

N° d'ordre : 41223



THESE EN COTUTELLE

Présentée en vue
d'obtenir le grade de

PHILOSOPHIÆ DOCTOR (PH. D.)

DOCTORAT

LA FACULTE DE GENIE DE
L'UNIVERSITE DE SHERBOOKE

L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET
TECHNOLOGIE DE LILLE

En
Spécialité : Génie civil

Par
Raouf ACHOUR

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

Valorisation et caractérisation de la durabilité d'un matériau routier et d'un béton à base de sédiments de dragage

Soutenance le 11 Décembre 2013 devant le jury d'examen :

Président	Denis DAMIDOT , Professeur, Mines de Douai
Rapporteur	Sofiane AMZIANE , Professeur, Polytech Clermont-Ferrand
Rapporteur	Fabienne BARAUD , HDR, Université de Caen
Membre	Jean-Pierre GOURC , Professeur, Université Joseph Fourier
Membre	Richard GAGNE , Professeur, Université de Sherbrooke
Membre	Emmanuel GARBOLINO , HDR, Mines ParisTech
Directeur de thèse n°1	Nor-Edine ABRIAK , Professeur, Mines de Douai
Directeur de thèse n°2	Patrice RIVARD , Professeur, Université de Sherbrooke
Invité	Rachid ZENTAR , Professeur, Mines de Douai
Invité	Pascal GREGOIRE , Docteur, Port de Dunkerque

Laboratoires d'accueil : Département Génie civil et environnemental de Mines Douai et laboratoire GRAI
au département de génie civil de l'université de Sherbrooke(UdeS)

Ecole Doctorale SPI 072 Lille I



Financé avec l'aide du FEDER
Fonds Européen de
Développement Régional

Remerciements

Au moment d'exprimer ma reconnaissance envers les personnes qui ont, de près ou de loin, contribué à la réalisation de ce travail, je souhaite en premier lieu adresser mes remerciements les plus sincères à mon directeur de thèse, le Professeur Nor-Edine ABRIAK. Je tiens à vous exprimer toute ma gratitude pour m'avoir fait confiance et m'avoir encadré pendant ces trois années et pour les conseils toujours pertinents et enrichissants. Je tiens également à remercier mon co-directeur de thèse, le Professeur Patrice RIVARD qui m'a accueilli chaleureusement au sein de son équipe de recherche au laboratoire GRAI de l'université de Sherbrooke, de m'avoir suivi tout au long de ce travail et qui m'a fait profiter de ses connaissances et m'accorder sa confiance.

Je remercie sincèrement le Professeur Rachid ZENTAR pour son encadrement, ses conseils, son soutien et ses encouragements toujours précieux. Dès le début de ma thèse, il a tenu à m'encadrer de manière très rapprochée et a toujours veillé à ce que tout soit mis en œuvre pour que ma thèse se déroule dans des bonnes conditions. Les longues heures à discuter ont porté leurs fruits.

Je remercie le Professeur Denis DAMIDOT, chef de département Génie Civil et Environnemental de Mines de Douai, pour m'avoir accueilli dans son laboratoire et de m'avoir fait honneur de présider le jury de thèse.

Je remercie les Professeurs Sofiane AMIZIANE et Fabienne BARAUD de m'avoir fait l'honneur d'être les rapporteurs de ma thèse, pour le temps consacré à la lecture de ce mémoire et pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail.

Merci également aux Professeurs Richard Gagné et Jean-Pierre Gourc et au Monsieur Emmanuel GARBOLINO d'avoir accepté d'être les membres de mon jury afin d'évaluer ce travail et de m'apporter leur expertise. Je tiens aussi à exprimer ma gratitude envers Monsieur Pascal GREGOIRE, qui a été la voix du Grand Port Maritime de Dunkerque pour l'excellente collaboration au niveau de valorisation des sédiments marins.

Un grand merci à toute l'équipe du département Génie Civil et Environnemental de Mines de Douai et à toute l'équipe du laboratoire GRAI de l'université de Sherbrooke, Professeurs, Enseignant-chercheur, Thésards, techniciens et secrétariats pour m'avoir aidé, épaulé, écouté et conseillé tout au long de ces années. Merci tout particulier à Mahfoud, Patrick et Frédéric pour leurs conseils, leurs disponibilités et leurs encouragements. Merci à Carole et Jacqueline pour leur assistance administrative, Merci à Johanna et Dominique pour les analyses chimiques, à Christophe, Guillaume, Mickael et Danick pour leurs aides sur les différents essais.

L'écriture de cette thèse n'aurait pas été possible sans le soutien de mes collègues. Merci à mes co-bureaux Issam-Eddine, Moussa, Thomas et Maxime et aux autres doctorants Abdel Hafid, Hassen, Zeng feng, Kai, Coralie et aux post-docs Raid, Nassim, Thomas et Walid pour nos discussions sur nos sujets de thèse.

Je remercie bien évidemment mes parents Abdeljlil et Rabha pour avoir autant contribué à ce que je suis et leur soutien permanent, malgré la distance, tout le long de mes études. Si j'y suis parvenu c'est avec l'aide de mes parents. Un GRAND Merci à mon frère Yassine et ma sœur Yosr pour leurs soutiens et leurs encouragements. Je sais que vous êtes fiers de moi et je ferai en sorte que vous le soyez toujours.

Je tiens à remercier chaleureusement ma future épouse Khawla, qui, à sa manière, m'a énormément aidé, je lui exprime mon admiration tant son courage et sa patience n'ont d'égale que son soutien indéfectible. Merci pour ton enthousiasme, ta patience et tes encouragements.

Un merci particulier et chaleureux à mes beaux-parents Nor-eddine et Samira, à la famille Khessouma Gamra, Yasser, Yassine, Hanane, Jihene, Soumaya et leur petite Selma ainsi qu'à mon oncle et mes tentes en Tunisie.

