois échantillons ont été analysés pour chaque béton. Les résultats de la Figure 4.13 indiquent la variation de la porosité totale et du diamètre moyen des bétons étudiés en fonction du taux d'incorporation des sédiments GPMD dans le béton. Ces résultats montrent un accroissement de la porosité totale avec le taux d'incorporation des sédiments. Cette augmentation est suivie de la diminution du diamètre moyen des pores. Les porosités totales des bétons B0, B10 et B20 sont respectivement de 8,98 %, 10,88 % et de 13,51 %.

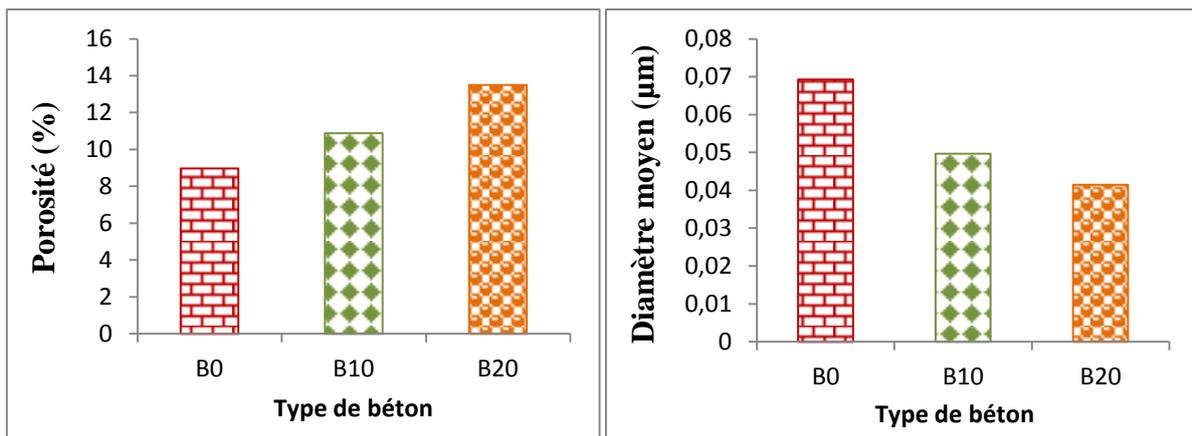


Figure 4.13: Porosité totale et diamètre moyen des bétons B0, B10 et B20

La Figure 4.14 présente les résultats des porosités cumulées et différentielles des trois bétons, soit l'effet de la variation de pourcentage d'ajout de sédiments GPMD sur la distribution des pores dans la structure béton. L'analyse de ces résultats montre que l'incorporation des sédiments modifie la structure poreuse du béton, le béton B0 présente une porosité cumulée et un diamètre moyen plus faibles que les deux B10 et B20. L'effet d'ajout de sédiments est surtout marqué pour des diamètres inférieurs à 1 µm. Ces différences de microstructure pourraient être expliquées par la nature et la texture des sédiments utilisés, ce qui influence directement la durabilité de béton à base de sédiment. Le pic à environ 10 µm pour le béton B20 pourrait être dû à une erreur aléatoire des données expérimentales.

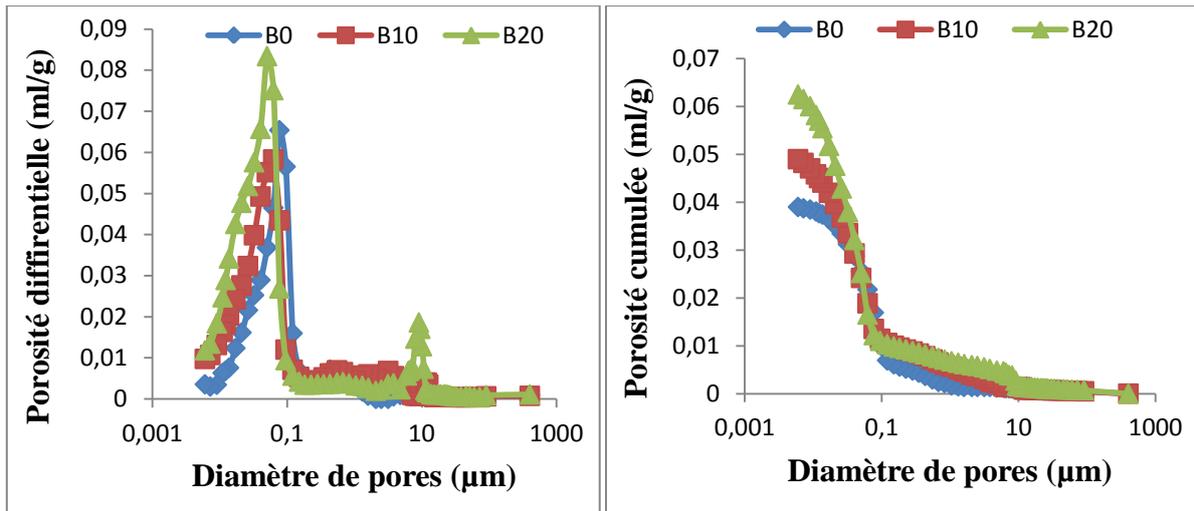


Figure 4.14 : Porosité différentielle et cumulée des bétons étudiés

B) Diffraction aux rayons X

La DRX est une analyse des différents minéraux composant les bétons, elle reste assez limitée en quantitatif, elle permet d'identifier les phases cristallisées comme la portlandite, le gypse, l'ettringite et d'autres phases minérales hydratées de la pâte de ciment. Une analyse DRX a été réalisée sur les bétons B0, B10 et B20 et les résultats obtenus sont présentés sur la Figure 4.15. On constate que les trois bétons présentent des pics similaires bien que leurs compositions ne sont pas identiques. Ils sont majoritairement composés de la calcite, du quartz et de la portlandite. Ces résultats montrent que la substitution d'une partie du sable par le sédiment GPMD n'entraîne pas de variation de phases cristallines principales.

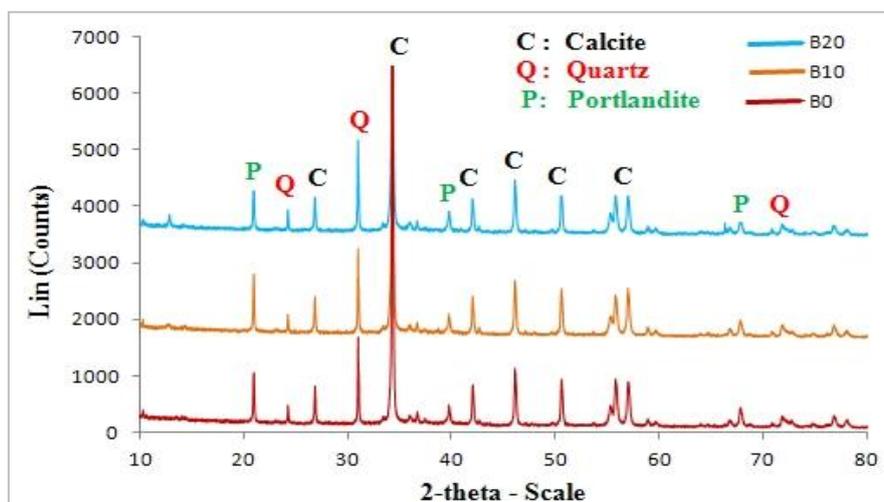


Figure 4.15 : Spectres de diffraction des rayons X des bétons B0, B10 et B20

C) Observations au microscope électronique à balayage

Les éprouvettes bétons ont été sciés en rondelle de 3 cm d'épaisseur et séchées à 40 °C jusqu'à masse constante. Les observations de la microstructure ont été réalisées, sur une section polie d'un échantillon représentatif des bétons B0, B10 et B20 à 28 jours de maturation, par la microscopie électronique à balayage (MEB). L'échantillon à observer est balayé par un faisceau électronique et on vient détecter les électrons secondaires de très faible énergie qui sont produits suite au bombardement de l'échantillon. Ces électrons secondaires sont amplifiés, détectés puis interprétés pour reconstruire une image en fonction de l'intensité du courant électrique produit. Donc le MEB réalise donc une topographie de l'échantillon à analyser.

a) Analyse du béton B0

Les résultats de la Figure 4.16 indiquent que la microstructure du béton B0 est moins hétérogène que les autres. Après plusieurs investigations, aucune trace d'ettringite n'y est visible. Le béton B0 présente une bonne adhérence à l'interface granulats/pâte de ciment. Il est à noter que la nature des liaisons qui se manifestent à l'interface granulats/pâte de ciment, conditionne les résistances mécaniques du béton. Il faut donc un malaxage optimal pour avoir un mélange homogène.

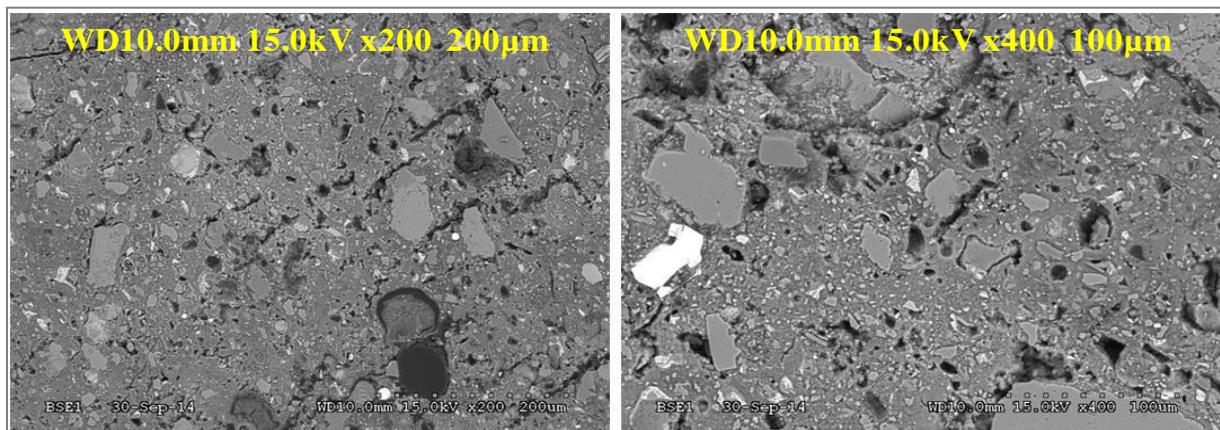


Figure 4.16 : Observation au MEB de la microstructure du béton B0

b) Analyse du béton B10

Les observations au microscope électronique à balayage de la microstructure du béton B10 révèlent une hétérogénéité structurelle liée à l'incorporation des sédiments GPMD dans le béton (Figure 4.17). Ces observations indiquent la présence des anhydres polyphasés, des trous, des fissures, des coquilles et des matières organiques. La présence des trous pourrait

être expliquée par le pH basique du béton qui dissout les matières organiques provenant des sédiments utilisés. L'adhérence est moins bonne entre les granulats et la pâte de ciment.

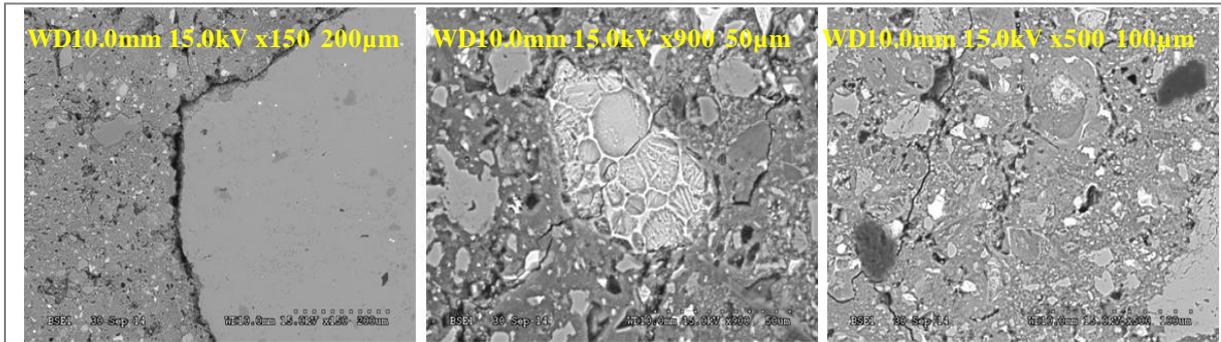


Figure 4.17 : Observation au MEB de la microstructure du béton B10

c) Analyse du béton B20

Les observations illustrées sur la Figure 4.18 révèlent la présence des argiles (1), des pyrites framboïdales (2), des anhydres C2S (3), des gastéropodes (4), des matières organiques (5, 6) dans le béton B20. Ces éléments proviennent des sédiments GPMD incorporés dans le béton. Des examens microscopiques ont révélé que les pyrites, composantes mineures des sédiments, ne montraient aucun signe d'altération, qu'il s'agisse de bétons sains ou de bétons fortement microfissurés (Le Roux et al., 2001). Néanmoins, un taux élevé de matière organique gênera fortement la prise du ciment et une teneur élevée en matière argileuse posera problème au niveau du comportement mécanique et de la durabilité vis-à-vis du gonflement (Liang, 2012).

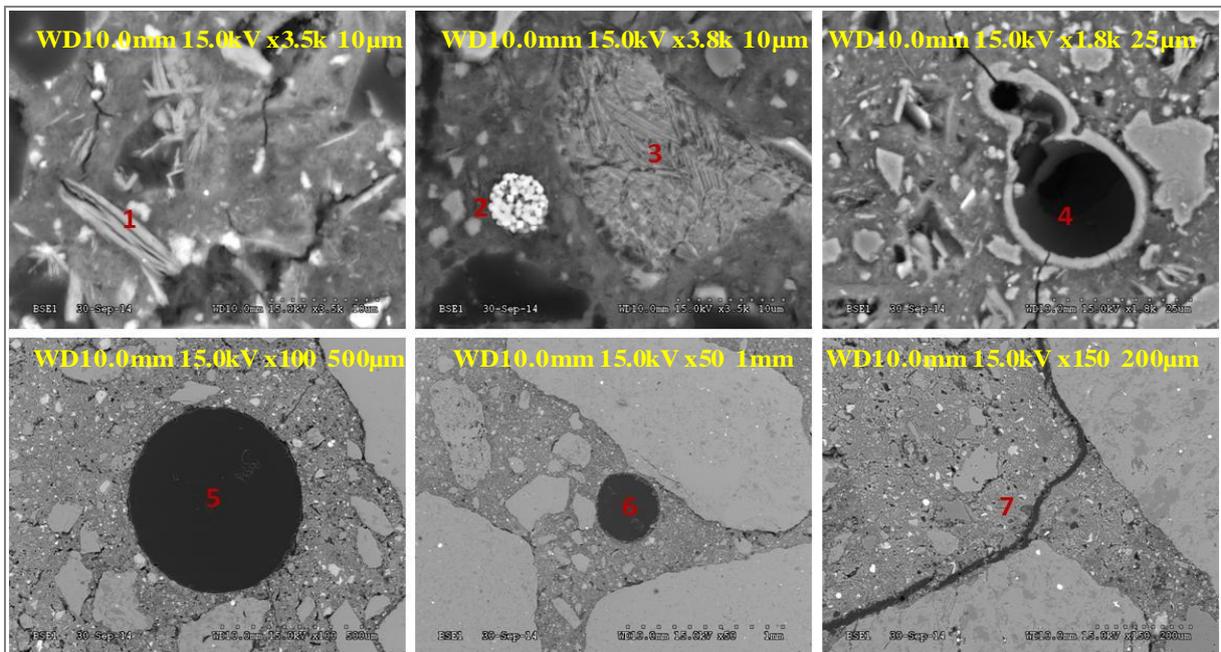


Figure 4.18 : Observation au MEB de la microstructure du béton B20

4.6 Etude de la durabilité des bétons B0 et B10 et B20

La durabilité des ouvrages en béton caractérise leur capacité à conserver, dans les conditions prévues, les fonctions d'usage pour lesquelles ils ont été conçus. Elle est particulièrement importante dans l'environnement maritime. D'une façon générale, le béton doit être compatible avec la chimie de l'environnement marin, le ciment doit résister aux sulfates, et avec les dégradations particulières liées à l'action de la houle et des sédiments. Elle dépend principalement de la qualité de la microstructure de la phase liante et de la compatibilité entre les caractéristiques physico-chimiques des granulats et les conditions de leur utilisation. Tout au long de leur vie, les ouvrages en bétons subissent des attaques physico-chimiques qui nuisent à leur durabilité. Il est donc impératif de pouvoir prédire comment ces matériaux réagiront dans tel ou tel milieu afin d'assurer leur durabilité et de justifier leur conformité dans le temps.

La présente étude s'intéresse à l'évaluation de la durabilité des bétons à base de sédiments de dragage portuaire sur la base de l'essai d'attaque sulfatique externe. Le choix d'étudier les bétons B0, B10 et B20 est lié à la résistance minimale exigée par le cahier des charges. La résistance à la compression du béton B20 est 10 % plus élevée que la résistance minimale exigée, contre une résistance à la compression de 24 % plus élevée pour le béton B10 et 70 % plus élevée pour le béton B0.

4.6.1 Bétons B0 et B10 et B20 soumis à l'attaque sulfatique externe

4.6.1.1 Introduction

La résistance du béton à l'attaque des sulfates peut être évaluée en laboratoire en conservant des éprouvettes dans une solution de sulfate de sodium (Achour, 2013). Des cycles altérés de mouillage et de séchage accélèrent les dommages causés par la cristallisation des sels dans les pores du béton. Les effets de cette exposition peuvent être évalués par la perte de résistance des éprouvettes bétons, la variation du module d'élasticité dynamique, par leur allongement et par leur perte de masse ou peuvent même être évalués visuellement (Neuville, 2000).

L'attaque sulfatique se produit lorsqu'un apport suffisant de sulfate est atteint. Les sels solides n'attaquent pas le béton, mais lorsqu'ils sont en solution, ils peuvent réagir avec la pâte de ciment hydraté. On trouve très fréquemment du sulfate de sodium dans les eaux de mer. L'eau de mer contient elle-même des sulfates, à raison de quelques grammes par litre, et les bétons en milieu marin sont donc concernés par les attaques sulfatiques externes. Les conséquences

de pénétration des sulfates dans le béton sont la formation du gypse, d'ettringite, de la thaumasite, et de la transformation des produits d'hydratation.

On distingue trois formes d'ettringites (GranDubé, 2006) :

- Ettringite de formation primaire (précoce) qui se forme par l'hydratation des aluminates de calcium en présence du gypse et ne provoque pas d'expansion.
- Ettringite de formation secondaire, pouvant se former soit de l'action directe de sulfates externes et pouvant générer de l'expansion, soit de la dissolution et recristallisation d'ettringite primaire ou d'autres formes préexistantes.
- Ettringite de formation différée résultant d'une élévation de température subie par le béton au cours de son histoire, cette ettringite est obtenue par des processus de formation complexes : décomposition thermique (et/ou non formation) de l'ettringite primaire, (re) précipitation différée de microcristaux d'ettringite dans la pâte de ciment hydratée générant des expansions et des fissurations.