Un merci à mes amis : Wissem, Chiraz, Yakine, Beligh, Sameh, Darine, Bouzid, Farah, Achref, Hassen, Akrem, Samir, Fabien..., pour les bons moments passés à Lille, Paris et à Montréal.

Mes remerciements s'adresseront enfin au Fond Européen de Développement Régional (FEDER), Mines de Douai et ARMINES pour le soutien financier.

Résumé

La valorisation des sédiments marins non-immérgeable du Grand Port Maritime de Dunkerque comme un nouveau granulat présente une solution alternative dans le domaine de génie civil pour une meilleure gestion. Les travaux de cette thèse se focalisent sur l'étude de valorisation de sédiment marin en technique routière (étude en laboratoire et in situ) et l'étude de durabilité de blocs béton à base de sédiment marins destinés à la protection des ouvrages portuaires.

La première partie de la thèse fait l'objet de la valorisation des sédiments marins en technique routière. Cette partie est divisée en trois étapes :

La première étape a été consacrée à une caractérisation physique, minéralogique et mécanique des sédiments dragués du GPMD afin de mieux connaître le comportement général des sédiments. La deuxième étape présente la méthodologie de valorisation des sédiments par la mise au point d'une formulation en laboratoire. Une étude du comportement mécanique et environnementale a été réalisée afin d'évaluer la durabilité du matériau. La dernière étape concerne la réalisation d'un ouvrage routier à l'échelle 1 à base de sédiment à Dunkerque. La phase de suivi in situ de l'aspect mécanique et environnemental de l'ouvrage est également traitée.

La deuxième partie de la thèse fait l'objet d'une étude de durabilité de deux blocs en béton à base de sédiment marin. Cette partie est divisée en trois étapes.

La première étape est consacrée à une caractérisation non destructive et destructive des deux bétons contenant 12,5% et 20% de sédiment associé à une caractérisation microstructurale. La seconde concerne l'étude de durabilité de ces bétons face à l'attaque sulfatique externe ; soumission aux cycles gel/dégel et à la réaction alcali-granulats afin d'évaluer l'effet de l'incorporation des sédiments dans les bétons et le comportement de ces derniers. Enfin, la troisième étape traite du volet impact environnemental par des essais de lixiviation sur les deux types de bétons. L'étude de durabilité des bétons à base de sédiment présentée dans cette partie peut servir de base à des futurs travaux visant à mieux comprendre l'impact d'incorporation de sédiment dans le béton (taux d'incorporation, porosité...) sur la résistance mécanique, ainsi que sur les mécanismes de dégradation.

Ce travail a été réalisé en collaboration entre Mines de Douai et l'Université de Sherbrooke (Canada) avec le soutien Grand Port Maritime de Dunkerque et de la Région.

Mots-clés : Sédiments marins, valorisation, technique routière, performance mécanique, évaluation environnementale, durabilité du béton à base de sédiment, contrôles destructifs et non destructifs.

Abstract

The valorization of non-submersible marine sediments of the Grand Port Maritime de Dunkerque **GPMD** as a new aggregate presents alternative solutions in the field of civil engineering for a better management. The work of this thesis focus on the valorization study of marine sediment in road engineering (laboratory and in situ) and the study of the durability of concrete blocks made with marine sediment for the protection of harbour structures.

The first part of valorization non-submersible sediments in road engineering is divided into three steps:

The first step was devoted to the physical, mechanical and mineralogical characteristics of these materials, as well as their chemical composition and environmental effects, in an attempt to characterize their behavior and their potential as material in road engineering. The second step presents an experimental methodology for the development of a road foundation made from dredged fine sediment, dredged sand, lime and hydraulic binder. The last step describes the construction of an experimental road and analyses the mechanical properties of cores drilled from the road and the results of deflection tests. An environmental assessment, based on leaching tests, was also performed.

The second part of the thesis focuses on a durability study of two concrete blocks with two different percentages of sediment. This part is divided into three steps:

In the first step, mechanical, physical and chemical characteristics of two types of concrete containing 12,5% and 20% of dredged marine sediments are presented and discussed. In the second step, we have examined the durability of these types of concrete with regards to alkali-aggregate reaction, sulphate attack and freezing and thawing cycles. The results of this study will serve in order to better understand the impact of the incorporation of sediments into the concrete (percentage of incorporation, porosity...) and the effect on the mechanical resistance and the degradation mechanisms.

This study is the framework of collaborative research work between Mines de Douai and the University of Sherbrooke (Canada) with the support GPMD and the Region.

Keywords: Dredged sediments, Valorisation, environmental assessment, experimental road construction, mechanical performance, durability of concrete made from marine sediment, destructive and non-destructive testing.

Table des matières

1. Mise en contexte.....	11
2. Objectifs.....	13
2.1. Valorisation du sédiment marin en technique routière	13
2.2. Etude de durabilité des blocs béton à base de sédiment marin.....	13
3. Organisation de la thèse	14

1^{ère} Partie : Synthèse Bibliographique

1. Les sédiments marins	19
1.1. Définition.....	19
1.2. Origine	19
1.3. Composition des sédiments	20
1.3.1. Eau.....	20
1.3.2 .Phase organique.....	20
1.3.2.1. Définition.....	20
1.3.2.2. Influence des matières organiques sur le sol	21
1.3.3. Phase inorganique ou minérale.....	22
1.3.3.1. Classement granulométrique des sédiments	23
1.3.3.2. Les argiles dans le sédiment	23
2. Les polluants dans les sédiments.....	24
2.1. Les polluants organiques	25
2.2. Les éléments traces métalliques	25
3. Dragages et échantillonnage.....	25
3.1. Problématique de la gestion portuaire des dragages.....	25
3.2. Méthodes d'échantillonnage et de conservation.....	27
3.2.1. Méthode d'échantillonnage	27
3.2.2. Conditionnement et conservation des échantillons de sédiments.....	28
4. Aspect règlementaire de gestion des sédiments et approche éco toxicologique.....	29
4.1. Les aspects règlementaires	29
4.2. Approche éco toxicologique et développement des bio-tests.....	34
5. Réglementation des sédiments vis-à-vis de l'application en technique routière - Caractérisation environnementale.....	35
5.1. Introduction	35
5.2. Étude méthodologique d'évaluation environnementale	36
6. Recherche développée en valorisation du sédiment marin en génie civil	39

6.1. Valorisation des sédiments marins en technique routière	40
6.2. Valorisation des sédiments marins en granulats artificielles.....	41
6.3. Valorisation des sédiments marins dans le secteur briqueterie	42
6.4. Valorisation des sédiments marins en production de mortier et de béton.....	43
6.5. Valorisation des sédiments marins en éco-modélé paysager.....	44
Conclusion.....	45

2^{ème} Partie : Valorisation des sédiments en technique routière

Chapitre 1:Caractérisation des sédiments marins du GPMD	49
1. Caractérisation des sédiments marins non immergeable avant et après séchage naturel	49
1.1. Introduction	49
1.2. Présentation du site de prélèvement du sédiment et mode traitement.....	49
1.3. Sédiments : Prélèvement et stockage des sédiments marins avant et après décantation	51
2. Caractérisations physiques des sédiments marins bruts P1 et P2	52
2.1. Teneur en eau naturelle W(%).....	53
2.2. Teneur en matières organiques	54
2.3. Valeur au bleu de méthylène (VBS).....	55
2.4. Analyse granulométrique.....	56
2.5. Masse volumique des particules solides (ρ_s)	59
2.6. Limites d'Atterberg des sédiments P1 et P2.....	59
3. Caractérisation de portance	61
4. Analyse minéralogique	63
4.1. Analyse par fluorescence des rayons X.....	64
4.2. Détermination des phases cristallines par diffraction aux rayons X	65
4.3. Observation MEB	67
5. Classification des sédiments P1 et P2 selon le GTR	68
6. Caractérisation environnementale : Évaluation de l'impact environnemental des sédiments brut P1 et P2	70
6.1. Concentration totale des éléments traces.....	70
6.2. Evaluation environnementale pour une valorisation en technique routière selon le guide acceptabilité de matériaux alternatifs en technique routière.....	71
Conclusion.....	74
Chapitre 2: Valorisation des sédiments marins du GPMD en couche de fondation.....	75
1. Introduction	75
2. Description de l'étude de formulation en laboratoire	76

3. Elaboration d'une formulation de couche de fondation à base des sédiments marins : Choix des dosages	76
3.1. Liant hydraulique.....	76
3.2. Chaux vive.....	77
3.3. Sédiment marin non-immmergeable P2	78
3.4. Sable de dragage.....	78
4. Caractérisation environnementale du mélange sans traitement (sable et sédiment marins)	78
5. Constitution du squelette de la formulation	79
6. Étude des performances mécaniques du mélange	80
6.1. Paramètre de compactage et de portance du mélange	81
6.2. Etudes des performances mécaniques à long terme	82
6.3. Essai de résistance à la compression	83
6.4. Mesure du module d'élasticité à la compression.....	84
6.5. Essai de compression diamétrale	86
7. Évaluation environnementale de la formulation	88
Conclusion	90
Chapitre 3: Application in Situ : Construction d'une route à base de sédiment à Dunkerque avec suivi mécanique et environnemental	91
1. Introduction	91
2. Description de la planche expérimentale : route expérimentale Freycinet 12 au GPMD	91
3. Suivi mécanique de la route expérimentale	94
3.1. Etude de comportement mécanique à 60 jours et 360 jours	94
3.2. Mesure de la déflexion de la route expérimentale à 7, 60 et 360 jours	96
4. Suivi environnemental de la route : Caractérisation environnementale du matériau à base de sédiment de la route expérimentale à 60 jours et 360 jours	97
3^{ème} Partie: Etude de durabilité du béton à base du sédiment marin	
Chapitre 4: Démarche expérimentale et objectifs	103
1. Implantation des futurs blocs de béton à base de sédiment marin	105
2. Contexte	106
3. Objectifs	107
4. Méthodologies d'étude de caractérisation et de durabilité des bétons à base de sédiment	108
5. Programme expérimental	109
Chapitre 5: Caractérisation des bétons B1 et B2 à base de sédiment marin	111
1. Caractérisation non destructive des bétons B1 et B2	111

1.1. Introduction	111
1.2. Mesures par acoustique linéaire des bétons B1 et B2	112
1.2.1. Evaluation de la vitesse des ondes ultrasonores UPV	112
1.2.2. Evaluation du module d'élasticité dynamique.....	114
1.3. Acoustique non linéaire : Résonance en dynamique rapide	115
1.3.1. Introduction	115
1.3.2. Caractérisation des bétons B1 et B2 par la méthode de résonance en dynamique rapide .	117
2. Propriétés mécaniques des bétons à base de sédiments marins B1 et B2.....	119
2.1. Introduction	119
2.2. Résistance à la compression	119
2.3. Résistance à la traction	121
2.4. Détermination du module d'élasticité statique	121
2.4.1. Détermination de E et ν par la méthode des jauges de déformation.....	122
2.4.2. Méthodes capteurs de déplacement LVDT	122
2.4.3. Module d'élasticité selon la norme ASTM C 469-02.....	123
2.5. Résultats des trois méthodes.....	123
3. Etude microscopique de B1 et B2.....	126
3.1. Etude de porosité au mercure de B1 et B2	126
3.2. DRX.....	129
3.3. Examen pétrographique du B1 et B2.....	132
3.3.1. Analyse du béton B1	132
3.3.2. Analyse du béton B2	137
Chapitre 6: Etude de durabilité des bétons B1 et B2.....	143
1. Suivi non destructif des bétons B1 et B2 soumis à des cycles de gel/dégel	143
1.1. Echantillonnage et programme d'essai	144
1.2. Caractérisation de l'endommagement des bétons B1 et B2 par méthodes acoustiques linéaire	144
1.3. Caractérisation de l'endommagement des bétons B1 et B2 par méthode acoustique non-linéaire dynamique rapide	146
2. Attaque sulfatique externe des bétons B1 et B2.....	149
2.1. Introduction	149
2.2. Protocoles expérimentaux.....	150
2.2.1. Protocole immersion totale.....	151
2.2.2. Protocole cycles immersion/séchage à 105°C	151
2.2.3. Protocole cycles immersion/Séchage à 60°C	151