4.6.1.2 Protocoles d'essais

Dans la présente étude, les bétons B0, B10 et B20 ont été soumis à une attaque sulfatique externe. Afin de suivre les performances de ces bétons vis-à-vis de l'attaque sulfatique, nous avons choisi trois protocoles expérimentaux parmi plusieurs essais de vieillissement accélérés : immersion totale, cycles immersion/séchage à 60 °C et cycles immersion/séchage à 105 °C. Il convient de noter qu'aucun de ces tests n'est normalisé pour l'évaluation de l'attaque sulfatique externe. L'étude intègre les mesures de la variation de masse, de la variation du module d'élasticité dynamique E_{dyn} de trois éprouvettes 11x22 cm de chaque type de béton soumises à trois protocoles expérimentaux.

a) Immersion totale

Le protocole d'immersion totale consiste à une immersion permanente des éprouvettes bétons dans une solution de 5 % de sulfate de sodium ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$). Cette solution est renouvelée tous les trente jours afin de garder son efficacité (Figure 4.19). Ce protocole est le plus utilisé pour évaluer ce type d'attaque et le choix de ce dosage vient de plusieurs études (Ghrici et al., 2006 ; Leklou, 2008 ; Thidar Aye et al., 2011 ; Achour, 2013). L'immersion totale a donc pour objectif de simuler le cas typique d'attaque sulfatique par des sulfates provenant de la pollution. Trois éprouvettes pour chaque type de béton ont été utilisées pour le suivi. Pour chaque mesure, les éprouvettes sont enlevées de la solution ensuite elles sont essuyées à l'aide

d'un papier absorbant pour réduire l'incertitude liée à la masse d'eau présente sur leurs surfaces.



Figure 4.19 : Immersion des bétons B0, B10 et B20 dans une solution à 5 % de $\text{Na}_2\text{SO}_4 + 10\text{H}_2\text{O}$

b) Immersion/séchage à 60 °C

Le séchage à 60 °C a été choisi pour éviter tout risque d'attaque sulfatique interne. Ce protocole permet de limiter la formation de l'ettringite interne, il n'y a donc pas d'attaque sulfatique interne qui pourrait perturber l'essai. Plusieurs chercheurs ont conclu que la formation de l'ettringite différée causée par une attaque sulfatique n'a pas été détectée pour des températures inférieures à 65 °C (Leklou, 2008 ; Achour, 2013). Pour ce protocole, les trois éprouvettes 11x22 cm des trois bétons suivent un cycle d'immersion/séchage de 24h. Dans un premier temps, les éprouvettes sont immergées dans une solution de 5 % de sulfates de sodium pendant quatre heures et sont ensuite séchées à l'étude à 60 °C pendant vingt heures (Riçal et al., 2009 ; Achour, 2013).

c) Immersion/séchage à 105 °C

Le séchage à 105 °C a été choisi pour évaluer la résistance à la cristallisation des sels. De même que pour le protocole précédent, les trois éprouvettes 11x22 cm des trois bétons suivent un cycle d'immersion/séchage de 24h. Immersion en solution pendant quatre heures suivie d'un séchage à l'étuve à 105 °C pendant 20h. Le protocole d'immersion/séchage à 105 °C vise à accélérer le vieillissement des bétons en recréant les attaques subies dans un milieu saturé en sulfates, il entraîne également des réactions sulfatiques internes dans les bétons.

4.6.1.3 Evolution de la masse et du module d'élasticité dynamique des bétons étudiés

a) Immersion totale

Les éprouvettes bétons B0, B10 et B20 ont été immergés d'une façon permanente dans la solution à 5 % de $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ à 20 °C. Après 13 semaines d'immersion totale, nous n'avons pas observé de dégradation particulière des ces éprouvettes. Pour suivre l'évolution de la variation de masse en fonction du temps, nous avons procédé à des pesées hebdomadaires des éprouvettes bétons épongées afin de réduire l'incertitude de mesure.

Les résultats de la Figure 4.20 indiquent une augmentation de la masse des ces trois bétons en fonction du temps d'immersion. La masse croît avec l'augmentation du taux d'incorporation de sédiment GPMD. Ce gain de masse est probablement dû au fait que les pores accessibles de ces éprouvettes sont remplis d'eau. La porosité accessible à l'eau du béton B20 est importante ce qui explique sa variation de masse.

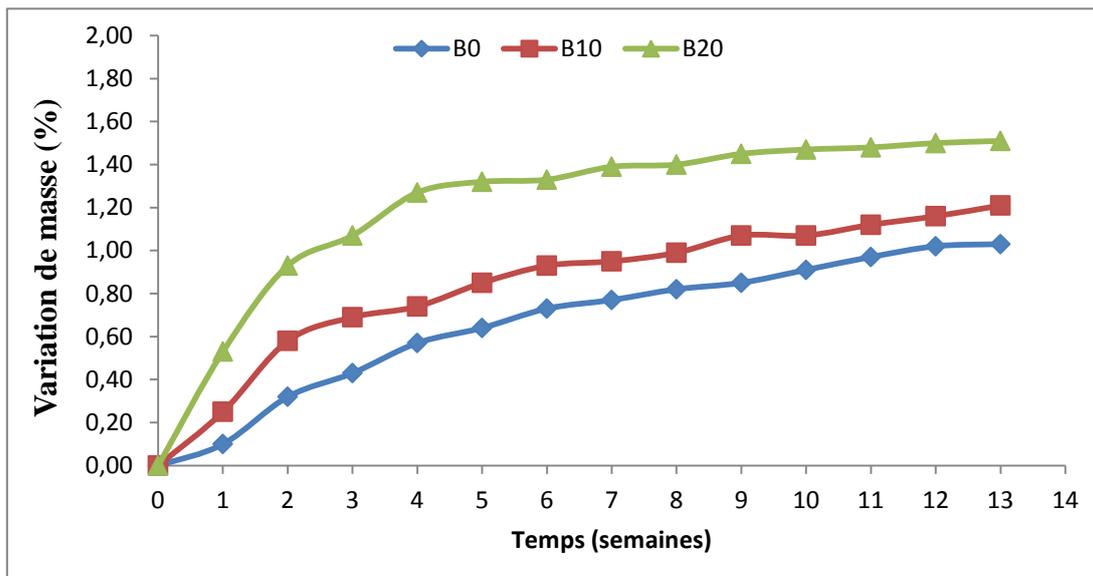


Figure 4.20 : Variation de la masse des éprouvettes de bétons en immersion totale à 20°C

Les mesures du module d'élasticité dynamique permettent de détecter des éventuelles altérations des éprouvettes bétons. Une éprouvette de géométrie adaptée est excitée mécaniquement par un seul choc élastique provoqué avec un marteau adapté et sa fréquence de résonance fondamentale est déterminée. Un transducteur reçoit les vibrations mécaniques résultantes qui parcourent l'éprouvette et transforme ces vibrations en signaux électriques. Les supports d'éprouvettes, les emplacements d'impulsions et les points de prise du signal sont choisis pour induire et mesurer un mode de vibrations transitoires spécifique (longitudinale).

Les signaux sont analysés par un appareil adapté qui fournit des données sur la fréquence et/ou sur la période de vibration de l'éprouvette et détermine la fréquence de résonance fondamentale. La fréquence de résonance fondamentale correspondante, les dimensions et la masse de l'éprouvette et le coefficient de poisson sont utilisées pour calculer le module d'élasticité dynamique (Norme ISO 12680-1).

La diminution du module implique que les caractéristiques mécaniques du matériau sont attaquées, le matériau s'endommage. La baisse du module d'élasticité dynamique mesurée sur des éprouvettes du béton B0, B10 et B20 provient de l'endommagement superficiel des échantillons visible sur les surfaces (Figure 4.21) et également de la propagation des microfissures qui est plus susceptible de se produire. Cette baisse de module est accompagnée d'un gain de masse pour les trois bétons étudiés. L'évolution de module dynamique est sensiblement la même pour tous les mélanges mais avec des écarts un peu plus grand à la 13^{ème} semaine. Ces évolutions pourraient être expliquées par l'effet des réactions de gonflement interne des éprouvettes bétons ou par l'attaque des sels issus de la dissolution du $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ensuite de la précipitation sans interaction chimique avec la pâte cimentaire.

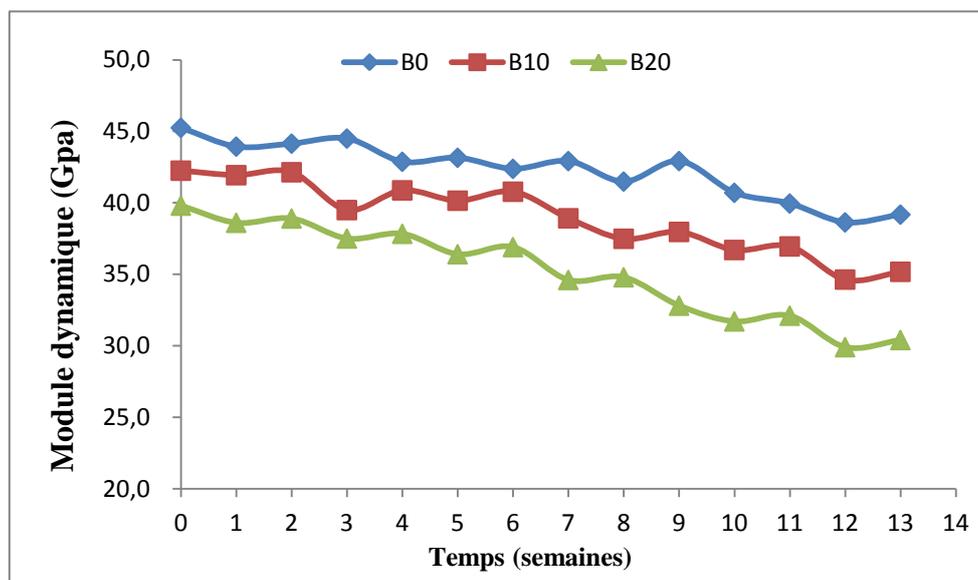


Figure 4.21 : Variation du module d'élasticité dynamique des éprouvettes de bétons en immersion totale

b) Immersion/séchage à 60 °C

Le suivi de ce protocole d'essai immersion/séchage à 60 °C montre l'apparition de petites fissures et des dégradations sur les surfaces des éprouvettes bétons après treize semaines d'essai (Figure 4.22). Les fissures sont principalement situées aux interfaces pâte de ciment et

granulats de Tournai. Nous avons également constaté que le béton B20 présente plus de dégâts que le béton B10 et B0. La sensibilité des bétons à l'attaque sulfatique externe est importante lorsque le taux d'incorporation des sédiments dans le béton est important.



Figure 4.22 : Dégradation des bétons constatés après treize semaines d'immersion/séchage à 60 °C

Les résultats obtenus montrent que les B0, B10 et B20 suivent la même tendance d'évolution. On constate que le béton B20 présente un gain de masse de 3,31 % après la 13^{ème} semaine d'essai contre 2,74 % pour le béton B10 et 2,15 % pour le béton B0 (Figure 4.23).

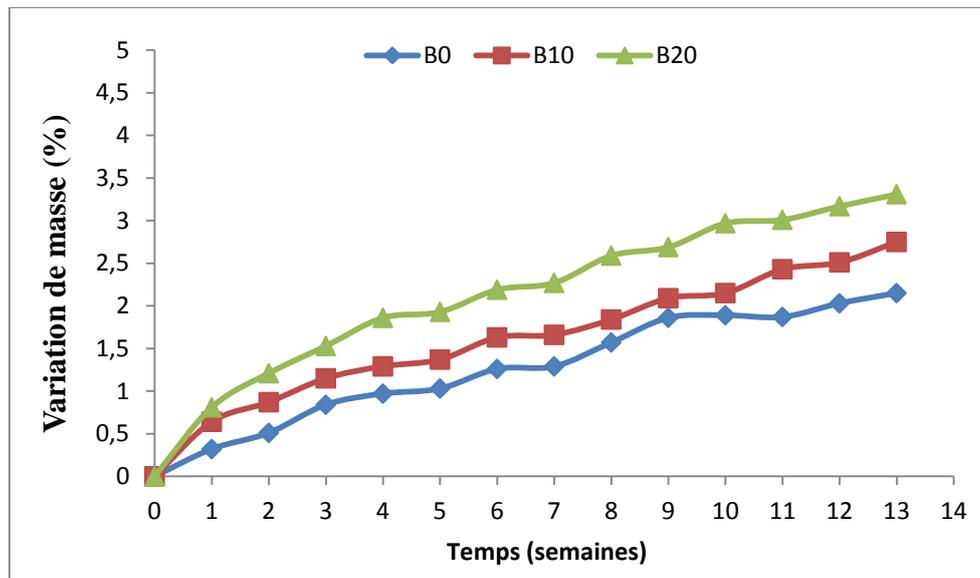


Figure 4.23 : Variation de la masse des éprouvettes de bétons en immersion totale/séchage à 60 °C

Les résultats présentés sur la Figure 4.24 indiquent une baisse dans le temps du module d'élasticité dynamique pour les bétons étudiés. Cette baisse croît avec le taux d'incorporation des sédiments GPMD. Le taux élevé de sédiment dans le béton B20 influence ses propriétés et accélère sa dégradabilité.

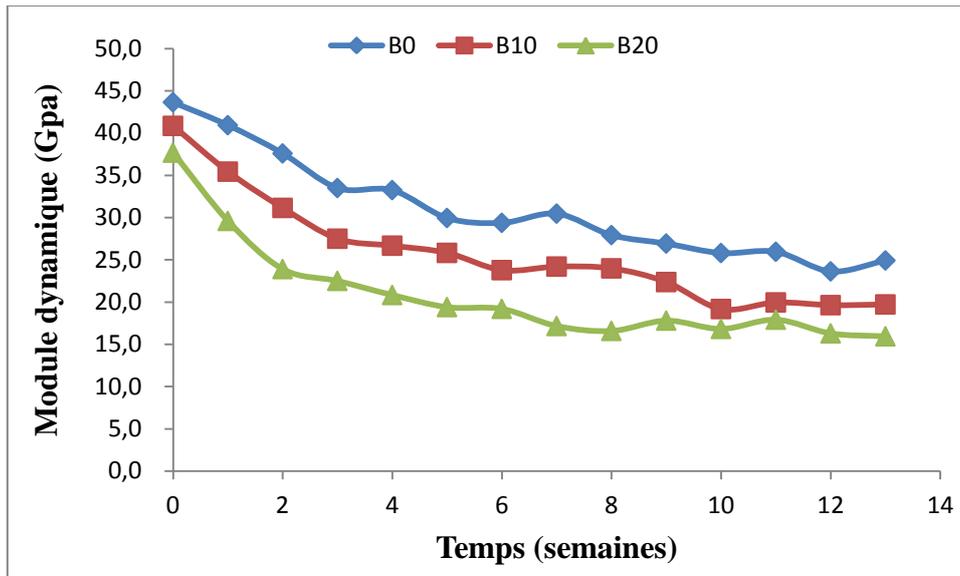


Figure 4.24 : Variation du module d'élasticité dynamique des bétons en immersion/séchage à 60 °C

c) Immersion/séchage à 105 °C

L'étude du protocole d'essai immersion/séchage à 105 °C montre également l'apparition des petites fissures et des dégradations surfaciques des éprouvettes bétons, beaucoup plus importantes qu'en immersion/séchage à 60 °C (Figure 4.25). Nous avons constaté que les bétons à base de sédiments présentent des dégâts plus importants par rapport au béton témoin, tout comme le protocole d'immersion/séchage à 60 °C. C'est un endommagement localisé à la surface des éprouvettes et au niveau des arrêtes.

Comme illustre la Figure 4.26, on observe un accroissement progressif de masse des éprouvettes des trois bétons étudiés. Il atteint 5,39 % pour le béton B20, 4,08 % pour le béton B10 et 3,20 % pour le béton B0.



Figure 4.25 : Dégradation des bétons constatés après treize semaines d'immersion/séchage à 105 °C

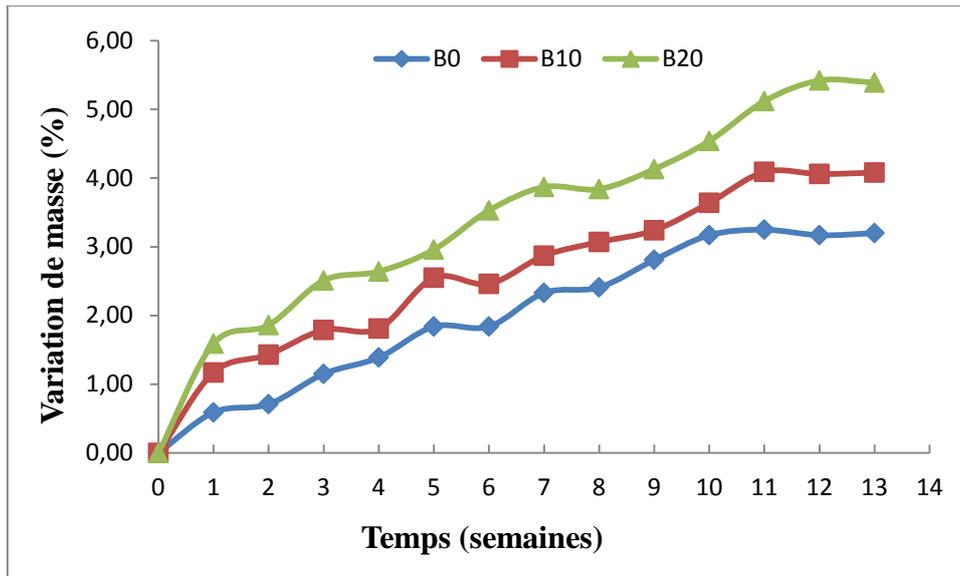


Figure 4.26 : Variation de la masse des éprouvettes bétons en immersion /séchage à 105 °C

L'évolution de module d'élasticité dynamique des bétons étudiés en protocole d'immersion/séchage à 105 °C montre une baisse rapide du module dynamique des éprouvettes bétons jusqu'à la 4^{ème} semaine. Au delà de la 4^{ème} semaine, le module dynamique des éprouvettes bétons est quasi-constant (Figure 4.27). Ce protocole est plus sévère, il présente une vitesse de dégradation plus élevée par rapport aux autres protocoles.