2.3. Evolution de la masse et du module d'élasticité dynamique des bétons B1 et B2.....	152
2.3.1. Protocole immersion totale.....	152
2.3.2. Protocole Immersion/Séchage à 105°C.....	153
2.3.3. Protocole Immersion/Séchage à 60°C.....	159
2.4. Etude microstructurale: porosité au mercure.....	161
2.4.1. Cas immersion totale.....	162
2.4.2. Cas immersion/séchage 60°C.....	163
2.4.3. Protocole 105°C.....	164
3. Effet de la réaction alcali-granulat RAG sur B1 et B2.....	167
3.1. Introduction.....	167
3.2. Méthodes de caractérisation.....	168
3.3. Essai d'allongement et de variation de masse.....	168
3.3.1. Essai d'allongement.....	168
3.3.2. Variation de la masse.....	169
Chapitre 7: Evaluation environnementale des bétons B1 et B2.....	171
1. Introduction.....	171
2. Evaluation environnementale du B1 et B2.....	172
2.1. Comparaison des concentrations totale des EMT avec des seuils normatifs N1 et N2172	
2.1.1. Comparaison des concentrations totale des EMT du sédiment brut et du sédiment incorporé dans B1 et B2.....	172
2.1.2. Comparaison des concentrations totale des EMT du sédiment brut et du béton B1 et B2.....	173
2.2. Comparaison des résultats de lixiviation du SB et des bétons B1 et B2 avec la législation sur le stockage des déchets.....	174
Références bibliographiques.....	185
Normes.....	194
Textes réglementaires et législatifs.....	197
Communications et publications personnelles.....	198

Liste des tableaux

Tableau 1: Classement granulométrique [GTR, 1992].....	23
Tableau 2: Niveaux référentiels relatifs aux métaux lourds et PCB (arrêté du 23/12/ 2009).....	31
Tableau 3: Valeurs limites à ne pas dépasser en lixiviation pour être candidat à une utilisation en technique routière [AMATR, Sétra, 2012].....	37
Tableau 4: Valeurs limites en percolation (niveau 2) permettant de justifier certaines utilisations visées par le présent guide [AMATR, Sétra, 2012].....	38
Tableau 5: campagne de prélèvement des sédiments P1 et P2.	52
Tableau 6: Teneur en eau des sédiments du port de Dunkerque [Miraoui, M., 2011; Tran, N.T., 2009]	54
Tableau 7: Caractéristiques granulométriques des sédiments marins P1et P2.	57
Tableau 8: Masse volumique des particules solides des sédiments marins P1et P2.	59
Tableau 9: Masse volumique absolue des sédiments marins P1 et P2 calcinés à 450°C.	59
Tableau 10: Résultats de l'essai Proctor et IPI pour les sédiments marins bruts P1et P2	62
Tableau 11: Résultat de l'analyse par fluorescence X en pourcentages massiques des sédiments marins P1 et P2.	65
Tableau 12: Récapitulatif des résultats des caractéristiques des sédiments marins P1 et P2.	68
Tableau 13: Etude comparative des caractéristiques physiques entre les sédiments du GPMD	69
Tableau 14: Concentrations des sédiments P1&P2 et les niveaux N1&N2	70
Tableau 15: Valeurs limites en lixiviation niveau 1 permettant de justifier l'utilisation des sédiments en technique routière selon le guide Sétra, 2012	73
Tableau 16: Composition chimique du liant hydraulique	77
Tableau 17: Valeurs limites en lixiviation niveau 1 permettant de justifier l'utilisation des sédiments en technique routière selon le guide Sétra, 2012	79
Tableau 18: résultats des essais de lixiviation sur des échantillons broyés et des monolithes	89
Tableau 19: Hypothèses de conception de la route.....	91
Tableau 20: Résultat de mesure de déflexion à 7,60 et 360 jours.....	96
Tableau 21: Résultats des analyses sur les carottes à 60 et 360 jours.....	98
Tableau 22: Qualité du béton selon la vitesse des ondes ultrasonores de compression [Carino, N.J. 2003]. ...	112
Tableau 23: Programme des essais de l'attaque sulfatique selon les trois protocoles	152
Tableau 24: Concentration totale des sédiments bruts	172
Tableau 25: Comparaison entre les teneurs en ETM dans les sédiments traités et le sédiment brut.....	173
Tableau 26: Teneurs en ETM du sédiment brut et B1 et B2.....	174
Tableau 27: Comparaison en teneurs en ETM du sédiment brut et B1 et B2 (essai de lixiviation).....	175