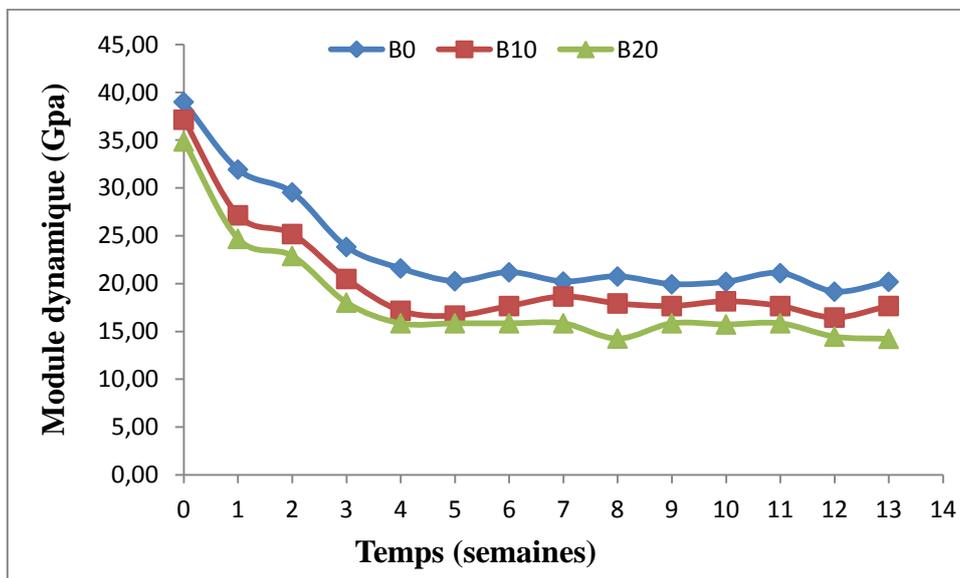


Figure 4.27 : Variation du module d'élasticité dynamique des bétons en immersion/séchage à 105 °C

Les différentes observations réalisées pendant cette étude montrent que dès l'apparition des premières fissures significatives en surface des éprouvettes, le module dynamique chute et les

dégradations s'accroissent. Les observations au MEB montrent alors que les interfaces pâte / granulats s'ouvrent ce qui facilite la pénétration des ions sulfates par le réseau de fissures. L'attaque progresse ainsi suivant le front de dégradation, dont l'épaisseur a tendance à s'élargir au cours du temps. La variation de masse des éprouvettes bétons augmente en fonction de l'augmentation la porosité accessible à l'eau causée par l'augmentation de réseau de fissure.

4.6.2 Evaluation environnementale des bétons B10 et B20

Dans le cadre de la caractérisation environnementale de sédiment brut de Dunkerque (SD) et des bétons à base de sédiments B10 et B20, il convient d'évaluer le potentiel polluant de ces matériaux sur la base d'essais de lixiviation et d'analyses en contenu total. Un échantillon représentatif de bétons et de sédiment brut est divisé en deux parties. Une partie est concassée ensuite tamisée à 4mm pour réaliser des essais de lixiviation selon la norme NF EN 12457-2 et afin de réaliser les analyses du contenu total, l'autre partie est broyée finement ensuite soumise à l'action d'un mélange d'acide chlorhydrique et d'acide nitrique pendant 16h à température ambiante, puis à l'ébullition pendant 2h. L'extrait est ensuite filtré et ajusté au volume avec de l'acide nitrique selon la norme NF ISO 11466.

Les résultats de la campagne d'analyse du contenu total montrent que le sédiment brut de Dunkerque présente des dépassements des valeurs seuils recommandées par l'arrêté de 23décembre 2009. Par conséquent, ce sédiment est donc non-immérgeable. Les résultats du Tableau 4.10 montrent également qu'à l'exception du cuivre, les teneurs en éléments traces métalliques mesurées dans les bétons B10 et B20 sont inférieures aux valeurs des niveaux N1. L'impact potentiel de ces derniers est jugé négligeable, leur immersion en mer ne présente pas de danger pour l'environnement.

Eléments	Concentration totale du matériau (mg/Kg de matière sèche)				
	B10	B20	SD	Niveau N1	Niveau N2
As	6,3	7,1	11,6	25,0	50
Cd	0,3	0,3	0,7	1,2	2,4
Cr	29,7	32,9	54,3	90,0	180
Cu	48,4	57,3	87,9	45,0	90
Ni	11,8	13,9	11,4	37,0	74
Pb	24,1	33,5	238,6	100,0	200
Zn	53,3	57,8	309,8	276,0	552

Tableau 4.10 : Teneurs en éléments traces du sédiment brut et des bétons B10 et B20

L'impact environnemental du sédiment brut de Dunkerque (SD) et des bétons B10 et B20 a été évalué à travers l'essai de lixiviation selon la norme NF EN 12457-2 sur un matériau concassé et tamisé à 4mm. Les résultats obtenus sont comparés à la législation de la mise en décharge des déchets (JOCE, 2003). Les résultats du Tableau 4.11 montrent d'une part que pour le sédiment (SD), hormis les teneurs chlorures et sulfates, les concentrations en éléments traces métalliques (ETM) sont inférieures aux valeurs seuils définies pour les déchets inertes garantissant une utilisation à risque très faible. D'autre part, les concentrations des ETM ainsi que les chlorures et sulfates sont inférieurs aux valeurs seuils pour les bétons B10 et B20. Nous pouvons donc conclure que ces deux bétons ne présentent pas d'effet néfaste sur l'environnement. Le relargage des ETM ainsi que les teneurs en chlorures et sulfates mesurés dans les bétons B10 et B20 sont inférieurs à ceux du sédiment brut (SD). Ce constat pourrait être attribué à la différence de surface de contact solide/liquide (aire, rugosité) de ces matériaux.

La comparaison des concentrations en contenu total et celles relatives aux l'éluât montre que les bétons B10 et B20 ne relarguent pas la totalité de ses polluants. Le relargage des ETM de ces deux bétons est quasiment faible par rapport au contenu total.

Concentration totale en mg/kg de matériau sec (essais sur lixiviats)				
Paramètres	B10	B20	SD	déchet inerte
As	0,15	0,10	0,32	0,50
Ba	8,52	11,80	0,24	20,00
Cd	0,01	0,01	0,01	0,04
Cr	0,16	0,09	0,17	0,50
Cu	0,14	0,26	0,56	2,00
Mo	0,06	0,06	0,13	0,50
Ni	0,05	0,12	0,19	0,40
Pb	0,16	0,23	0,31	0,50
Sb	0,01	0,01	0,01	0,06
Se	0,01	0,01	0,01	0,10
Zn	0,04	0,03	0,12	4,00
Chlorures	540	610	17429	800
Sulfates	410	590	1561	1000
Fraction soluble	1130	1670	2796	4000

Tableau 4.11 : Teneur en polluants du sédiment brut et des bétons B10 et B20 relatif aux éluats

4.6.3 Conclusion

L'objectif de cette étude est de caractériser, sur le plan physique et du comportement mécanique, les granulats de Tournai et les sédiments du GPMD et d'incorporer ces derniers dans des formulations de bétons respectant les exigences du cahier des charges pour une utilisation en travaux maritimes. Les études menées avec quatre fractions volumiques de substitution (5, 10, 20 et 40 %) de la fraction sableuse par des sédiments de dragage indiquent une chute de résistance en compression passant de 59 MPa pour le béton témoin à environ 24 MPa pour le béton à 40 % d'incorporation de sédiments. Ces résultats pourraient être expliqués par : l'effet de matières organiques sur l'hydratation de ciment, l'augmentation de la porosité avec l'incorporation de sédiments, l'hétérogénéité des mélanges et le pourcentage d'argile dans chaque béton. Le module d'élasticité a tendance à baisser avec l'augmentation du taux de substitution. Cette tendance est attribuable en grande partie à la porosité plus élevée des bétons avec des sédiments (bien démontré par des essais de porosité à l'eau et au mercure), à la moins bonne adhésion entre granulats et pâtes de ciment (tel que démontré par les examens MEB), et par la faible résistance mécanique des sédiments comparativement aux granulats naturels.

Le choix d'étudier les bétons B0, B10 et B20 est lié à la résistance minimale exigée par le cahier des charges. La résistance à la compression du béton B20 est 10 % plus élevée que la résistance minimale exigée, contre une résistance à la compression de 24 % plus élevée pour le béton B10 et 70 % plus élevée pour le béton B0. Les analyses à l'échelle microscopique montrent d'une part, un accroissement de la porosité totale avec le taux d'incorporation des sédiments. Cette augmentation est suivie de la diminution du diamètre moyen des pores. Les porosités totales des bétons B0, B10 et B20 sont respectivement de 8,98 %, 10,88 % et de 13,51 %. D'autre part, la substitution d'une partie du sable par le sédiment GPMD n'entraîne pas de variation de phases cristallines principales.

L'étude de durabilité est appréhendée à travers les essais de la porosité accessible à l'eau et de l'attaque sulfatique externe sur trois bétons respectant les exigences visés. Trois protocoles d'attaque sulfatique ont été mise en œuvre dans cette étude : (immersion totale dans une

solution à 5 % $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, cycle d'immersion et séchage à 60 °C et enfin cycles d'immersion et séchage à 105 °C). Les résultats du module d'élasticité dynamique en fonction des trois protocoles d'essai ont montré que la résistance à l'attaque sulfatique externe des bétons à base de sédiments est proportionnelle au taux d'incorporation de ce dernier. L'augmentation de taux d'addition de sédiments entraîne l'accroissement de la porosité accessible à l'eau ce qui influence directement la qualité du béton et provoque ainsi la diminution du niveau de performance mécanique.

**Chapitre 5 : Etude de faisabilité de granulats
à base de sédiments de dragage du port de
Dunkerque**

Chapitre 5 : Etude de faisabilité de granulats à base de sédiments du port de Dunkerque

5.1 Introduction

Le procédé de granulation est apparu depuis plus d'un siècle, il a enregistré une rapide expansion ces 50 dernières années avec l'essor industriel et le besoin de contrôler les propriétés de produits de plus en plus complexes. Ainsi, la mise en œuvre de la granulation consiste à utiliser une technologie d'agitation dans un lit de particules solides couplée à une alimentation en liquide servant à créer un lien entre les particules qui entrent en collision. Ce procédé est effectué par voie humide, par voie sèche, par extrusion et par frittage thermique sans présence de la phase liquide.

Le procédé de granulation par voie humide a fait l'objet de nombreuses contributions ces dernières années, concernant tout particulièrement les mécanismes qui contribuent à la formation des grains ainsi que les effets des variables opératoires de la formulation. Néanmoins, ce procédé demeure encore complexe dans la mesure où il est toujours impossible de prédire la qualité des grains à partir de la connaissance des variables du procédé et des caractéristiques des matériaux utilisés. Cependant, la description de la granulation comme un procédé à trois étapes : mouillage et nucléation, croissance et consolidation et fractionnement permettent de mettre l'accent sur le rôle du liquide de mouillage dans la formation des grains au moyen des ponts liquides.

L'objectif de ce travail consiste à étudier la faisabilité de granulation des sédiments de GPMD d'une part, en utilisant l'assiette granulatrice et d'autre part, en se servant d'une reproduction à l'échelle du laboratoire de la technique de fabrication de granulats en Big-bag utilisée à l'échelle industrielle. Les variables de procédé de l'assiette granulatrice incluent la vitesse d'agitation, le temps de granulation, l'angle d'inclinaison et le débit de liquide de mouillage. Par contre les variables de formulation incluent la masse de poudre et sa composition, la masse de liant et sa composition et la masse de liquide de mouillage (eau dans notre étude). Quant à la technique de fabrication de granulats en Big-bag, nous avons coulé les différentes formulations choisies dans des moules en polystyrène de 4*4*16 cm et dans des cubes 15*15*15 cm pour la réalisation des essais. Nous nous sommes fixés l'objectif de produire des granulats légers de masse volumiques inférieure à 2 g/cm³ et d'une porosité adéquate, en utilisant des formulations avec et sans sable de dragage.

5.2 Partie I : Fabrication de granulats par assiette granulatrice

5.2.1 Méthodologie de l'étude expérimentale

Notre travail consiste à étudier l'influence des paramètres opératoires sur les caractéristiques des granulats formés. Enfin, dans le but de cerner expérimentalement les phénomènes qui gouvernent la formation des granulats dans l'assiette granulatrice et de mieux comprendre comment ces phénomènes agissent sur les caractéristiques de ces matériaux, de tester les caractéristiques physiques et la résistance à l'abrasion des granulats élaborés.

La démarche expérimentale de notre étude est schématisée sur la Figure 5.1. Elle consiste à relier les paramètres opératoires de l'assiette granulatrice aux propriétés des granulats formés.



Figure 5.1 : Méthodologie expérimentale de formulation des granulats artificiels

5.2.2 Description de l'assiette granulatrice utilisée

L'assiette granulatrice est un appareil composé d'un plateau à fond plat incliné tournant autour de son axe comme schématisé sur les Figures 5.2 et 5.3. Le plateau est alimenté en eau (liquide mouillant) par pompe péristaltique. Sous l'effet de la rotation et de l'addition de l'eau, les particules roulent les unes sur les autres et s'agglomèrent pour former des granulats.

Le choix de l'inclinaison et de la vitesse de rotation de l'assiette granulatrice permet au matériau de couvrir tout le fond du plateau et de se répartir sur des trajectoires qui dépendent de la granulométrie des agglomérats au cours de leur croissance.

Dans le cadre de notre étude, l'assiette granulatrice est un plateau ouvert à l'air libre en acier inoxydable de diamètre $D = 40$ cm et de hauteur $h = 10$ cm. La vidange de l'assiette s'effectue par une spatule, la vitesse maximale de rotation de l'assiette est de 60 tr/min et l'angle d'inclinaison varie entre 36 et 90°.

Dans un premier temps, nous avons choisi de fixer l'angle d'inclinaison et de faire varier le temps et la vitesse de granulation. Les temps choisis pour les essais expérimentaux sont de 2, 5, 10 et 30 min et les vitesses de 12, 18, 23 et 28 trs/min.

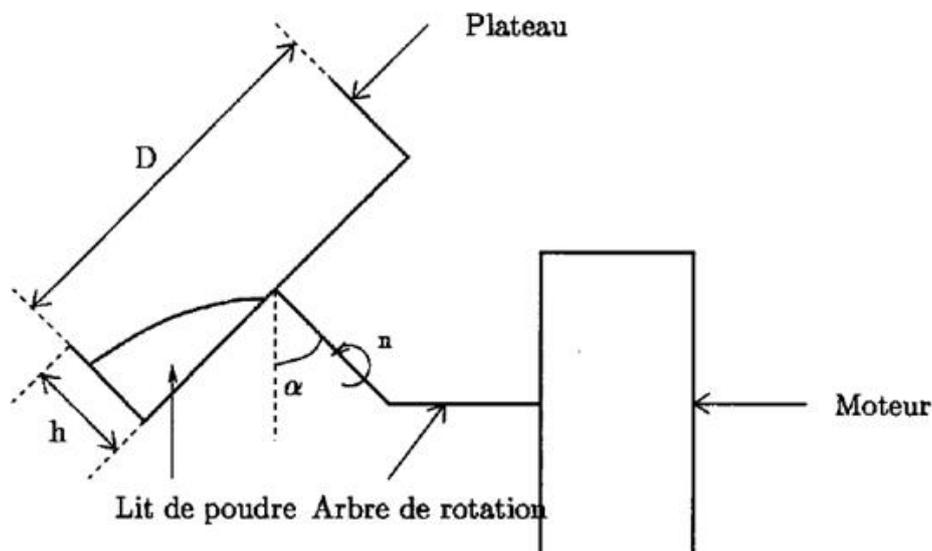


Figure 5.2 : vue de profil de l'assiette granulatrice. D , h , α et n sont respectivement le diamètre, la hauteur, l'angle d'inclinaison et la vitesse de rotation du plateau



Figure 5.3 : Assiette granulatrice utilisée pour la granulation des sédiments du port de Dunkerque

5.2.3 Caractérisation des matières premières

5.2.3.1 Caractéristiques du sédiment de GPMD

Le sédiment étudié provient du grand port maritime de Dunkerque, séché à 60 °C et émiétté au concasseur à mâchoire.

La granulométrie du sédiment GPMD a été mesurée à l'aide d'un granulomètre laser de marque COULTER type LS 230. Ce dernier permet une mesure de diamètre des particules variant de 0.04 μm à 2000 μm . Le sédiment de dragage est majoritairement constitué des particules de diamètre 5,6 μm (Figure 5.4). La surface spécifique a été déterminée par le BET et la masse volumique absolue par le pycnomètre à hélium MICROMERITICS-ACCUPYC1330.

Les résultats du Tableau 5.1 montrent que le sédiment présente une masse volumique absolue de 2,524 g/cm^3 et une surface Blaine de 8181 g/cm^2 .

Caractéristiques du sédiment de dragage	
d_{10}	1,4 μm
d_{50}	13,0 μm
d_{90}	193,0 μm
Surface spécifique	8181 cm^2/g
Masse volumique absolue	2,524 g/cm^3

Tableau 5.1 : Récapitulatif des caractéristiques du sédiment marin étudié

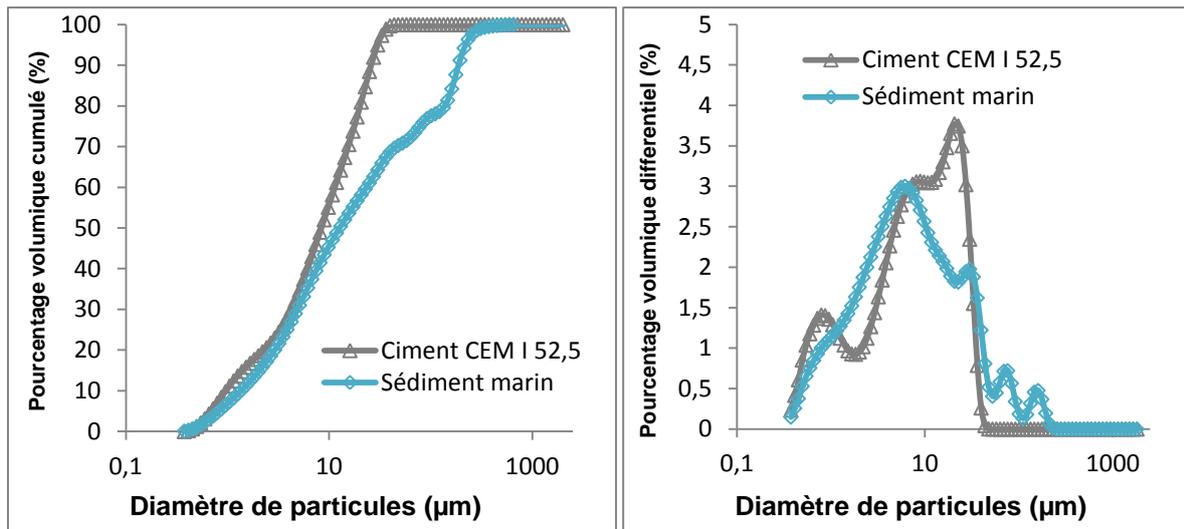


Figure 5.4 : Distribution granulaire en pourcentage massique et volumique du ciment et sédiment

5.2.3.2 Caractérisation du ciment utilisé

Le liant hydraulique utilisé pour l'étude est un ciment Portland CEM I 52,5 N-SR3 (2) CE PM-CP2 NF de l'usine LÄGERDORF. C'est un ciment courant résistant au sulfate (SR3), pour travaux de mer (PM), à teneur en sulfure limitée pour béton précontraint (CP2). Il est constitué principalement de clinker et nous a été livré par Holcim.

Les résultats du Tableau 5.2 montrent que la masse volumique absolue de ciment est de 3,15 g/cm³ et que sa surface Blaine est de 4400 cm²/g.

Caractéristique du ciment	
d₁₀	1,6 µm
d₅₀	12,0 µm
d₉₀	34,0 µm
Surface spécifique	4400 cm ² /g
Masse volumique absolue	3,15 g/cm ³

Tableau 5.2 : Récapitulatif des caractéristiques du ciment utilisé pour l'étude de granulation

5.2.3.3 Caractérisation de la phase liquide

Dans cette étude, nous avons utilisé l'eau de robinet comme liquide mouillant dont le pH mesuré est de 7,21 à 23,5 °C. Elle est le plus couramment utilisée dans le processus de

granulation à voie humide afin de faciliter l'agglomération des particules. Une granulation correcte n'est possible que pour une teneur en eau assez bien déterminée.

5.2.4 Etude de la granulation par assiette granulatrice

Pour chaque essai, nous introduisons 300 g de ce mélange dans l'assiette et nous continuons la production de granulats jusqu'à l'épuisement de ce mélange. Après séchage à 60 °C des granulats produits (conservés dans des sacs hermétiques), nous effectuons des analyses granulométriques sur ces derniers.

Le tamisage des granulats formés par assiette granulatrice est une opération délicate pour laquelle une attention particulière doit être portée. Le principal problème rencontré lors du tamisage est l'attrition des granulats.

La méthode la plus adaptée pour les matériaux fragiles est le tamisage par vibration. La séparation des granulats s'effectue par vibration à l'aide d'une tamiseuse RETSCH. La masse de l'échantillon, la durée de tamisage et l'amplitude des vibrations ont été choisies de façon à obtenir un tamisage efficace. Afin d'éviter les problèmes d'échantillonnage, nous avons utilisé la totalité des granulats produits. Ainsi, la distribution massique en taille des granulats est déterminée.

5.2.4.1 Influence de la vitesse de rotation

La Figure 5.5 représente l'influence de la vitesse de rotation de l'assiette granulatrice sur la distribution en masse des granulats. Nous constatons que la répartition granulométrique des granulats supérieurs à 8 mm est peu influencée par la variation de la vitesse de rotation. En effet, les analyses granulométriques sont quasi identiques quelle que soit la vitesse de rotation. Néanmoins, pour la fraction 0,8/8 mm, l'augmentation de la vitesse de rotation entraîne une augmentation de diamètre des granulats.

Ce comportement pourrait être expliqué par le phénomène de densification des granulats. Sous les contraintes imposées par la rotation de l'assiette granulatrice, les granulats sont soumis à un phénomène de centrifugation qui a pour effet la densification progressive des granulats, ce qui entraîne la diminution progressive de leurs diamètres.

Il est important de noter qu'à faibles vitesses de rotation, nous constatons que les particules suivent un régime d'écoulement en roulement continu les unes sur les autres. Quand la vitesse de rotation est élevée, les particules suivent un régime d'avalanche où une partie du mélange

est entraînée le long de l'assiette et retombe à la surface. Plus on augmente la vitesse de rotation de l'assiette, plus la quantité entraînée le long de l'assiette est importante.

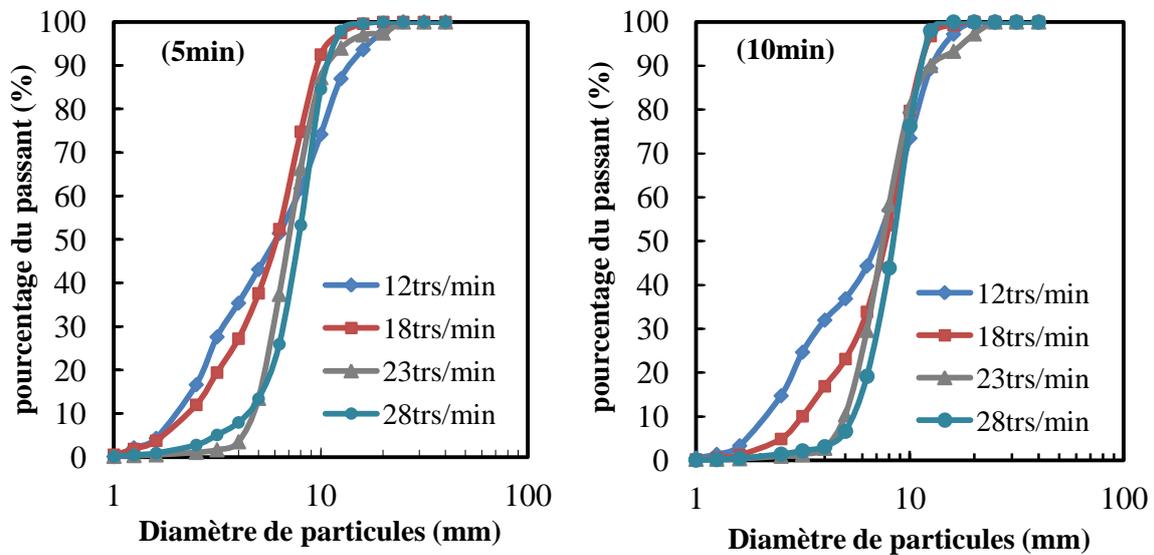


Figure 5.5 : Influence de la vitesse de rotation sur la distribution cumulée en masse des granulats artificiels produits en un temps de granulation de 5 min et 10 min

Les résultats du Tableau 5.3 montrent que la vitesse de rotation n'a pas d'influence sur les caractéristiques physiques et la résistance à l'abrasion des granulats artificiels produits à 28 jours de maturation. La vitesse de rotation n'est donc pas un paramètre clé permettant de contrôler la granulation par assiette granulatrice.

Vitesse de rotation (trs/min)	Masse volumique absolue (g/cm ³)	Masse volumique réelle séchée en étuve (g/cm ³)	Masse volumique réelle saturée surface sèche (g/cm ³)	Coefficient d'absorption d'eau WA24 (%)	Coefficient Micro-Deval en présence d'eau M _{DE} (%)
12	2,47	1,19	1,71	43,70	88,22
18	2,46	1,17	1,69	44,86	86,50
23	2,45	1,18	1,68	44,56	84,08
28	2,49	1,18	1,71	44,65	82,86

Tableau 5.3 : Influence de la vitesse de rotation sur les caractéristiques des granulats artificiels produits en un temps de granulation de 10 min

Les masses volumiques de ces derniers telles que définies dans la norme NF EN 1097-6 sont inférieures aux valeurs des granulats naturels. L'absorption d'eau après 24 heures d'immersion est très importante. Ceci met en évidence la forte porosité des ces granulats. Du point de vue mécanique, le coefficient Micro-Deval à l'état humide est très élevé ce qui signifie que la résistance à l'usure de ces granulats artificiels est faible.

Afin d'évaluer l'influence de la vitesse de rotation sur la stabilité de ces granulats artificiels sous conditions d'immersion/séchage, nous avons réalisé des essais de dégradabilité. Les agrégats artificiels sont soumis à 4 cycles d'immersion/séchage (immersion dans l'eau pendant 8 h et séchage à l'étuve pendant 16h). Le coefficient de dégradabilité est défini comme étant le rapport entre le diamètre correspondant à 10% de passant avant et après l'essai (Figure 5.6). Les résultats du Tableau 5.4 indiquent un faible coefficient de dégradabilité quelle que soit la vitesse utilisée. Un constat similaire à été fait pour différents temps de granulation.

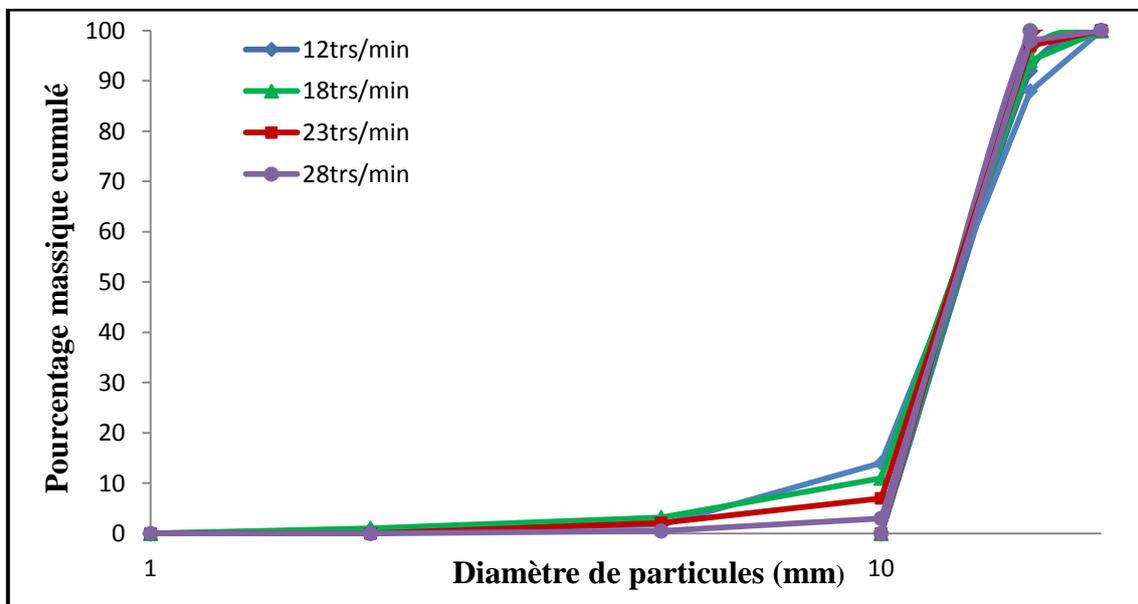


Figure 5.6 : Influence de la vitesse de rotation sur la dégradabilité des granulats artificiels

Vitesse de rotation (trs/min)	D ₁₀ avant essai (mm)	D ₁₀ après essai (mm)	Coefficient de dégradabilité (%)
12	10,5	8,0	1,31
18	10,6	9,0	1,18
23	10,5	10,1	1,04
28	10,6	10,3	1,03

Tableau 5.4 : Valeurs de coefficients de durabilité en fonction des vitesses de rotation

5.2.4.2 Influence du temps de granulation

Afin d'étudier l'influence du temps de granulation sur la répartition granulométrique des granulats, après l'introduction d'un mélange et une granulation avec ajout d'eau pendant 2 min, la rotation est poursuivie sans ajout d'eau à 5, 10 et 30 min. Sous l'effet du liant hydraulique et du roulement de particules, les agglomérats vont capter d'autres particules ou agglomérats et grossir au fur et à mesure. Il est important de noter que, lorsque la vitesse de rotation augmente et sous l'effet des contraintes imposées par la rotation de l'assiette, les granulats formés ont tendance à se casser puis à se reformer à nouveau. Les granulats résultants de ce phénomène sont plus résistants au toucher.

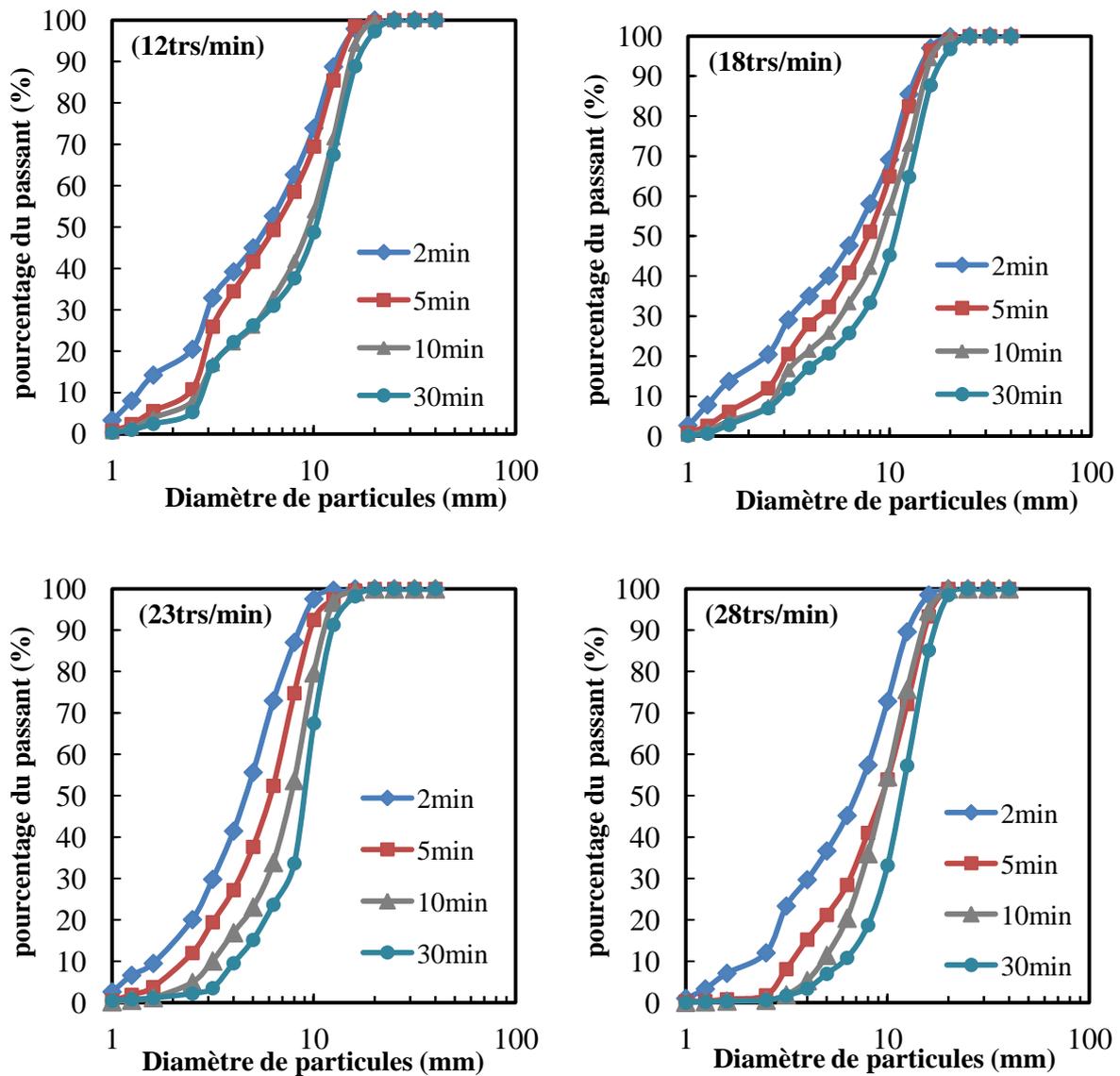


Figure 5.7 : Influence du temps de granulation sur la distribution cumulée en masse de granulats

Les résultats de la Figure 5.7 montrent une variation importante des pourcentages des particules fines et grosses lorsqu'on augmente le temps de granulation. En effet, l'augmentation de ce dernier entraîne une augmentation du diamètre des granulats. Nous retrouvons ce constat pour les quatre vitesses de granulation testées. La diminution du temps de granulation entraîne une diminution du taux de grosses particules et l'accroissement du taux de fines. Ce phénomène est d'autant plus marqué que la vitesse de rotation est importante.

5.2.4.3 Influence du débit d'alimentation

Afin d'étudier l'influence du débit d'alimentation sur la répartition granulométrique des granulats, nous avons utilisé la même quantité d'eau pour tous les mélanges réparties sur des temps de granulation de 2, 5, 10 et 30 min.

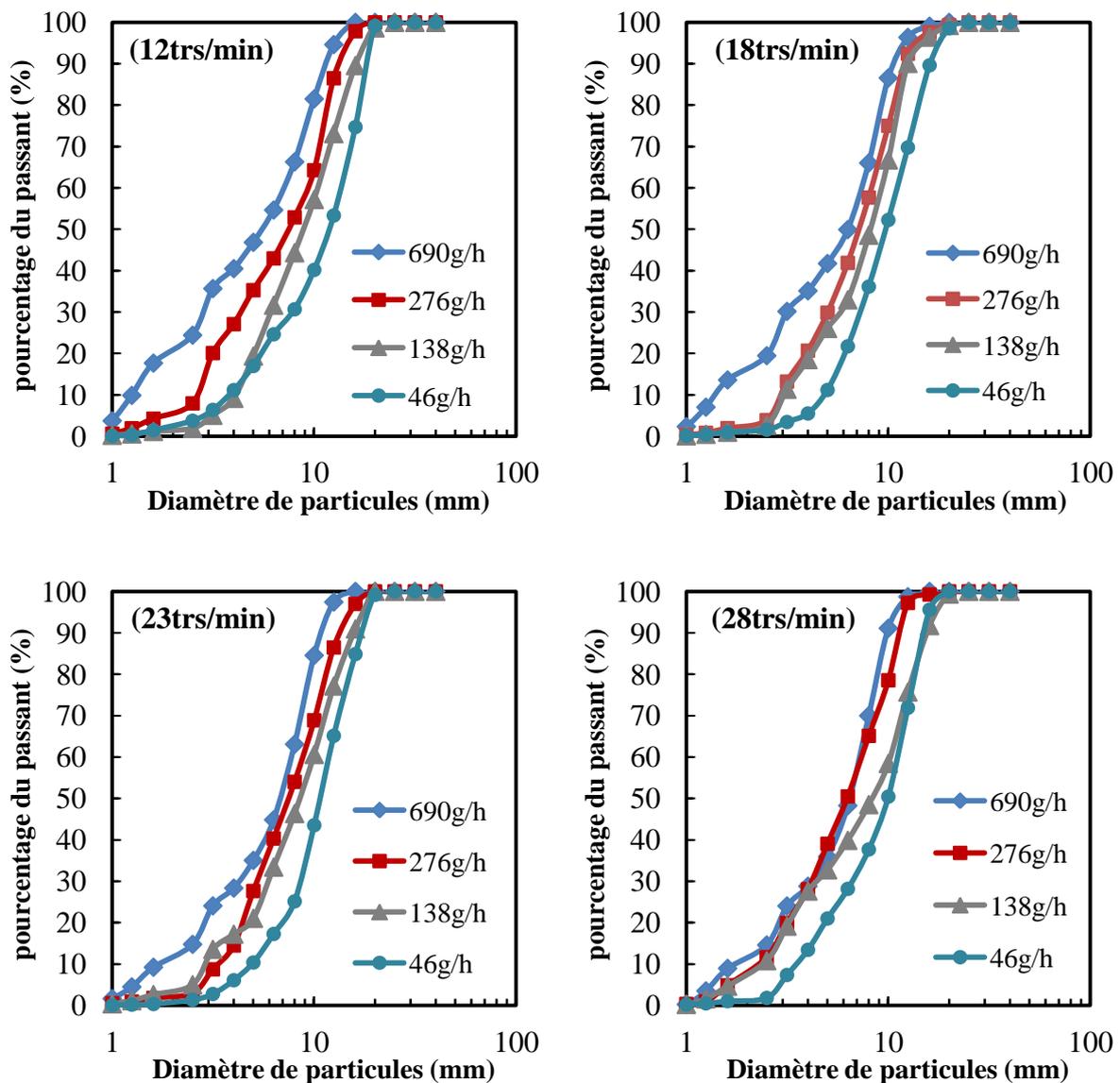


Figure 5.8 : Influence du débit d'alimentation sur la distribution cumulée en masse de granulats

Comme le débit est variable, le temps de granulation est donc modifié. Les résultats de la Figure 5.8 montrent que le pourcentage des particules fines augmente avec le débit d'alimentation du liquide alors que celui des grosses diminue pour toutes les vitesses utilisées. Il n'est toutefois pas possible de dissocier l'effet du débit de celui de la durée de granulation.