Liste des figures

Figure 1: Cycle de formation des sédiments [Beauchamp, J., 2005]	19
Figure 2: Processus d'évolution des matières organiques [Mustin, M., 1987].	21
Figure 3: Courbe de compactage du sol en fonction de la quantité de matière organique [Hussein, Al., et al. 1999]	22
Figure 4: Comportement des polluants rejetés dans les cours d'eau [Marchandise et Robbe 1978]	24
Figure 5: Principaux métaux lourds présents dans le sédiment	25
Figure 6: Concept et fonctionnement d'une lagune [Envisan, 2009]	26
Figure 7: Pourcentages d'immersion des sédiments de dragage en France [Idra, 2011]	29
Figure 8: Principaux règlementations de remise en suspension ou immersion et gestion à terre des sédiments .	31
Figure 9: Règlementation de la gestion des sédiments non immergeable à terre [DREAL, 2011]	33
Figure 10: Installations classées pour la protection de l'environnement [ICPE, 2010]	34
Figure 11: Processus d'évaluation environnementale pour une valorisation en technique routière.	36
Figure 12: Diagramme de caractérisation environnementale	36
Figure 13: Schéma général de valorisation des sédiments en matériau alternatif pour une utilisation en génie civil.	40
Figure 14: Réalisation d'une planche expérimentale au GPMD en 2005 [Dubois, V., 2006]	41
Figure 15: Consommation des granulats en génie civil [UNPG, 2009]	41
Figure 16: Granulats à base de sédiment marins [Brakni, S., 2008]	42
Figure 17: Processus de fabrication des briques à base de sédiments [Samara, M., et al., 2009]	43
Figure 18: Brique à base de sédiment de Savannh [Mezencevoca, et al., 2012]	43
Figure 19: Merlon éco modelé paysager au GPMD	44
Figure 20: Localisation géographique des zones draguées et immergées du GPMD	50
Figure 21: Trois bassins de décantation au GPMD	51
Figure 22: Sédiment P1 Figure 23: Sédiment P2	52
Figure 24: Teneur en eau des sédiments marins bruts (P1 et P2)	53
Figure 25: Teneur en matière organique des sédiments marins brus P1 et P2.	54
Figure 26: Argilosité des sédiments marins P1 et P2	55
Figure 27: Classification des sédiments marins en fonction de VBS [GTR, 1992]	55
Figure 28: Distribution granulométrique par granulométrie laser et par sédimentation associée par tamisage des sédiments P1 et P2	57
Figure 29: Classification triangulaire des sédiments marins P1 et P2	58
Figure 30: Limites d'Atterberg des sédiments marins P1 et P2	60
Figure 31: Diagramme de plasticité de Casagrande pour différents sédiments marins	61
Figure 32: Evolution de la masse volumique sèche et de l'IPI en fonction de la teneur en eau du sédiment P1 .	62
Figure 33: Evolution de la masse volumique sèche et de l'IPI en fonction de la teneur en eau du sédiment P2 .	63
Figure 34: Phases cristallines des sédiments marins P1 et P2	66
Figure 35: Observations microscopiques des sédiments marins P1 et P2	67
Figure 36: Classification des sédiments marins (P1 et P2) selon GTR, 1992	69
Figure 37 : Evolution du pH en fonction de l'ajout de chaux	77
Figure 38: Distributions granulométriques de la formulation proposée	80
Figure 39: Courbe Proctor modifié & IPI du mélange	81
Figure 40: Dispositif d'essai de compression et mesure de module	83
Figure 41: Evolution des résistances en compression de la formulation à base de sédiment	84
Figure 42: Dispositif de mesure de module d'élasticité E_c	85
Figure 43: Evolution du module élasticité E	85
Figure 44: Dispositif de détermination du la résistance à la traction et module E_t	86
Figure 45: Evolution de la résistance à la traction	87
Figure 46: Classification de la formulation à base de sédiment	88
Figure 47: Structure de la chaussée à base de sédiment marin	92
Figure 48: Profil de la route Freycinet 12 à base de sédiment marin	92
Figure 49: Etapes d'application de la formulation à base de sédiment en route expérimentale échelle1	94
Figure 50: Classification des carottes à base de sédiment marin à 60 et 360 jours	95