5.2.4.4 Influence du rapport liquide/solide

Lors de ces essais, nous avons fait varier la quantité d'eau introduite au mélange tout en gardant le débit constant à 138 g/h, ce qui signifie que le temps de granulation est modifié. Etudier l'influence de la quantité d'eau introduite revient à étudier le profil de croissance de granulats à base de sédiments lors de la granulation au cours du temps. Nous avons étudié la distribution granulométrique cumulée en masse de granulats à base de sédiments GPMD pour trois rapports liquide/solide à un débit d'alimentation en eau fixe. Nous constatons que la distribution granulométrique tend vers des granulats de diamètres supérieurs. L'augmentation de la quantité d'eau introduite dans le mélange entraîne une augmentation du diamètre moyen de granulats (Figure 5.9).

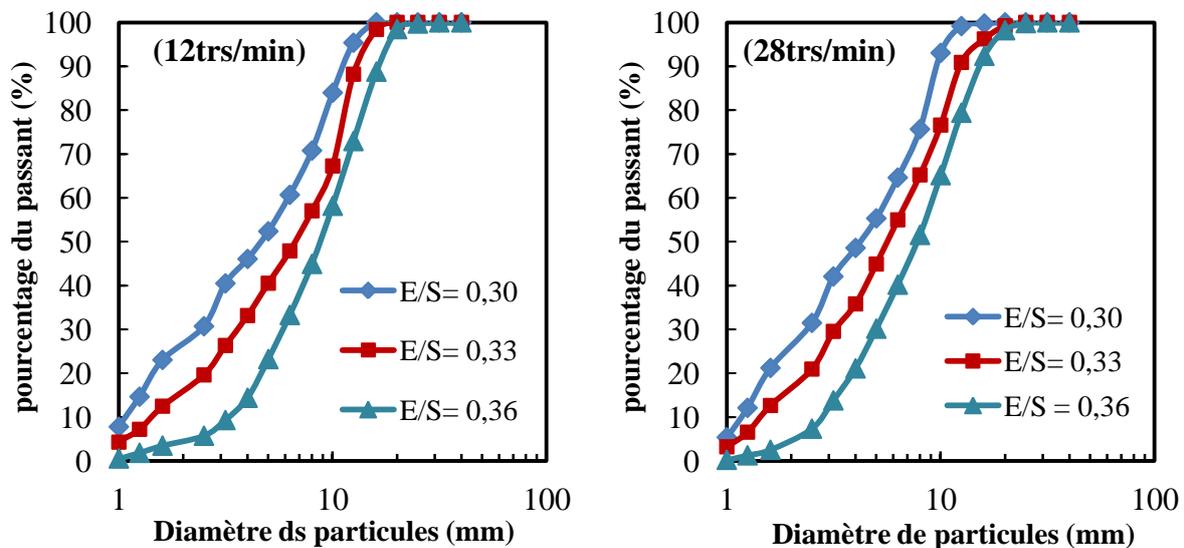


Figure 5.9: Influence du rapport liquide/solide sur la distribution granulométrique cumulée en masse de granulats

5.2.5 Formulation et caractérisation des granulats produits par assiette granulatrice

Afin d'améliorer la gestion à terre des sédiments de dragage et d'apporter les éléments de réponse sur la possibilité de produire des granulats artificiels à base de ces matériaux, nous avons testé trois compositions de sédiments de dragage, de ciment et de l'eau. Le but étant de minimiser la proportion de ciment et d'augmenter dans la mesure du possible, la quantité de sédiments incorporés.

Les trois compositions retenues, dont la vitesse de rotation et le temps de granulation sont fixes, sont résumées dans le Tableau 5.5 :

Formulation	Ciment (%)	Sédiment (%)	Débit (g/h)	Temps de granulation (min)	Vitesse de rotation (trs/min)
FG1	10	90	270	5	160
FG2	30	70	210	5	160
FG3	50	50	180	5	160

Tableau 5.5 : Formulations retenues avec leurs caractéristiques de granulation

5.2.5.1 Analyses granulométriques

Après avoir réalisé plusieurs analyses granulométriques de trois formulations en modifiant la quantité d'eau introduite, nous avons procédé par élimination afin de choisir les courbes granulométriques les plus proches pour ces trois formulations (Figure 5.10). Nous supposons que plus les analyses granulométriques se rapprochent, plus les mécanismes de formation de granulats artificiels sont similaires. Nous pouvons donc comparer leurs caractéristiques physiques et mécaniques bien que leurs compositions soient différentes.

Les résultats de la Figure 5.10 indiquent une dispersion moyenne d'environ 19 % des granulats de diamètre inférieur à 6,3 mm. Au-delà de ce diamètre, les résultats des trois formulations étudiées sont similaires.

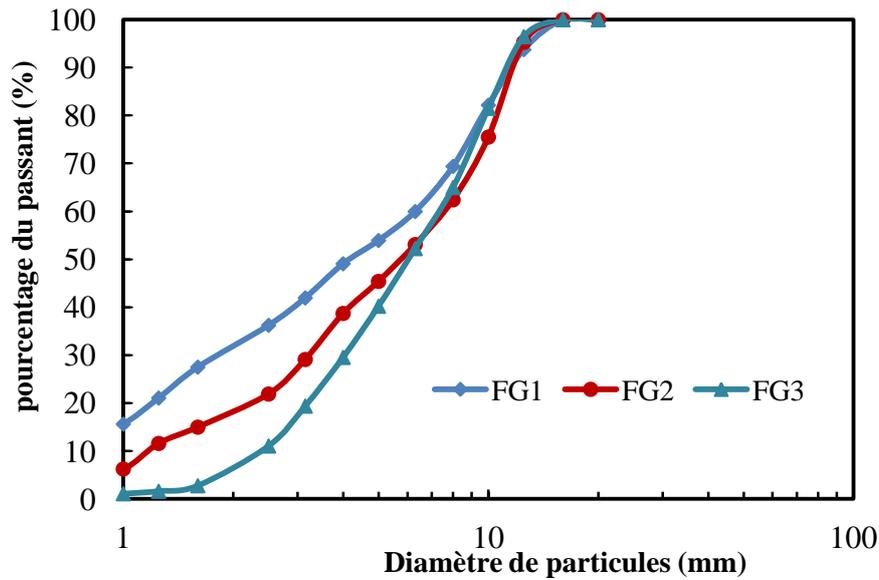


Figure 5.10 : Analyse granulométrique de l'échantillon choisi pour chaque formulation

5.2.5.2 Masse volumique apparente et absolue

La masse volumique absolue est déterminée au pycnomètre à hélium sur un échantillon représentatif broyé finement après quartage. La masse volumique apparente est déterminée par la méthode des pesées hydrostatiques selon la norme NF EN 1936. Elle est mesurée en appliquant l'équation (5.1) :

$$\rho_{App} = \frac{M_d}{M_S - M_h} \quad (5.1)$$

Avec, M_d : masse dans l'air de la prise d'essai séchée à l'étuve, M_S : masse dans l'air des granulats saturés et superficiellement secs et M_h : masse dans l'eau des granulats saturés.

Nous pouvons aisément constater que les masses volumiques apparentes et absolues croissent avec le dosage en ciment (Tableau 5.6). Néanmoins, elles sont faibles par rapport aux masses volumiques de matériaux standards ce qui laisse supposer une porosité élevée. La masse volumique apparente de ces granulats est comparable à celle des granulats légers tels que les argiles et les schistes expansés compris entre 1,3 et 1,7 g/cm³. Elle est fortement influencée par la granulométrie, la forme de grains et le degré de tassement.

Formulation	Masse volumique absolue (g/cm ³)	Masse volumique apparente (g/cm ³)
FG1	2,53	1,17
FG2	2,56	1,23
FG3	2,62	1,34

Tableau 5.6 : Valeurs de masses volumiques apparentes et absolues des granulats artificiels

5.2.5.3 Coefficient d'absorption d'eau

Le coefficient d'absorption d'eau (WA₂₄) est défini comme étant le rapport de l'augmentation de la masse d'un échantillon de granulats à sa masse sèche, après passage à l'étuve, du fait de la pénétration de l'eau dans les pores accessibles à l'eau pendant 24h. Il est déterminé selon la norme NF EN 1097-6 et s'exprime suivant l'équation (5.2):

$$WA_{24} = 100 \times \frac{M_1 - M_4}{M_4} \quad (5.2)$$

Avec, M₁ : le masse dans l'air des granulats saturés et superficiellement secs et M₄ : masse dans l'air de la prise d'essai séchée à l'étuve à 105 °C.

L'augmentation du dosage en ciment entraîne une diminution du coefficient d'absorption d'eau des granulats artificiels après immersion pendant 24 h (Tableau 5.7).

Formulation	Masse volumique absolue (g/cm ³)	Masse volumique réelle séchée en étuve (g/cm ³)	Masse volumique réelle saturée surface sèche (g/cm ³)	Coefficient d'absorption d'eau WA24 (%)
FG1	2,42	1,06	1,62	53,03
FG2	2,49	1,16	1,69	46,38
FG3	2,55	1,25	1,75	40,60

Tableau 5.7 : Valeurs du coefficient d'absorption d'eau des granulats artificiels après 24h d'immersion

5.2.5.4 Porosité accessible à l'eau

La porosité accessible à l'eau est définie comme étant le rapport du volume des vides contenus dans les granulats et accessible à l'eau, au volume réel de l'échantillon. Elle a été mesurée par pesée hydrostatique, sur des granulats à 28 jours de cure, selon la norme NF EN 1936. Sa valeur est déterminée en appliquant l'équation (5.3) :

$$n = \frac{M_s - M_d}{M_s - M_h} \times 100 \quad (5.3)$$

Les résultats obtenus montrent une porosité accessible à l'eau élevée par rapport aux granulats naturels. Cette porosité élevée confère aux granulats une forte capacité d'absorption d'eau expliquant ainsi les résultats d'absorption d'eau après 24 h d'immersion (Figure 5.11).

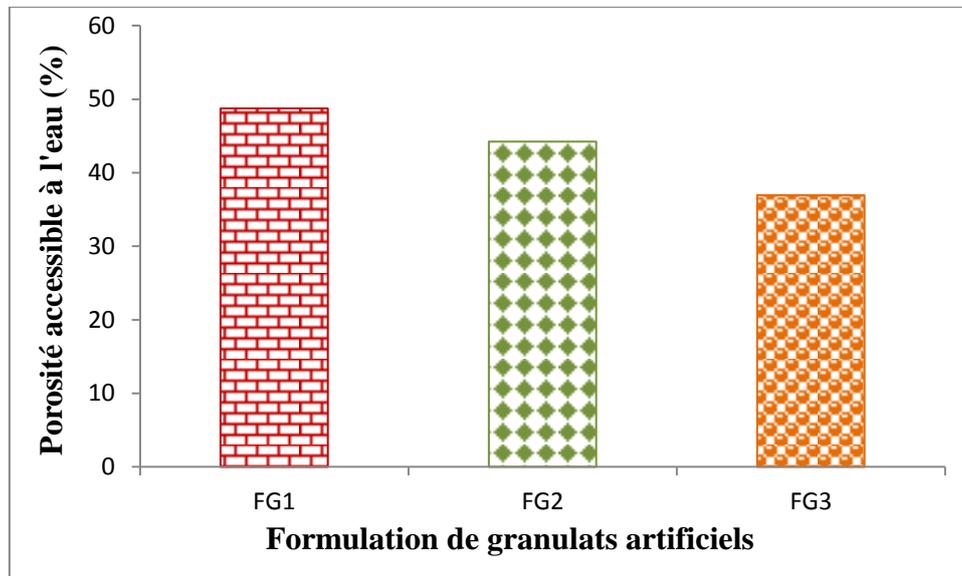


Figure 5.11 : Porosité accessible à l'eau des granulats artificiels

5.2.5.5 Dégradabilité des granulats artificiels

Le coefficient de dégradabilité (DG) est un paramètre représentatif du comportement de certains matériaux se traduisant par une évolution continue de leurs caractéristiques géotechniques (granularité, Argilosité, plasticité, ...) par rapport à celles observées immédiatement après leur extraction. Cette évolution est imputable à l'action combinée des agents climatiques ou hydrogéologiques (gel, cycles imbibition-séchage) et des contraintes mécaniques subies.

Le coefficient de dégradabilité est un des paramètres d'identification retenu dans la classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières (norme NF P 11-300).

Les granulats produits sont destinés aux rechargements des plages, il nous semble donc nécessaire d'étudier l'influence du cycle séchage/immersion sur leurs comportement.

L'essai consiste à déterminer la réduction du D_{10} d'un échantillon de granularité 10/20mm soumis à quatre cycles immersion-séchage conventionnels.

Le coefficient de dégradabilité s'exprime par le rapport du D_{10} avant et après les cycles immersion/séchage.

Au sens du guide GTR, les seuils établis pour l'évaluation de niveau de dégradabilité sont :

- $DG < 5$: le matériau est peu dégradé ;
- $5 < DG < 20$: le matériau est moyennement dégradé ;
- $DG > 20$: le matériau est très dégradé.

Les résultats de tests de dégradabilité montrent une évolution de la granulométrie des granulats artificiels après les cycles d'immersion/séchage pour les trois formulations testées (FG1, FG2 et FG3) à 28 jours de cure (Figure 5.12). Nous constatons une évolution similaire des trois formulations avec production de particules fines. Le pourcentage de ces dernières décroît avec l'augmentation du taux de ciment. Quant au coefficient de dégradabilité, il est compris entre 1,03 et 1,57 ce qui classe ces granulats artificiels comme des matériaux peu dégradés (Tableau 5.8). Il est important de noter que les granulats de grand diamètre ont tendance à se fissurer et à se dégrader plus facilement que les granulats de diamètre inférieur.

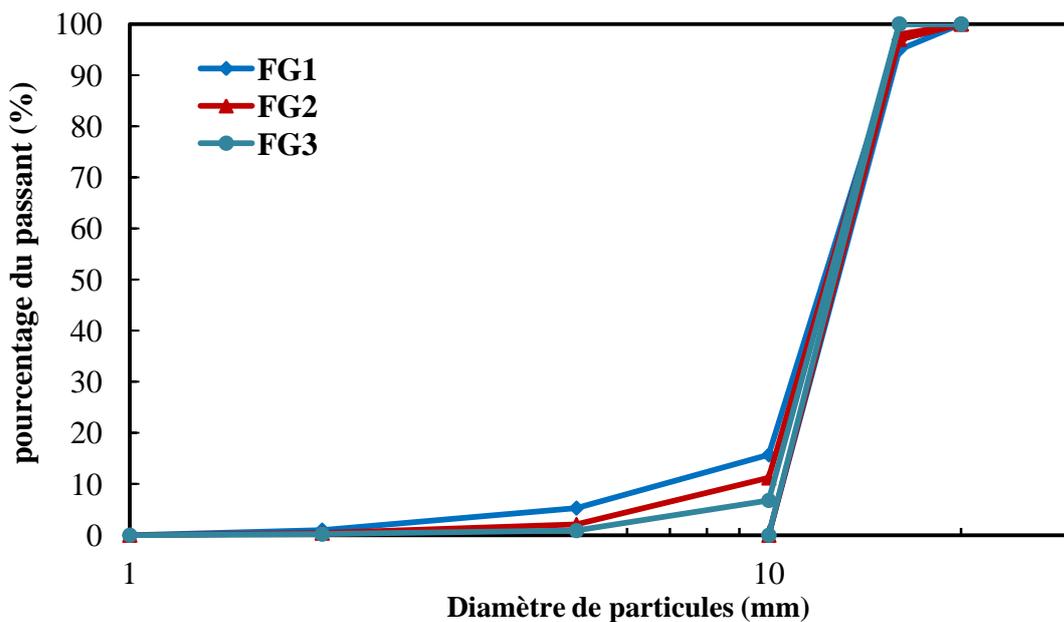


Figure 5.12: Dégradabilité des granulats artificiels

Formulation	D_{10} avant test (mm)	D_{10} après test (mm)	DG (%)
FG1	10,5	6,7	1,57
FG2	10,6	9,3	1,14
FG3	10,5	10,2	1,03

Tableau 5.8 : Valeurs de coefficient de dégradabilité des granulats artificiels

5.2.5.6 Détermination de la résistance à l'usure de granulats artificiels

Afin de déterminer la résistance à l'usure de ces granulats, nous avons utilisé la norme NF EN 1097-1. La fraction 10-14 mm de chaque formulation est soumise à l'essai à l'état humide. L'essai consiste à mesurer l'usure produite par le frottement entre les granulats et par une charge abrasive dans un cylindre rotatif dans des conditions définies. A la fin du test, le pourcentage refusé sur le tamis de 1,6 mm est utilisé pour calculer le coefficient micro-Deval selon l'équation (5.4).

$$M_{DE} = \frac{500 - M}{5} \times 100 \quad (5.4)$$

Avec M : masse de la fraction refusée au tamis 1,6 mm.

De nos trois formulations, la formulation FG1 présente un coefficient Micro-Deval inférieur à 100 % à 7 jours de maturation. En effet, après l'essai, il n'y a aucun refus au tamis 1,6 mm après lavage de matériau. Nous constatons que la résistance à l'usure des granulats artificiels croît avec le dosage en ciment ainsi que la période de cure (Tableau 5.9).

Formulations	Masse restante après essai (g) (7jrs de cure)	Masse restante après essai (g) (28jrs de cure)	Coefficient Micro-Deval (%) (7jrs de cure)	Coefficient Micro-Deval (%) (28jrs de cure)
FG1	0	46	100,0	90,8
FG2	32	89	93,6	82,2
FG3	120	186	76,0	62,8

Tableau 5.9 : Valeurs de coefficient Micro-Deval des formulations retenues

5.2.5.7 Evaluation de l'impact environnemental des granulats artificiels

La caractérisation environnementale des granulats artificiels des formulations FG1, FG2 et FG3 nécessite d'évaluer le potentiel polluant de ces matériaux sur la base d'essais de lixiviation et d'analyses en contenu total. Un échantillon représentatif de granulats artificiels est divisé en deux parties. La première partie est tamisée à 4 mm pour réaliser des essais de lixiviation sur le passant selon la norme NF EN 12457-2 et afin de réaliser les analyses du contenu total, l'autre partie est broyée finement ensuite soumise à l'action d'un mélange d'acide chlorhydrique et d'acide nitrique pendant 16 h à température ambiante, puis à l'ébullition pendant 2 h. L'extrait est ensuite filtré et ajusté au volume avec de l'acide nitrique selon la norme NF ISO 11466.