Figure 51: Diagramme de déflexion de la route expérimentale à 7, 60 et 360 jours.....	97
Figure 52: Position des futurs blocs de béton à base de sédiment marin	106
Figure 53: Campagne de carottage sur deux blocs de béton intégrant 12,5% et 20% du sédiment marin	107
Figure 54: Diagramme du programme expérimental d'étude de durabilité des béton B1 et B2	109
Figure 55: AndeScope de mesure d'UPV.....	113
Figure 56: UPV des bétons à 12,5% et 20% du sédiment marin	113
Figure 57: a) Montage pour mesurer la fréquence transversale ; (b) Fréquence longitudinale à l'aide d'AndeScope	114
Figure 58: Variation du module d'élasticité dynamique	115
Figure 59: Montage expérimental d'acquisition de résonance non linéaire [Kodjo, S., 2008].....	116
Figure 60: Montage et traitement des données d'essai acoustique en dynamique rapide.....	117
Figure 61: Variation du paramètre de résonance αf du béton B1 et B2	118
Figure 62: Essai de compression des éprouvettes à base de sédiment marin.....	119
Figure 63: Variation de la résistance à la compression R_c selon ASTM C39-02 et EN12390-03.....	120
Figure 64: Essai de résistance à la traction	121
Figure 65: Variation de la résistance à la traction R_t	121
Figure 66: Montage des jauges de déformation	122
Figure 67: Dispositif de mesure du module d'élasticité à l'aide des capteurs LVDT.....	123
Figure 68: Dispositif de mesure du module d'Young selon ASTM 469-02	123
Figure 69: Courbes contrainte/déformation des deux bétons selon les trois méthodes.....	124
Figure 70: Variation du module d'élasticité selon des deux bétons selon trois méthodes.....	125
Figure 71: Porosité totale des bétons B1 et B2.....	127
Figure 72: Courbe moyenne de la porosité cumulée des bétons B1 et B2.....	127
Figure 73: Courbe moyenne de Porosité différentielle des bétons B1 et B2.....	127
Figure 74: Evolution du diamètre moyen des pores du B1 et B2.....	128
Figure 75: Spectre de diffraction des rayons X du B1.....	129
Figure 76: Spectre de diffraction des rayons X du B2	129
Figure 77: Spectre de diffraction des rayons X sur le sédiment incorporé dans le béton B1	130
Figure 78: Spectre de diffraction des rayons X sur le sédiment incorporé dans B2.....	131
Figure 79: Spectre de diffraction des rayons X sur un sédiment marin brut	131
Figure 80: Grain de clinker Portland partiellement hydraté.....	132
Figure 81: Photo microscope optique de l'interface granulats calcaire contenant de la calcite et de la pyrite/pâte de ciment(a) & granulats de silice/pâte de ciment.....	133
Figure 82: Photo microscope optique de l'interface granulats sédiment marin/pâte de ciment.....	133
Figure 83: Observation MEB de la microstructure et de l'interface sédiment/pâte de ciment du B1 et des cartographies élémentaires.....	134
Figure 84: Observation MEB et microanalyse élémentaire par spectrométrie x à dispersion d'énergie d'une microstructure du ciment sulfo-alumineux non hydraté.....	135
Figure 85: Formation de l'ettringite dans le sédiment marin.....	136
Figure 86: Observation MEB et microanalyse élémentaire par spectrométrie x à dispersion d'énergie de l'ettringite	136
Figure 87: Identification d'ettringite dans les boulettes de sédiment du béton B1	137
Figure 88: Présence de Pyrite framboïdale les boulettes de sédiment du béton B1	137
Figure 89: Grain de clinker Portland partiellement hydraté dans le béton B2	138
Figure 90 : Photo microscope optique de l'interface sédiment marin/pâte de ciment.....	138
Figure 91: Identification de la formation d'ettringite dans le sédiment marin incorporé dans le béton B2.....	139
Figure 92: Observation MEB et cartographies élémentaires de la microstructure du béton à 20% du sédiment marin.....	140
Figure 93: Microstructure du béton à 20% du sédiment marin, observation MEB et pointés.....	141
Figure 94: Echantillon soumis à des cycles de gel-dégel	144
Figure 95: Variation des paramètres acoustiques linéaires du module d'élasticité dynamique(a) et d'UPV (b) et après 58 et 85 cycles gel-dégel	145
Figure 96: Variation du paramètre acoustique non-linéaire « αf » après 58 et 85 cycles gel-dégel (à 85 cycles le béton B2 est trop dégradé).....	147
Figure 97: Echantillon de béton B1 du sédiment marin après 58 (a) et 85 (b) cycles gel-dégel.....	148
Figure 98: Echantillon du béton B2 du sédiment marin après 58 (a) et 85 (b) cycles gel-dégel.....	148
Figure 99: Immersion des bétons B1 et B2 dans une solution à 5% de $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	151
Figure 100: Variation de la masse moyenne des échantillons (Immersion totale)	152

Figure 101: Variation du module dynamique moyen des échantillons (Immersion totale) 153
 Figure 102: Détérioration des arrêtes du B1 après 4 semaines de cycles immersion/séchage à 105°C 154
 Figure 103: Fissuration du béton B2 après 3 semaines de cycles immersion/séchage à 105°C 154
 Figure 104: Dégradation du béton B1 après quatre mois de cycles immersion/séchage à 105°C 155
 Figure 105: Dégradation complète du béton à 20 % après trois mois de cycles immersion/séchage à 105°C.. 156
 Figure 106: Variation de la masse moyenne des échantillons (Séchage 105°C)..... 157
 Figure 107: Variation du module d'élasticité dynamique moyen des échantillons (Séchage 105°C) 157
 Figure 108: Dégradation et fissuration du béton B1 après six mois de cycles immersion/séchage à 60°C 159
 Figure 109: Dégradation et fissuration du béton B2 après cinq mois de cycles immersion/séchage à 60°C 160
 Figure 110: Variation de la masse moyenne du B1 et B2 (Séchage 60°C)..... 160
 Figure 111: Variation du module d'élasticité dynamique du B1 et B2 (Séchage 60°C) 161
 Figure 112: Variation de la porosité différentielle du B1 en immersion totale 162
 Figure 113: Variation de la porosité différentielle du B2 en immersion totale 162
 Figure 114: Comparaison entre les porosités des bétons B1 et B2 en immersion totale 163
 Figure 115: Variation de la porosité différentielle du B1 après cycles I/S à 60°C..... 163
 Figure 116: Variation de la porosité différentielle du B2 après cycles I/S à 60°C..... 163
 Figure 117: Comparaison entre les porosités des bétons B1 et B2 suite aux cycles I/S à 60°C..... 164
 Figure 118: Variation de la porosité différentielle du B1 suite aux cycles I/S à 105°C 164
 Figure 119: Variation de la porosité différentielle du B2 suite aux cycles I/S à 105°C 165
 Figure 120: Comparaison entre les porosités des bétons B1 et B2 suite aux cycles I/S à 105°C 166
 Figure 121: Graphique de l'expansion(%) des carottes B1 et B2 en fonction du temps (jours) 169
 Figure 122: Graphique de variation de la masse (%) des bétons B1 et B2 en fonction du temps (jours). 170