Les résultats de la campagne d'analyse du contenu total montrent que les teneurs en éléments traces métalliques de ces granulats artificiels sont inférieures aux valeurs seuils des niveaux N1 et N2 (Tableau 5.10). L'impact potentiel de ces derniers est jugé négligeable, leur immersion en mer ne présente pas de danger pour l'environnement.

Eléments	Concentration totale du matériau (mg/Kg de matière sèche)					
	FG1	FG2	FG3	SD	Niveau N1	Niveau N2
As	10,30	8,90	7,3	11,6	25	50,0
Cd	0,56	0,49	0,31	0,7	1,2	2,4
Cr	47,60	41,50	39,8	54,3	90	180,0
Cu	38,20	31,90	29,8	87,9	45	90,0
Ni	12,30	13,70	17,5	11,4	37	74,0
Pb	59,10	48,40	42,2	238,6	100	200,0
Zn	73,90	69,80	62,6	309,8	276	552,0

Tableau 5.10 : Teneurs en éléments traces du sédiment brut et des granulats artificiels

L'impact environnemental de granulats artificiels des formulations FG1, FG2 et FG3 a été évalué à travers l'essai de lixiviation selon la norme NF EN 12457-2 sur échantillon représentatif tamisé à 4 mm. Les résultats obtenus sont comparés à la législation de la mise en décharge des déchets (JOCE, 2003). Les résultats du Tableau 5.11 indiquent qu'à l'exception des teneurs en chlorure, les concentrations des ETM ainsi que les teneurs en sulfates mesurées dans ces granulats artificiels sont inférieures aux valeurs seuils des déchets inertes. Nous pouvons donc conclure que ces granulats artificiels ne présentent pas d'effet néfaste sur l'environnement. Le relargage des ETM ainsi que les teneurs en chlorures et sulfates de ces granulats artificiels sont inférieurs à ceux du sédiment brut (SD). Ce constat pourrait être attribué à la différence de la surface de contact solide/liquide de ces matériaux.

La comparaison des concentrations en contenu total et celles relatives à l'éluat montre que les granulats artificiels des formulations FG1, FG2 et FG3 ne relarguent pas la totalité de ses polluants. Le relargage des ETM de ces granulats est pratiquement faible par rapport au contenu total.

Essais sur lixiviats					
Paramètres	FG1	FG2	FG3	SD	déchet inerte
As	0,12	0,09	0,06	0,32	0,50
Ba	9,82	6,44	4,96	0,24	20,00
Cd	0,02	0,03	0,02	0,01	0,04
Cr	0,14	0,14	0,07	0,17	0,50
Cu	0,47	0,41	0,33	0,56	2,00
Mo	0,06	0,06	0,06	0,13	0,50
Ni	0,15	0,10	0,05	0,19	0,40
PB	0,22	0,19	0,16	0,31	0,50
Sb	0,01	0,01	0,01	0,01	0,06
Se	0,01	0,01	0,01	0,01	0,10
Zn	0,04	0,01	0,01	0,12	4,00
Chlorures	12156	10642	927	17429	800
Sulfates	687	543	490	1561	1000
Fraction soluble	1840	1668	1594	2796	4000

Tableau 5.11 : Teneur en polluants du sédiment brut et des granulats artificiels relatif aux éluats

5.2.5.8 Conclusion

Nous avons montré que la vitesse de rotation de l'assiette granulatrice ne constitue pas un paramètre clé de la granulation humide par assiette granulatrice bien que le domaine de variation de la vitesse est très réduit. Le temps de granulation, le débit d'alimentation et le rapport liquide/solide sont des paramètres contrôlant la granulation humide par assiette granulatrice au système d'alimentation à la goutte à goutte.

Pour optimiser la granulation humide par assiette granulatrice, il est nécessaire de travailler avec un débit d'alimentation faible correspondant à un temps de granulation nécessaire à une meilleure dispersion du liant au sien du mélange granulaire.

L'étude des caractéristiques physico-mécaniques des granulats artificiels formulés montre que les performances de ces matériaux dépendent du dosage en ciment. Cette présente étude révèle une légèreté des granulats artificiels par rapport aux granulats naturels, en plus d'une capacité d'absorption d'eau et une porosité élevées. Ces matériaux sont peu dégradables lorsqu'ils sont soumis aux cycles d'immersion/séchage.

L'évaluation environnementale a été réalisée en vue de valider le scénario de valorisation des sédiments dans les granulats artificiels. Cette évaluation permet de déterminer le relargage des éléments traces métalliques contenus dans ces granulats et d'évaluer leurs impacts sur l'environnement. Les résultats obtenus montrent que le relargage des ETM est inférieur aux valeurs seuils définis par la réglementation GEODE et la législation de stockage des déchets. Ces granulats artificiels ne présentent donc pas d'effets néfastes sur l'environnement.

L'utilisation de ces granulats pour le remplissage de plages permet d'obtenir une structure poreuse favorisant le phénomène de drainage conduisant ainsi à la dissipation de l'énergie des vagues. Cette technique de rechargement constitue le moyen le plus immédiat et le moins agressif vis-à-vis de l'environnement.

5.3 Partie II : Fabrication de granulats selon la technique en Big-bag

Le but de cette partie expérimentale est de réaliser et de tester différentes formulations de granulats pouvant aider les industriels à valoriser à grande échelle les sédiments de dragage du Grand Port Maritime de Dunkerque (GPMD) et de répondre à une difficulté majeure de trouver des matériaux de remplissage de plage dans le domaine terrestre.

Un cahier de charge a été établi à partir d'un état de l'art concernant l'application de granulats artificiels en Génie Côtier. Les critères à respecter sont résumés dans le Tableau 5.12.

Caractéristiques	Critères
Masse volumique apparente (NF EN 1097-6)	Entre 1,2 g/cm ³ et 1,6 g/cm ³
Granulométrie (NF X 11-501)	Différentes tailles de granulats pour assurer une bonne cohérence de la digue
Porosité libre (NF EN 18-459)	Entre 45 % et 50 %
Absorption (NF EN 1097-6)	Entre 40 % et 55 %
Etagement (NF EN 12350-5)	Entre 4 et 6 cm correspondant à un affaissement compris entre 10 et 15 cm
Résistance en compression (NF EN 12390-3)	Supérieure à 5 MPa
Coefficient Los Angeles (NF EN 1097-2)	Inférieur à 45
Coefficient Micro-Deval (NF EN 1097-1)	Inférieur à 45
Dégradabilité (NF P94-067)	Inférieur à 5
Fragmentabilité (NF P94-066)	Inférieur à 7

Tableau 5.12 : Cahier des charges de granulats artificiels en Génie Côtier

5.3.1 Protocole de fabrication

Notre protocole expérimental s'appuie sur une reproduction à l'échelle du laboratoire de la technique de fabrication de granulats en Big-bag utilisée à l'échelle industrielle. Pour cela nous avons coulé les différentes formulations choisies dans des moules en polystyrène de 4*4*16 cm et dans des cubes 15*15*15 cm (Figure 5.13).

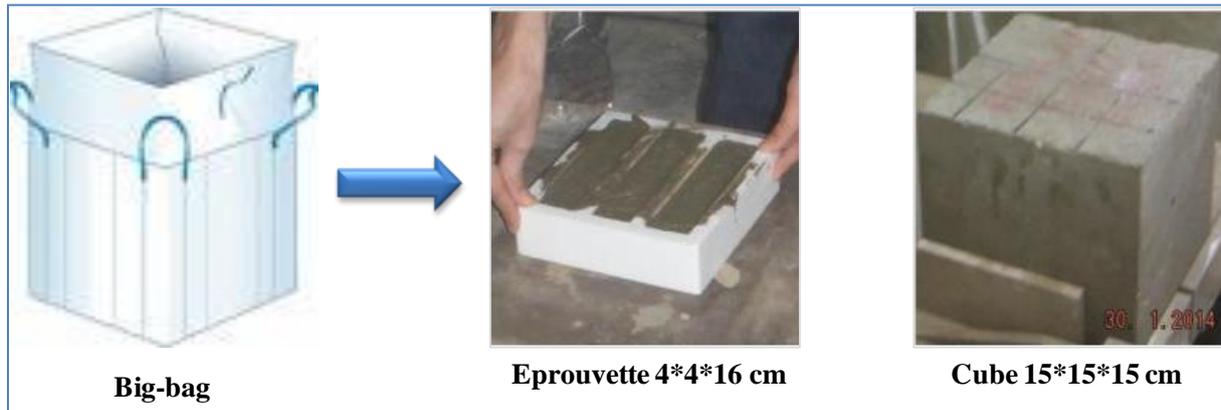


Figure 5.13 : Illustration de la méthodologie industrielle utilisée à l'échelle laboratoire

Nous avons également souhaité intégrer l'effet d'échelle et produire des granulats de différentes tailles parce que le phénomène de réarrangement granulaire durant lequel les granulats de petites tailles s'insèrent dans les granulats de plus grande taille permet d'accroître la cohérence et la stabilité de la structure des plages (Brakni, 2008).

Les étapes du protocole de fabrication :

- Pesée des différents constituants de la pâte : ciment, sédiments, sable et eau ;
- Mélange des sédiments marins, du sable de dragage et d'une partie de l'eau dans un malaxeur d'une capacité de 5 kg ;
- Ajout du ciment et du reste d'eau dans le malaxeur ;
- Test sur la table à chocs (normalisée à 10 coups) ;
- Coulage dans un moule en polystyrène avec utilisation de la table vibrante pour enlever les bulles d'air ;
- Mise à l'étuve à 20°C pendant 24 h ;
- Démoulage ;
- Mise en eau pour 7 ou 28 jours.

Ce protocole de formulation était suivi de la pesée des éprouvettes réalisées, de leur découpe et de la réalisation des tests.

5.3.2 Caractéristiques des matières premières

Les matières premières qui ont été utilisées dans l'ensemble des formulations sont reportées dans le Tableau 5.13. Lors des formulations, les sédiments sont utilisés à leur état humide.

Matières premières	Caractéristiques	
Ciment Portland CEM I 52,5 N-SR3, résistant au sulfate, pour travaux de mer, à teneur en sulfure limité pour béton précontraint	Masse volumique	3,15 g/cm ³
	Résistance à 7 jours	49 MPa
	Résistance à 28 jours	63 MPa
Sédiments de dragage portuaire, dragués au Grand Port Maritime de Dunkerque Nous avons utilisé 5 bacs de sédiments de teneur en eau différentes notées de 0 à 4	Masse volumique	2,56 g/cm ³
	Teneur en eau 0	20,0 %
	Teneur en eau 1	15,4 %
	Teneur en eau 2	25,9 %
	Teneur en eau 3	23,6 %
Sable de dragage issu du Grand Port Maritime de Dunkerque	Teneur en eau 4	24,4 %
	Teneur en eau	3,5 %

Tableau 5.13 : Présentation des matières premières utilisées

5.3.3 Etude de formulations pour tester la faisabilité de granulats

Pour commencer, nous avons testé une large gamme de formulations en réalisant 19 mélanges différents, coulés dans des éprouvettes 4*4*16 cm. Nous avons donc obtenu lors de cette première phase 3x19 éprouvettes. L'objectif était de vérifier la viabilité et la faisabilité de notre protocole et des granulats issus de ce protocole.

Nous avons fixé des contraintes sur les valeurs clés caractéristiques d'une pâte à base de sédiments :

➤ **Masse volumique apparente et porosité au mercure**

La dynamique sédimentaire usuelle des plages est constituée d'un engraissement en temps calme (profil été) et d'une érosion en temps de tempête (profil hiver).

Les travaux de thèse de Brakni (2008) sur le canal à houle ont montré qu'un profil de plage constitué de granulats artificiels légers et d'une porosité comprise entre 45 % et 55 %

permettait un engraissement sous le régime des houles de tempêtes n'induisant pas un phénomène d'érosion.

Nous nous sommes donc fixés comme objectif de produire des granulats légers de masse volumique inférieure à 2 g/cm^3 et d'une porosité adéquate.

➤ **Rapport sédiments sur ciment (S/C)**

Cette première série de formulations, avec une valeur du rapport S/C de 4 en masse sèche, contenait 25 % de ciment par rapport à la masse sèche de sédiment dans le mélange.

Deux contraintes s'exercent sur cette valeur :

- La première est économique : le ciment est l'élément principal du prix du granulat artificiel léger que nous souhaitons obtenir ;
- La seconde est pratique : le granulat obtenu doit avoir des propriétés mécaniques suffisantes pour être utilisé en Génie Côtier.

Nous avons donc dans un premier temps fixé un rapport S/C de 4 afin de trouver un équilibre entre ces deux contraintes.

➤ **Rapport Eau sur Ciment (E/C)**

Ce rapport est aussi une caractéristique essentielle du granulat car il détermine sa résistance mécanique et sa structure poreuse.

Les travaux de thèse de Brakni (2008) et les valeurs trouvées dans la littérature ont montré que des valeurs du rapport E/C inférieures à 1 conduisaient à des dosages en ciment trop importants, tandis que des E/C supérieures à 3 entraînaient des granulats trop fragiles avec une mauvaise cohésion.

Nous avons donc travaillé sur une plage du rapport E/C allant de 2,27 à 2,88. Pour déterminer la quantité d'eau à ajouter dans le mélange, nous avons visé des comportements de pâte allant d'un affaissement nul au test de la table à chocs à une pâte à caractère auto-plaçant.

➤ **Quantité de sable ajouté**

Le sable de dragage permet d'apporter une amélioration de la compacité du mélange permettant ainsi d'améliorer les caractéristiques physiques des granulats obtenus. Nous avons donc choisi d'ajouter une masse de sable dans certaines formulations à hauteur de 0, 15, 30 et 45 % de la masse de sédiments. Evidemment, l'objectif étant de valoriser les sédiments de

dragage, la masse sèche de sable devait rester inférieure à 50 % de la masse sèche de sédiments.

Conformément aux valeurs seuils reportées dans le Tableau 5.14, nous avons réalisé 19 formulations dont 7 sans sable et 12 avec des pourcentages de sable différents.

Caractéristiques	Contraintes
ρ	$< 2 \text{ g/cm}^3$
Porosité	45 % < > 50 %
S/C	≈ 4
E/C	2 < > 3
% Sable	< 50 %

Tableau 5.14 : Valeur seuils retenus pour l'étude des formulations

5.3.3.1 Formulation avec et sans ajout de sable de dragage

Le Tableau 5.15 présente les pourcentages de matières premières des formulations sans ajout de sable de dragage ainsi que les mesures de l'étalement des mélanges et leurs masses volumiques apparentes à l'état humide. Le Tableau 5.16 présente ceux des formulations avec le sable de dragage.

Nom	Msed (%)	Mc (%)	E (%)	E/C	C/S (%)	$\rho_{\text{humide}} (\text{g/cm}^3)$	Etalement (cm)
S80C20-2,37	80	20	47	2,37	25	1,75	9,5
S80C20-2,42	80	20	48	2,42	25	1,73	10,0
S80C20-2,86	80	20	57	2,86	25	1,66	14,0
S80C20-2,88	80	20	58	2,88	25	1,65	17,0
S80C20-2,37	80	20	47	2,37	25	1,75	13,0
S80C20-2,60	80	20	52	2,60	25	1,75	15,0
S80C20-2,86	80	20	57	2,86	25	1,70	17,0

Tableau 5.15 : Récapitulatif des formulations sans ajout de sable de dragage

Nom	Msed (%)	Mc (%)	Msab (%)	E (%)	E/C	C/S (%)	phumide (g/cm ³)	Etalement (cm)
S68C17-2,34	68	17	15	39	2,34	25	1,80	12,0
S68C17-2,35	68	17	13	40	2,35	25	1,79	12,0
S68C17-2,77	68	17	13	47	2,77	25	1,76	15,0
S68C17-2,81	68	17	13	48	2,81	25	1,70	16,5
S57C14-2,27	57	14	26	31	2,27	25	1,86	9,5
S57C14-2,28	57	14	26	31	2,28	25	1,88	9,7
S57C14-2,85	57	14	26	39	2,85	25	1,79	14,0
S57C14-2,74	57	14	26	38	2,74	25	1,83	14,0
S45C11-2,31	45	11	41	24	2,31	25	1,93	8,0
S45C11-2,61	45	11	41	28	2,61	25	1,90	11,5
S45C11-2,6	45	11	41	27	2,60	25	1,86	10,5
S45C11-2,61	45	11	41	28	2,61	25	1,91	11,5

Tableau 5.16 : Récapitulatif des formulations avec l'ajout de sable de dragage

Nous pouvons donc constater que les contraintes des caractéristiques des granulats sont respectées pour l'ensemble des formulations.

5.3.3.2 Comportement mécanique des formulations

Après démoulage des éprouvettes des 19 formulations et leurs mises en eau pendant 28 jours à 20 °C, nous avons mesuré leurs résistances en flexion et à la compression ainsi que leurs porosités afin de déterminer les performances des granulats obtenus. Les résultats de ces essais sont reportés dans le tableau 5.17. L'analyse des résultats montre que l'augmentation du rapport E/C est suivie d'une augmentation de la porosité et une diminution des résistances mécaniques en flexion et à la compression.

La fiabilité de ces résultats repose notamment sur le nombre important d'essais réalisés pour chaque formulation : une moyenne de cinq tests en compression et trois en flexion.

Nom	Flexion MPa	Compression MPa	Ecart-type en compression	Porosité %
S80C20-2,37	1,89	5,56	0,20	43
S80C20-2,42	1,77	5,44	0,19	44
S80C20-2,86	1,16	3,20	0,20	42
S80C20-2,88	0,90	1,98	0,14	43
S80C20-2,37	1,90	5,05	0,14	43
S80C20-2,60	1,22	3,00	0,09	46
S80C20-2,86	0,90	2,39	0,10	49
S68C17-2,34	1,91	5,60	0,15	44
S68C17-2,35	1,29	3,50	0,16	42
S68C17-2,77	1,13	2,93	0,13	45
S68C17-2,81	0,69	2,38	0,01	46
S57C14-2,27	1,33	5,98	0,12	37
S57C14-2,28	1,64	4,15	0,24	37
S57C14-2,85	1,20	3,13	0,08	42
S57C14-2,74	1,12	2,16	0,08	41
S45C11-2,31	1,78	5,95	0,34	32
S45C11-2,61	1,29	3,54	0,24	36
S45C11-2,6	1,46	4,00	0,12	36
S45C11-2,61	1,22	3,33	0,15	36

Tableau 5.17 : Récapitulatif des résistances mécaniques et la porosité des formulations étudiées

Cette première série de tests a permis de prouver la compatibilité de notre protocole expérimental avec nos objectifs initiaux et la bonne tenue des granulats obtenus. Nous avons également mis en évidence qu'à 28 jours deux formulations contenant un dosage important de sédiment donnaient des résultats intéressants (Tableau 5.18) :

Type de formulation	Résistance en flexion MPa	Résistance en compression MPa	ρ humide g/cm ³	Porosité %
Sans sable S80C20-2,37	1,89	5,56	1,75	43
Avec sable S68C17-2,34	1,91	5,60	1,80	44

Tableau 5.18 : Formulations retenues de l'étude

5.3.4 Optimisation des premières formulations

5.3.4.1 Etablir les formulations

Afin d'optimiser les formulations étudiées, trois objectifs principaux sont définis : premièrement, réduire la quantité de ciment utilisé afin de confirmer la viabilité économique des granulats, deuxièmement, obtenir une pâte auto-plaçante en fixant une valeur d'étalement sur la table à choc comprise entre 4 et 5,5 cm et enfin, réaliser des tests pertinents permettant de valider la faisabilité des formulations réalisées.