Liste des équations

$W\% = (\text{masse eau} / \text{masse sèche}) \cdot 100$ Eq. 1..... 53
 $I_p = WL - WP$ Eq. 2..... 60
 $I_p = 0,73 (WL - 20)$ Eq. 3..... 61
 $C_{in}(\%) = \left(\frac{MC}{MC02}\right) \times \left(\frac{\text{Perte de masse}}{\text{Masse d'échantillon}}\right) \times 100$ Eq. 4..... 64
 $Cu = D60/D10$ Eq. 5 80
 $Cc = D30^2 / (D60 \times D10)$ Eq. 6 80
 $M = (V \cdot \gamma_d \cdot 0,97 (100 + W)) / 100$ Eq. 7 82
 $Rt = 0,8 \times Rtb$ Eq. 8 86
 $Rtb = 2 \times 10^{-2} Fr / \pi \phi h$ Eq. 9 86
 $\Delta ff_0 = \alpha f \cdot \Delta \epsilon$ Eq. 10 117
 $Ed = V^2 \cdot \rho \cdot 1 + \nu(1 - 2\nu)(1 - \nu)$ Eq. 11 153

Introduction générale

1. Mise en contexte

L'accumulation des sédiments au fond des ports est un phénomène naturel souvent amplifié par l'activité humaine, qui empêche les activités maritimes et perturbe les équilibres physico-chimiques des masses d'eau. De fait, un dragage d'entretien est indispensable pour rétablir le tirant d'eau pour la navigation et pour restaurer le milieu naturel pour un bon fonctionnement des ports. Sur le plan national, l'entretien des 6500 kilomètres de côtes que compte le littoral Français nécessiterait l'extraction d'environ 50 millions de m³ de sédiments marins tous les ans. Les sept Grands Ports Maritimes comptabilisent à eux seuls 29,2 Mm³, soit près de 80 % du total [CETMEF, 2010]. Environ 300 millions de m³ de sédiments sont dragués pour entretenir les ports aux États-Unis, dont 1 à 4% sont considérés fortement contaminés [EPA, 1999]. La gestion des sédiments de dragage est une problématique complexe qui doit prendre en compte des critères techniques, l'évolution des textes réglementaires au niveau environnemental, mais aussi social et économique [Mac Farlane, F., 2004 ; Grégoire, P., 2004].

Depuis près de dix ans, ces sédiments, considérés jusqu'alors comme déchets, ont alimenté plusieurs filières de valorisation. Ce processus de valorisation réunit un avantage économique et un enjeu environnemental. En effet, ce matériau n'est plus stocké ou mis en décharge mais peut être ainsi utilisé comme matériau commercial. De plus, son dragage s'inscrit dans un contexte d'écologie industrielle.

Face à cette problématique, des filières de valorisation en génie civil ont été recherchées : en technique routière [Dubois, V., 2006 ; Tran, N.T., 2009 ; Dubois, V., et al., 2009; Zentar, R., et al., 2009; Miraoui, M., 2010 ; Dia, M., 2013], en granulats [Brakni, S., 2008], en béton [Zri, A., 2010] et fabrication de briques [Mezencevova, et al., 2012 ; Hamer, K., et al., 2002] . Ces derniers peuvent réduire le recours aux matériaux standards. La démarche de valorisation permet de répondre à de multiples enjeux de développement durable :

Enjeux environnementaux :

- préserver les réserves naturelles de granulats par la valorisation des matériaux de substitution pour les travaux de génie civil ;
- apporter des solutions de gestion à terre et développer l'écologie industrielle ;

- Réduire le transport et les émissions en CO₂ ;
- renforcer la biodiversité.

Enjeux socio-économiques :

- développer des filières industrielles de valorisation et de réutilisation des sédiments marins du GPMD et renforcer l'innovation dans ce domaine par l'émergence de l'éco-industrie à forts potentiels économiques sur le marché national et international ;
- adapter les aménagements industrialo-portuaires aux changements climatiques et gérer les risques ;
- optimiser le réemploi/possibilités de recyclage ;
- réduire le nombre de processus ;
- coordonner les politiques urbaines et portuaires d'aménagement et de développement durable par la construction des ouvrages à base de sédiments marins.

Cette thèse en cotutelle entre les deux laboratoires de recherche vise à réunir leurs compétences et leur savoir-faire dans le domaine de valorisation des sédiments en matériau de construction et les outils de contrôle et de suivi non destructifs des nouveaux matériaux cimentaires à base de sédiments.

Le *Grand Port Maritime de Dunkerque* GPMD engage des opérations de dragage et de maintien bien encadrés qui conduisent à l'extraction de 4 Millions de m³/an. Les pratiques de dragage qui sont bien encadrées juridiquement, constituent une nécessité pour le GPMD, du fait que le port doit s'inscrire dans un cadre environnemental très rigoureux afin de conserver l'espace marin dans l'esprit du développement durable. Le port a ainsi opté pour une politique environnementale globale intégrée dans son projet stratégique via son *Plan d'Aménagement et Développement Durable* PA2D qui lui permet d'accomplir les objectifs du Grenelle de l'environnement en déclinant les opérations de dragage en plusieurs thématiques : qualités des eaux et filières de gestion des sédiments [Le grenelle de la Mer, 2011].

Dans le cadre de son PA2D, le GPMD prévoit pour les sédiments sains d'être immergés en mer, tandis que les sédiments non-immérgeables d'être gérés à terre avec le souci de développer des filières de valorisation. Dans ce cadre, les sédiments non-immérgeables sont traités par déshydratation sur une plate-forme de 7 ha, cette plate-forme est composée trois bassins de décantation pour une capacité qui peut atteindre 50 000 m³ de sédiments.

En effet, Le Grand Port Maritime de Dunkerque et l'École des Mines de Douai prennent part du projet à rayonnement national « SÉDIMATÉRIAUX » dont le but est d'avoir une valorisation efficace, utile et peu coûteuse des sédiments de dragage.