Pour ce faire, une première série de formulations contenait 25 % de ciment, une deuxième série 12,5 %. Chacune de ces séries étaient déclinées en quatre formulations différentes contenant respectivement 0 %, 15 %, 30 % et 45 % de sable de dragage.

Il est important de noter que le pourcentage de ciment a été calculé par rapport à la totalité du squelette granulaire (masse sèche de sédiments + masse sèche de sable) tandis que le pourcentage de sable a été déterminé uniquement par rapport à la masse sèche de sédiments.

L'objectif était de définir la teneur en ciment et en sable à proposer aux industriels pour la réalisation à grande échelle des granulats. Nous avons bien entendu conservé les contraintes de la phase 1 pour toujours fabriquer des granulats légers avec une teneur en eau adéquate et une porosité pertinente.

Pour cela nous avons fixé par calculs les masses de sable, de ciment et de sédiments dans les différents mélanges et nous avons ajouté l'eau au mélange afin d'obtenir une valeur d'étalement comprise dans l'intervalle choisi. La valeur de rapport E/C n'est plus dans cette partie une valeur prédéterminée, contrairement à la valeur de l'étalement, qui fixe ainsi la quantité d'eau à ajouter au mélange.

Nous avons ainsi obtenu les 8 formulations reportées dans le Tableau 5.19 :

Mc/ (Msab + Msed)	Noms	Msed	Msab	Msab/Ms ed	E/C	Etalement	ρhumide
12,50 %	S88C12,5-4,52	88	0	0	4,52	12,1	1,58
	S74C12,5-5,43	74	14	19	5,43	12,5	1,60
	S68C12,5-5,57	68	21	30	5,57	13,0	1,61
	S64C12,5-4,78	64	26	40	4,78	12,0	1,63
	S80C25-3,25	80	0	0	3,25	12,3	1,56
25 %	S70C25-1,4	70	10	15	1,40	12,0	1,59
	S62C25-2,81	62	18	29	2,81	12,0	1,64
	S55C25-2,09	55	25	45	2,09	12,2	1,68

Tableau 5.19 : Formulations des références choisies

5.3.5 Bilan d'essais réalisés

Nous pouvons aisément constater que, plus la quantité de sable dans les granulats augmente, plus la masse volumique est importante, ce qui est cohérent au regard de la densité du sable par rapport à celle du sédiment de dragage. L'ajout de sable permettait une meilleure tenue et une meilleure résistance du granulat liée à une meilleure granulométrie.

Les travaux de thèse de Brakni (2008) présentait des granulats avec une teneur en ciment de près de 40 %. Les résultats du Tableau 5.20 montrent qu'il serait possible de diminuer cette teneur en ciment à 25 % de la masse sèche du squelette granulaire.

De plus, lorsque les granulats avaient une teneur en ciment de 12,5 %, les résultats de résistance en compression étaient moins concluants. Nous pouvons constater que pour des formulations à 25 % de ciment, la résistance en compression est de 2 à 2,6 fois plus importante que celles à 12,5 % de ciment. Ainsi, la teneur de 12,5 % de ciment semble être une valeur seuil inférieure à ne pas dépasser.

En conclusion, les formulations qui nous semblent les plus pertinentes à mettre en évidence sont S70C25-1,4 et S55C25-2,09 représentant respectivement des granulats légers à 25 % de ciment et 15 ou 45 % de sable à partir de sédiments de teneur en eau de 22 % en moyenne.

Mc/(Msab +Msed)	Noms	phumide g/cm3	psèche g/cm3	Absorption %	Porosité %	Rc 7jrs MPa	Rc28jrs MPa
12,50%	S88C12,5-4,52	1,58	1,22	45	45	0,98	1,42
	S74C12,5-5,43	1,60	1,07	56	46	1,03	1,49
	S68C12,5-5,57	1,61	1,02	56	53	0,82	1,19
	S64C12,5-4,78	1,63	1,23	49	52	1,07	1,55
25%	S80C25-3,25	1,56	1,10	57	54	2,45	3,55
	S70C25-1,4	1,59	1,18	49	53	2,67	3,86
	S62C25-2,81	1,64	1,32	43	48	1,65	2,39
	S55C25-2,09	1,68	1,24	44	49	2,44	3,54

Tableau 5.20 : bilan d'essais réalisés sur les granulats

5.3.6 Conclusion

Cette étude a permis de contribuer à la compréhension de l'enjeu national que représente la valorisation de sédiments de dragage portuaire pour l'élaboration de granulats légers destinés au remplissage des plages.

Les paramètres formulation et procédés ont été optimisés. Les matériaux obtenus sont peu dégradables lorsqu'ils sont soumis à des cycles d'immersion/séchage et ne présentent pas de danger pour l'environnement. Par contre, ils présentent une grande porosité accessible à l'eau et donc une capacité d'absorption d'eau élevée.

Ce type de granulats peut ainsi trouver des applications dans le drainage et permettre la dissipation de l'énergie des vagues. C'est donc une réponse positive aux objectifs et ceci d'autant plus que l'étude environnementale a montré l'absence d'impact négatif sur l'environnement.

En conclusion, il s'agit d'une étude sérieuse qui rentre dans le contexte d'une problématique d'intérêt mondial, répondant aux préoccupations environnementales mais aussi à celles de l'économie circulaire.

Conclusions générales et perspectives

La croissance des besoins en granulats et l'épuisement des ressources naturelles obligent la recherche et l'adoption de solutions alternatives. La validation de ces dernières doit s'inscrire dans le cadre du Développement Durable intégrant la dimension environnementale, technique et économique. Les sédiments ayant le statut de déchets doivent être traités en respect des règles environnementales en vigueur, ils peuvent présenter une solution de substitution intéressante. Leur gestion durable à terre est une problématique de nos jours. Les travaux de recherche présentés dans ce mémoire comportent une étude sur les sédiments du port de Saint-Louis du Rhône dans le sud de la France et les sédiments du Grand Port Maritimes de Dunkerque dans le Nord-Pas-de-Calais. Cette étude avait pour objectif de caractériser ces matériaux en vue d'une utilisation dans des filières de valorisation. La filière de valorisation la plus répandue est celle des matériaux routiers élaborés à base de liants hydrauliques. Un travail expérimental a été mené sur la même base de traitement. La caractérisation physique permet de classer les sédiments du port Saint-Louis en classe B2.

Pour être utilisé en couche de fondation, un sol de classe B₂ doit présenter un IPI à l'optimum Proctor modifié ≥ 35 (GTR, 2000). Néanmoins, les sédiments de PSL à leur état brut ne possèdent pas des performances mécaniques nécessaires à une éventuelle utilisation en couche d'assise de chaussée. Leur valorisation en couche de fondation n'est donc pas possible et nécessite un traitement aux liants hydrauliques et/ou ajout de matériau complémentaire. En fonction de l'évolution du pH et des dosages habituellement utilisés, deux ciments ont été utilisés pour améliorer les résistances de sédiments de PSL. Les traitements de 6 et 8 % de Ciment Cibelcor et Vicat ont un effet positif sur l'Indice Portant Immédiat mais les résistances mécaniques restent tout de même insuffisantes. L'étude de formulation d'un matériau à base de sédiment PSL, pour une utilisation en couche de fondation, a été entreprise en se basant sur une méthodologie fondée sur le critère de compacité optimale. Le sable locale de la carrière Someca a été sélectionné pour optimiser le squelette granulaire. Des mélanges sable someca – sédiment PSL, de compacité maximale et sans traitement au ciment, ont été évalués. La valeur de l'Indice Portant Immédiat obtenus à l'optimum Proctor permet la circulation des engins sur chantier par contre les résultats mécaniques des mélanges sont faibles. Il est donc nécessaire de faire appel au traitement en complément au sable Someca. L'étude du comportement mécanique des formulations proposées, sur la base d'éprouvettes cylindriques de 5x10 cm, a permis d'une part de vérifier la possibilité d'utilisation des

sédiments de PSL en technique routière. Les résultats obtenus ont montré que les différentes formulations proposées présentent des performances mécaniques satisfaisantes au regard des critères requis pour une utilisation en couche d'assise de chaussées. La comparaison des résultats du ciment Portland (Cibelcor (CEM I 42,5)) et du ciment de haut-fourneau (Vicat (CEM III/B 42,5)), montre que ce dernier, plus intéressant sur le plan économique, présente des caractéristiques de compactage et des performances mécaniques plus élevées que le ciment Portland. Il est donc intéressant de tester les formulations retenues avec ce ciment de haut-fourneau.

L'impact environnemental des formulations retenues est vérifié à travers l'essai de lixiviation sur des échantillons en monolithe et des échantillons broyés après 28 jours de maturation. Les résultats obtenus permettent de constater que les concentrations en éléments traces métalliques ainsi que les teneurs en chlorures et sulfates sont inférieures aux valeurs seuils proposées par le guide méthodologique d'acceptabilité de matériaux alternatifs en technique routière. L'utilisation de ces matériaux, dans le domaine routier et plus précisément en couche de fondation, est donc possible.

L'objectif de la partie béton est de caractériser, sur le plan physique et du comportement mécanique, les granulats de Tournai et les sédiments du GPMD et d'incorporer ces derniers dans des formulations de bétons respectant les exigences du cahier des charges pour une utilisation en travaux maritimes. La caractérisation environnementale de sédiments GPMD a permis de vérifier le caractère non-immmergeable de ce matériau. Les études menées avec quatre fractions volumiques de substitution (5, 10, 20 et 40 %) de la fraction sableuse par des sédiments de dragage indiquent une chute de résistance en compression passant de 59 MPa pour le béton témoin à environ 24 MPa pour le béton à 40 % d'incorporation de sédiments. Ces résultats pourraient être expliqués par : l'effet de matières organiques sur l'hydratation de ciment, l'augmentation de la porosité avec l'incorporation de sédiments, l'hétérogénéité des mélanges et le pourcentage d'argile dans chaque béton. Le module d'élasticité a tendance à baisser avec l'augmentation du taux de substitution. Cette tendance pourrait être expliquée par la faible résistance mécanique des sédiments en comparaison à des granulats naturels.

Le choix d'étudier les bétons B0, B10 et B20 est lié à la résistance minimale exigée par le cahier des charges. La résistance à la compression du béton B20 est 10 % plus élevée que la résistance minimale exigée, contre une résistance à la compression de 24 % plus élevée pour le béton B10 et 70 % plus élevée pour le béton B0. Les analyses à l'échelle microscopique montrent d'une part, un accroissement de la porosité totale avec le taux d'incorporation des

sédiments. Cette augmentation est suivie de la diminution du diamètre moyen des pores. Les porosités totales des bétons B0, B10 et B20 sont respectivement de 8,98 %, 10,88 % et de 13,51 %. D'autre part, la substitution d'une partie du sable par le sédiment GPMD n'entraîne pas de variation de phases cristallines principales.

L'étude de durabilité est appréhendée à travers les essais de la porosité accessible à l'eau et de l'attaque sulfatique externe sur trois bétons respectant les exigences visés. Trois protocoles d'attaque sulfatique ont été mise en œuvre dans cette étude : (immersion totale dans une solution à 5 % $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, cycle d'immersion et séchage à 60 °C et enfin cycles d'immersion et séchage à 105 °C). Les résultats du module d'élasticité dynamique en fonction des trois protocoles d'essai ont montré que la résistance à l'attaque sulfatique externe des bétons à base de sédiments est proportionnelle au taux d'incorporation de ce dernier. L'augmentation de taux d'addition de sédiments entraîne l'accroissement de la porosité accessible à l'eau ce qui influence directement la qualité du béton et provoque ainsi la diminution du niveau de performance mécanique.

A travers l'étude de granulation par assiette granulatrice, Nous avons montré que la vitesse de rotation de l'assiette granulatrice ne constitue pas un paramètre clé de la granulation humide par assiette granulatrice bien que le domaine de variation de la vitesse est très réduit. Le temps de granulation, le débit d'alimentation et le rapport liquide/solide sont des paramètres contrôlant la granulation humide par assiette granulatrice au système d'alimentation à la goutte à goutte.

Pour optimiser la granulation humide par assiette granulatrice, il est nécessaire de travailler avec un débit d'alimentation faible correspondant à un temps de granulation nécessaire à une meilleure dispersion du liant au sien du mélange granulaire.

L'étude des caractéristiques physico-mécaniques des granulats artificiels formulés montre que les performances de ces matériaux dépendent du dosage en ciment. Cette présente étude révèle une légèreté des granulats artificiels par rapport aux granulats naturels, en plus d'une capacité d'absorption d'eau et une porosité élevées. Ces matériaux sont peu dégradables lorsqu'ils sont soumis aux cycles d'immersion/séchage.

L'évaluation environnementale a été réalisée en vue de valider le scénario de valorisation de sédiments dans les granulats artificiels. Cette évaluation permet de déterminer le relargage des éléments traces métalliques contenus dans ces granulats et d'évaluer leurs impacts sur l'environnement. Les résultats obtenus montrent que le relargage des ETM est inférieur aux

valeurs seuils définis par la réglementation GEODE et la législation de stockage des déchets. Ces granulats artificiels ne présentent donc pas d'effets néfastes sur l'environnement.

L'utilisation de ces granulats pour le remplissage de plages permet d'obtenir une structure poreuse favorisant le phénomène de drainage conduisant ainsi à la dissipation de l'énergie des vagues.

La première phase expérimentale de la confection des granulats par la méthode de Big-bag a permis de valider le protocole de manipulation ainsi que la bonne tenue de granulats produits. Nous avons aisément remarqué que plus la quantité de sable dans les granulats produits augmente, plus la masse volumique est importante, ce qui est cohérent au regard de la densité du sable par rapport à celle de sédiments de dragage. De plus, lorsque les granulats avaient une teneur en ciment de 12,5 %, les résultats de résistance mécanique sont moins concluants. Nous avons également remarqué que pour la formulation 25 % de ciment, la résistance en compression est 2 à 2,6 fois plus importante que pour les formulations à 12,5. Cela laisse supposer que la teneur de 12,5 % de ciment semble être la valeur seuil inférieur à ne pas dépasser.

A travers cette étude de confection des granulats par la méthode de Big-bag, nous avons montré, notamment grâce à des tests de compression, que l'ajout du sable permettait une meilleure tenue et une meilleure résistance du granulat à base de sédiments de dragage.

Perspectives d'utilisation de sédiments de dragage en technique routière

Après validation à l'échelle de laboratoire de la méthodologie de valorisation de sédiments du port Saint-Louis en couche de fondation, nous envisageons de :

- Réaliser deux planches expérimentales d'essai lysimétrique, une planche-témoin et l'autre à base de sédiment, afin de stimuler le relargage dans le temps des éléments traces métalliques sur une période d'une année ;
- Prélever des échantillons de carottage des planches expérimentales pour le suivi mécanique et géotechnique et proposer des essais de durabilité pour évaluer ces planches ;
- Prélever des eaux de ruissellement et de percolation et réaliser des analyses mensuelles dans le but de faire un suivi de la composition chimique des solutions percolées et ruisselées ;
- Analyser le taux de dissolution de ces éléments en vue de se renseigner sur leur ordre de mobilité dans chaque type de matériau ;

Perspectives d'utilisation de sédiments de dragage en béton :

Les études de comportement mécanique et de durabilité réalisées sur des bétons à base de sédiments de dragage ont montré la faisabilité d'incorporation de ces matériaux à des taux moins élevés. Il est toutefois nécessaire de :

- Continuer les essais d'attaque sulfatique externe sur une durée d'au moins un an pour statuer sur la résistance à l'attaque sulfatique des bétons ;
- Compléter l'étude de durabilité par des essais de gel/dégel et perméabilité à l'eau permettant ainsi de déterminer les propriétés de transports de ces matériaux ;
- Suivre l'évolution volumique des éprouvettes bétons soumis aux cycles gel/dégel et à l'attaque sulfatique externe ;
- Réaliser des planches expérimentales in-situ et faire le suivi dans le temps des caractéristiques mécaniques de ces matériaux afin de les comparer aux études réalisées au laboratoire.

Perspectives d'utilisation de sédiments de dragage en granulats artificiels :

La fabrication de granulats artificiels à base de sédiments du Grand Port Autonome de Dunkerque (GPMD) grâce à des procédés déjà connus : l'assiette granulatrice et la technique du Big-bag. L'application visée était l'élaboration de granulats légers destinés au remplissage des plages. Les résultats obtenus sont prometteurs et doivent être approfondis. Il convient donc de :

- Statuer sur le dosage minimal en ciment à ne pas dépasser pour produire des granulats répondant aux exigences recherchées ;
- Tester l'effet du traitement thermique des granulats légers sur les caractéristiques physico-mécaniques de ces derniers ;
- Réaliser un suivi du comportement de ces granulats légers en canal à houle dans le but d'évaluer le potentiel d'utilisation de ces matériaux en tant que matériaux constitutifs des plages ;
- Tester l'effet de combinaisons Ciment/Chaux, Ciment/Laitiers et Ciment/Cendre volante sur les propriétés physico-mécaniques des granulats.

Références bibliographiques

- A. Mezencevova et al, 2012. Utilization of savannah harbor river sediment as the primary raw material in production of fired brick.. journal of Environmental Management.
- Achour, 2013. Valorisation et caractérisation de la durabilité d'un matériau routier et d'un béton à base de sédiment de dragage. Thèse de doctorat de l'ecole des Mines de Douai.
- Adam, Y. & Buclet, N., 2009. Le traitement des déchets. s.l.:LAVOISIER.
- AGOSTINI, 2006. Inertage et valorisation de sédiments de dragage marins. Thèse de doctorat, Ecole Centrale Lille, France.
- BELAS N., B. O. M. A. B. N., 2011. Valorisation des sédiments de dragage dans les bétons, Séminaire International, Innovation & valorisation en Génie Civil & matériaux de construction, Rabat – Maroc 23-25 Novembre 2011.
- Bonnet, C., 2000. Développement de bio-essais sur sédiments et application, en laboratoire, de la toxicité dulçaquicoles contaminés.*
- Boutouil, Saussaye, 2011. Etude bibliograohique sur la valorisation des sédiments de dragage marins traités aux liant hydrauliques en technique routière.*
- Boutouil, 1998. Traitement des vases de dragage par stabilisation et solidification à base de ciments additifs, thèse doctorat.*
- Boutouil, 1998. Traitement de vases de dragage par solidification stabilisation à base de ciment et additifs. Thèse de doctorat de l'université du Havre. 279p.*
- Bröns-Laot, G., 2002. Evaluation environnementale de la valorisation de mâchefers d'incinération d'ordures ménagères en remplissage de carrière, Lyon: INSA Lyon.*
- Bui Le Anh, T. et al., 2013. Development of lightweight aggregate from sewage sludge and waste glass powder for concrete. Construction and Building Materials, Volume 47, October 2013, Pages 334–339..*
- Cappuyns, V. & Swennen, R., 2008. The application of pHstat leaching tests to assess the pH-dependent release of trace metals from soils, sediments and waste materials. Journal of Hazardous Materials, Volume 158, pp. 185-195.*
- CHANG, W., 1988. A demonstration project: roller compacted concrete utilizing phosphogypsum. Publication no. 01-068-072, Florida Institute for Phosphate Research Bartow, FL.*

- Colin, d., 2003. *Valorisation de sédiments fins de dragage en technique routière. Thèse de doctorat de l'université de Caen-Basse-Normandie, 181 p.*
- DAMIDOT D., A. N. D. V. Z. R. M. F. F., 2006. *Guide technique régional relatif à la méthodologie de gestion des sédiments de dragage portuaire - Plan régional d'élimination des déchets industriels spéciaux ., s.l.: (PREDIS) Nord-Pas-de-Calais. 422 p.*
- Deschamps, T. M. B. B. B. T. B. a. M. M., 2006. *Mécanismes de rétention des métaux lourds en phase solide : cas de la stabilisation des sols contaminés et des déchets industriels.. VertigO – Revue en sciences de l'environnement.*
- DIA, M. et al., 2012. *Environmental behaviour and characterization of treated dredged sediment. Porto .*
- DIA et al., 2012. *Geotechnical and environmental behaviour of treated dredged sediment. India.*
- Diet, J.-N., 1996. *Stabilisation / Solidification des déchets : Perturbation de l'hydratation du ciment de portland par les substances contenues dans les boues d'hydroxydes métalliques., s.l.: Thèse, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon..*
- DOT, 2., 2012. <http://www.dotapea.com/oxydesdefer.htm>. [En ligne] [Accès le 10/06/2012].
- Dubois, 2006. *Caractérisation physico-mécanique et environnementale des sédiments, s.l.: Thèse, Mines Douai, France..*
- Dubois, 2006. *Etude du comportement physico mécanique et caractérisation environnementale des sédiments marins – Valorisation en technique routière. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Douai.*
- GHAZALI, F., BAGHDADI, Z. & KHAN, A., 1991. *Overconsolidated behavior of phosphoric acid and. Transportation research record n°1295, pp. 62-69.*
- GREGORY, C., SAYLAK, D. & LEDBETTER, W., 1984. *The use by-product of phosphogypsum for road bases and subbases. Transportation Research Board, no. 998.*
- GTR, 1992. *Guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme, Fascicule II. s.l.:LCPC.*
- Guevara-Riban A., S. A. R. R. R. G., 2004. *Assessment of mobility in dredged harbour sediments from Barcelona, Spain. Science of the Total Environment, Volume 321, pp. 241-255. Hetterachi, k., 2001.*

- J. Engelsen, C. et al., 2010. Leaching characterisation and geochemical modelling of minor and trace elements released from recycled concrete aggregates. Cement and Concrete Research, Volume 40, pp. 1639-1649.*
- Joce, E., 2003.*
- KRIBI, , 2005. Décomposition des matières organiques et stabilisation des métaux lourds dans les sédiments de dragage.*
- Lafhaj, Z. et al., 2007. Polluted river sediments from the North region of France: Treatment with NOVOSOL process and valorization in clay brick. Construction & building Materials, Volume 22, pp. 755-762.*
- LEVACHER D., C. D. P. A. D. Z. S. L., 2006. Recyclage et valorisation des sédiments fins de dragage à usage de matériaux routiers.. IX Journées Nationales Génie Côtier, Génie Civil, Brest, pp 603-61..*
- LIANG, 2012. Co-valorisation de sédiments et de sols fins par apport de liants et de fibres, Caen : thèse à l'université de Caen/Basse Normandie - U.F.R. : Sciences.*
- LYONS, J. & MACEWAN, G., 1962. Phosphoric acid in soil stabilisation ; Effect on engineering. Highway research record n°318, pp. 4-14.*
- BOUTOUIL al, L. S., 2001. Influence de l'ajout d'un correcteur granulométrique sur les propriétés des sédiments traités aux liants hydrauliques. Revue Paralia, Volume 4 pp 8.1-8.11 © Editions Paralia CFL.*
- Maherzi, 2013. Valorisation des sédiments marins de dragage en technique routière, Thèse de doctorat de l'université de Caen-Basse-Normandie, 196 p.*
- Mezazigh, 2010. Valorisation des sédiments marins contaminés par solidification/ stabilisation à base de liants hydrauliques et de fumée de silice , CAEN: UNIVERSITE de CAEN/BASSE NORMANDIE- U.F.R : SCIENCES CAEN.*
- Miraoui, 2010. Prétraitement et traitement des sédiments de dragage en vue d'une valorisation dans le génie civil. Thèse de doctorat de l'Ecole des mines de Douai. 210p.*
- Miraoui, 2010. Mise en œuvre d'une démarche de prétraitement et de traitement des sédiments de dragage en vue d'une valorisation dans le génie civil., s.l.: Ecole des mines de Douai et l'université de Lille .*
- NGuyen, 2008. Valorisation des sédiments de dragage traités par le procédé Novosol® dans des matériaux d'assise de chaussée-comportement mécanique et environnemental,*
- NURHAYAT, D., ARZU, O. & AYSE, T., 2007. Application of phosphogypsum in soil stabilization. Building and Environment, Volume 42, p. 3393–3398.*

- NZIHOU, A., ADHIKARI, B. & Pfeffer, R., 2005. *Effect of the metal-chlorides on the sintering and densification of hydroxyapatite adsorbents*. 44. *Industrial & Engineering chemistry Research.*, pp. 1787-1794.
- Piantone, P., Bodéan, F. & Lassin, A., 2005. *Projet Novosol®, Evaluation environnementale de sédiments phosphatés et calcinés, Rapport d'avancement BRGM/RC-54355-FR, Rapport DEMOROUTES, Réf. : 03581-410-DE001-*
- Ramaroson, J., 2008. *Calcination des sédiments de de dragage contaminés. Etude des propriétés physico-chimiques.*,.
- Ramaroson, J. et al., 2008. *Calcination of dredged sediment: investigation of the behaviour of heavy metals and the organic compounds. High Temperature Materials and Processes, Volume 27*, pp. 328-336 .
- Rekik, 2007. *Propriétés géotechniques des sédiments de dragage traités au ciment. Thèse de doctorat de l'université de Caen Basse-Normandie*. 122 p..
- Rey, 1999. *Etude physico-mécanique et environnementale du composite vase chaux et additifs. Thèse de doctorat de l'université de Caen Basse-Normandie*. 271P, s.l.: s.n.
- Samara, 2007. *Valorisation des sédiments fluviaux pollués après inertage dans la brique cuite, s.l.: Thèse à L'Ecole Centrale de Lille*.
- Scordia, 2008. *Caractérisation et valorisation de sédiments fluviaux pollués et traités dans les matériaux routiers, Thèse de doctorat de l'école centrale de Lille, 202p. s.l.:s.n.*
- Tran, 2009. *Valorisation de sédiments marins et fluviaux en technique routière, Thèse de doctorat de l'université d'Artois, 225p.*
- TRIBOUT, 2010. *Valorisation de sédiments traités en techniques routières : contribution à la mise en place d'un protocole d'acceptabilité,*
- UEPG, 2013. *Bilan annuel de l'UEPG 2012-2013,*
http://www.uepg.eu/uploads/Modules/Publications/uepg-ar2012-2013_en_inter_v14_pbp_small.pdf, (Consulté le 01/08/2014), s.l.: s.n.
- UNGP, 2012. <http://www.unpg.fr>, *Granulats : les chiffres clés 2012* (Consulté le 05/06/2014), s.l.: s.n.
- UNGP, 2012. <http://www.unpg.fr>, *Granulats : les chiffres clés 2012, Rapport décembre 2013* (Consulté le 09/08/2014), s.l.: s.n.
- UNICEM, 2009. *Carrière de Granulats et Developpement Durable 2011.*

van der Sloot, H. & Kosson, D., 2012. Use of characterisation leaching tests and associated modelling tools in assessing. *Journal of Hazardous Materials*, Volume 207-208, pp. 36-43.

Vandecasteele, B., De Vos, B. & Tack, F., 2002. Heavy metal contents in surface soils along the Upper Scheldt river (Belgium) affected by historical upland disposal of dredged materials.. *The Science of the Total Environment*, Volume 299, pp. 1-14.

Wang, 2011. *Solidification et Valorisation de sédiments de Dunkerque en travaux routiers*, Thèse de doctorat de l'université de Lille, 172p. s.l.:s.n.

Zentar, R., Abriak, N.-E. & Dubois, V., 2008. Effects of salts and organic matter on Atterberg limits of dredged sediments. *Applied clay science*, pp. 391-397.

Zri A., A. N. B. M., 2009. Valorisation des sédiments dans le béton du sable à base de sable de dragage, *1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries*, s.l.: s.n.

Normes utilisés

NF EN 12457-2. Décembre 2002. Caractérisation des déchets. Lixiviation. Essai de conformité pour la lixiviation des déchets fragmentés et des boues. Partie 2 : essai en bûchée unique avec un rapport liquide - solide de 10l/kg et une granularité inférieure à 4mm (sans ou avec réduction de la granularité).

NF EN 13286-43. Septembre 2003. Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 43 : méthode d'essai pour la détermination du module d'élasticité des mélanges traités aux liants hydrauliques (indice de classement : P98-846-43).

NF EN 15169. Mai 2007. Caractérisation des déchets - Détermination de la perte au feu des déchets, des boues et des sédiments.

NF ISO 10390. Mai 2005. Détermination du pH.

NF ISO 13320-1. Septembre 2000. Analyse granulométrique. Méthodes par diffraction laser. Partie 1 : principes généraux.

NF ISO 14869-1. Août 2001. Qualité du sol. Mise en solution pour la détermination des teneurs élémentaires totales. Partie 1 : mise en solution par l'acide fluorhydrique et l'acide perchlorique.

NF P 94-050. Septembre 1995. Détermination de la teneur en eau pondérale de sols. Méthode par étuvage.

NF P 94-051. Mars 1993. Sols : reconnaissance et essais - Détermination des limites d'Atterberg - Limite de liquidité à la coupelle - limite de plasticité au rouleau.

NF P 94-093. Décembre 1993. Détermination des caractéristiques de compactage d'un sol : essai Proctor normal, essai Proctor modifié.

NF P 98-114-3. Avril 2001. Assises de chaussées. Méthodologie d'étude en laboratoire des matériaux traités aux liants hydrauliques. Partie 3 : Sols traités aux liants hydrauliques éventuellement associés à la chaux.

NF X 31-620. Septembre 2003. Qualité du sol. Prestations de services relatives aux sites et sols pollués (études, ingénierie, réhabilitation de sites pollués et travaux de dépollution).

XP CEN/TS 14429. Mai 2006. Caractérisation des déchets. Essais de comportement à la lixiviation. Influence du pH sur la lixiviation avec ajout initial d'acide/base

Publications et Communications

Hassane AZRAR, Nor-Edine ABRIAK, Rachid ZENTAR. Caractérisation physico-chimique et environnementale des sédiments marins dragués au Sud de la France. *Journal of Catalytic Materials and Environment*, Vol XI, pp 29-34, 2014 ;

Hassane AZRAR, Rachid ZENTAR, Nor-Edine ABRIAK, Abdelhafid KASMI. Influence of the rotational speed of a granulating plate on the properties of aggregates made of dredged sediment. 4th International Symposium on Sediment Management (I2SM), Ferrara, Italy September 17-18-19, 2014 ;

Hassane AZRAR, Rachid ZENTAR, Nor-Edine ABRIAK, Abdelhafid KASMI. Etude de la répartition des polluants selon les fractions granulométriques d'un sédiment marin , 32èmes Rencontres de l'AUGC, ORLEANS , 4 au 6 juin 2014 ;

Abdelhafid KASMI, Mahfoud BENZERZOUR, Nor-Edine ABRIAK, **Hassane AZRAR**. Study of the physical and environmental properties of raw sediments and dehydrated by the addition of polymers for use in road construction. 4th International Symposium on Sediment Management (I2SM), Ferrara, Italy September 17-18-19, 2014 ;

Hassane AZRAR, Nor-Edine ABRIAK, Rachid ZENTAR. Caractérisation physico-chimique et environnementale des sédiments marins dragués au Sud de la France, ECGP'11, Villeneuve d'Ascq, France, 26-28 Juin, 2013 ;

Nor-Edine ABRIAK, **Hassane AZRAR**, Rachid ZENTAR, Abdelhafid KASMI, Mahfoud BENZERZOUR. Valorisation de sédiments marins dans des ouvrages de Génie Civil : formulation et suivi physico-mécanique et environnemental, ECGP'10, Fès, Maroc, April 24th, 25th, 2012.

Moussa DIA, **Hassane AZRAR**, Rachid ZENTAR, Nor-Edine ABRIAK, Ange NZIHOU, Guy DELPELSENAIRE, Alain GERMEAU. Effect of phosphatation and calcination on the mechanical behavior of one marine sediment. *Construction & Building Materials*. (Article Soumis)

Hassane AZRAR, Nor-Edine ABRIAK, Rachid ZENTAR. Valorisation de sédiments marins de dragage: Application en technique routière & béton, Poster, 5^{ème} Journée des doctorants, EDSPI, Lille, 26 juin 2012, Ecole des Mines de Douai

Hassane AZRAR, Nor-Edine ABRIAK, Rachid ZENTAR. Valorisation de sédiments marins de dragage en Génie Civil: cas d'un sédiment de Sud de la France. Présentation, 6^{ème} Journée des doctorants, EDSPI, Lille, 28 juin 2013, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis.

Contribution à la valorisation des sédiments de dragage portuaire : technique routière, béton et granulats artificiels

Résumé

Face à la problématique de gestion des sédiments de dragage portuaire, aujourd'hui, il apparaît nécessaire de trouver des solutions potentielles de valorisation permettant de répondre efficacement à cette dernière. Afin d'optimiser la gestion de ces matériaux, il est nécessaire de déterminer leurs caractéristiques en relation avec le domaine de valorisation envisagé.

Après caractérisation physico-chimique, minéralogique et mécanique, l'impact environnemental des sédiments bruts du PSL et le potentiel d'utilisation de ces matériaux en technique routière sont évalués. Afin d'améliorer les caractéristiques mécaniques des sédiments bruts, en regard des contraintes imposées pour leurs utilisations en couche de fondation, le sable de la carrière Someca a été utilisé pour optimiser la composition granulaire du matériau.

L'étude de formulation des matériaux, pour une utilisation en couche de fondation, s'est fondée sur une méthode expérimentale de détermination de compacité maximale. Les mélanges granulaires optimaux composés de sédiments du PSL et de sable de la carrière Someca sont ensuite traités aux ciments Cibelcor et Vicat en vue d'améliorer leurs performances mécaniques. Les mélanges remplissant les conditions d'utilisation en couche de fondation sur le plan du comportement mécanique sont ensuite évalués au travers d'essais de lixiviation.

La partie qui traite les formulations des bétons s'intéresse à la valorisation des sédiments du GPMD dans des mélanges hydrauliques. A travers la phase de caractérisation de ces bétons à base de sédiments, plusieurs protocoles d'essais ont été mis en œuvre en vue de mettre en évidence la qualité de ces matériaux. Trois bétons répondant aux exigences du cahier des charges ont fait l'objet d'une étude de durabilité face à l'attaque sulfatique externe, associée à une caractérisation non destructive en vue d'étudier l'influence d'incorporation de sédiments sur les propriétés des bétons.

La partie qui traite des granulats artificiels rentre dans le cadre d'une problématique de protection contre l'érosion du littoral de la région Nord de France. L'assiette granulatrice et la technique de fabrication de granulats en Big-bag sont deux méthodologies utilisées pour la confection de granulats à base de sédiments du GPMD. Les propriétés physiques déterminées permettent d'évaluer le potentiel de valorisation de ces matériaux et de mieux orienter les futures études.

Mots-clés : sédiments de dragage portuaire, couche de fondation, valorisation, performances mécaniques, impact environnemental, lixiviation, béton, caractérisation non destructive, attaques sulfatiques externes, granulats artificiels, assiette granulatrice, technique de fabrication de granulats en Big-bag.

Abstract

Due to the problem of management of harbour dredging sediments, it appears necessary to find potential solutions of valorization making it possible to answer the latter effectively. In order to optimize the management of these materials, it is necessary to determine their characteristics related to the envisaged domain of valorisation.

After physico-chemical characterisation, mineralogical and mechanical, the environmental impact of the raw sediments of the PSL and the potential for use of these materials in experimental road construction are evaluated. In order to improve the mechanical Characteristics of raw sediments, in view of the imposed constraints for their uses in layer foundation, the sand of the Someca career has been used to optimize the granular composition of the material.

The study of materials formulation, for a use in foundation layer, is based on an experimental method of determination of maximum compactness. The optimal granular mixtures composed of sediments of the PSL and the sand of Someca career are then treated with cements Cibelcor and Vicat in order to improve their mechanical performances. The Mixtures fulfilling the conditions of use in a foundation layer in terms of mechanical behavior are then evaluated through leaching tests.

The part which treats the formulations of the concretes is focused on the valorisation of the sediments of the GPMD in hydraulic mixtures. In the phase of characterisation of these concretes containing sediments, several protocols of tests have been implemented in order to highlight the quality of these materials. Three concretes fulfilling the requirements of the specifications were discussed for the study of durability in face of external sulphate attack, combined with a non-destructive characterisation in order to study the influence of incorporation of sediment on the properties of concretes.

The section of artificial aggregates returns within the framework of a problematic of protection against the erosion of the littoral of the Northern region of France. The granulating plate and the manufacturing technique of aggregates in Big-bag are two methodologies used for the preparation of aggregates containing sediments of the GPMD. The physical properties determined are used to estimate the potential of valorisation of these materials and to better guide the future studies.

Keywords: Harbour Dredging Sediments, foundation layer, valorization, mechanical performance, environmental impact, Leaching, concrete, non-destructive characterization, external sulfatique attack, artificial aggregates, granulating plate, manufacturing technique of aggregates in Big-bag.