2. Objectifs

Les travaux de recherche menés dans cette thèse rentrent dans le cadre du projet de recherche « SEDIMATERIAUX ». Ce projet vise à faire émerger des filières de gestion à terre et à mettre en œuvre des opérations significatives de référence dont le but ultime est de mettre en jeu des matériaux de construction contenant des sédiments. Les objectifs généraux sont :

2.1. Valorisation du sédiment marin en technique routière

L'objectif principal dans cette partie consiste à développer une méthodologie scientifique de valorisation des sédiments marins, basée sur des études des caractérisations intrinsèques en amont afin de mettre en œuvre un matériau alternatif selon le guide d'acceptabilité des matériaux alternatifs en technique routière [AMATR, Sétra, 2012], et qui sera adapté pour une valorisation en couche de fondation. L'étude consiste à l'élaboration et la validation d'une formulation à base de sédiments marins suivit par la réalisation d'un premier ouvrage routier à l'échelle 1 à Dunkerque. Une phase de suivi in situ de l'aspect mécanique et environnemental de l'ouvrage a été également étudiée.

2.2. Etude de durabilité des blocs béton à base de sédiment marin

Dans cette deuxième partie de la thèse, et dans le même objectif de valorisation, nous avons étudié l'effet de l'incorporation du sédiment marin dans le béton par l'étude de durabilité des éprouvettes de béton à base de 12,5% et 20% de sédiments marins issus du carottage de deux blocs de béton.

L'étude de durabilité réalisée se situe dans le cadre d'un programme de recherche entre le laboratoire du département de Génie Civil et Environnemental de *l'École des Mines de Douai* en France et le laboratoire *Groupe de Recherche en Auscultation et Instrumentation* (GRAI) du département de génie civil de *l'université de Sherbrooke* (UdeS) au Canada. Les travaux réalisés au GRAI, pour la caractérisation non destructive constituent une nouvelle contribution originale à la caractérisation des bétons à base de sédiment marin.

Sur un plan plus général, les travaux entrepris reposent sur l'utilisation de trois niveaux d'analyse : la caractérisation non destructive en utilisant les outils de l'acoustique linéaire et non-linéaire, la caractérisation destructive avec des essais mécaniques, la caractérisation physique (porosité au mercure, DRX et examen pétrographique), l'étude de durabilité (face aux cycles gel/dégel, étude de l'attaque sulfatique externe et réaction alcali-granulats RAG) et enfin une évaluation environnementale des deux bétons.

3. Organisation de la thèse

Cette thèse est composée d'une introduction générale, trois parties, sept chapitres et une conclusion générale.

La première partie « *synthèse bibliographique* » définit l'état de l'art sur la gestion des sédiments, les nouvelles réglementations et les progrès de valorisation en France et dans le monde.

La deuxième partie présente la « *Valorisation du sédiment en technique routière* », elle inclut le chapitre 1 qui s'intéresse à l'étude de caractérisation (physique, minéralogique et environnementale) des deux sédiments marins non-immérgeables issus du GPMD. Après l'étude de la composition et du comportement des deux sédiments, le deuxième chapitre a été consacré à l'étude d'une approche expérimentale de formulation d'un matériau routier à base de sédiment marin pour une utilisation en couche de fondation. Après la validation de l'étude en laboratoire, le troisième chapitre a fait l'objet d'une application réelle in situ par la construction d'une première route en France à l'échelle 1 à base de sédiment marin, cette réalisation avait pour but d'évaluer la faisabilité pratique de l'introduction des sédiments dans des matériaux routiers ainsi que les suivi des performances mécaniques sur des échantillons prélevés à 60 et à 360 jours et d'évaluer l'impact environnemental après une année de service.

La deuxième partie porte sur « *l'Etude de durabilité des blocs béton à base du sédiment marin* », la présente partie et dans la continuité de la première partie à savoir la valorisation des sédiments marins dans le domaine de génie civil. Le chapitre quatre de cette partie définit la démarche expérimentale et les objectifs par une étude d'une approche expérimentale de durabilité de deux bétons prélevés de deux blocs béton à base de 12,5% et 20% du sédiment de dragage ainsi que les différentes campagnes expérimentales et les techniques de mesure et d'analyse utilisées. Le quatrième chapitre a été consacré à une évaluation des indicateurs de durabilité de ces deux bétons suivant une méthodologie de caractérisation qui comporte trois phases. La première phase présente une caractérisation non

destructive par l'emploi des méthodes linéaires consistant à détermination de la vitesse de propagation d'ondes (UPV) et du module dynamique (E_{dyn}) et par des méthodes non linéaire par la détermination du décalage fréquentiel αf , une caractérisation destructive par des essais de compression (R_c), essai brésilien (R_t) et la détermination du module de Young et enfin une caractérisation microscopique par l'étude de la porosité afin d'évaluer l'effet de l'incorporation du sédiment dans le béton ainsi de la DRX et microscopie optique et par balayage électronique. La chapitre six a été consacré à une étude de durabilité des deux bétons après des cycles gel/dégel, attaque sulfatique externe et la réaction alcali-granulats. Le septième chapitre a fait l'objet d'une évaluation environnemental des deux bétons et leur impact sur l'environnement.

Une conclusion générale sur les travaux effectués dans les deux parties sur l'utilité de valorisation du sédiment marin en génie civil est présentée ainsi des perspectives et des recommandations pour des études ultérieures.

Partie 1

Synthèse Bibliographique

1. Les sédiments marins

1.1. Définition

Le terme sédiment désigne les dépôts retrouvés au fond des environnements aquatiques et composés de matières particulaires (de différentes tailles, formes et compositions minéralogiques) de diverses origines (endogène et exogène) [Schneider, G., 2001]

Ces particules minérales ou organiques déposées par l'eau, le vent ou la glace, proviennent de l'usure des continents ainsi que des rejets locaux dus à l'activité humaine [LIFE., 2002]. L'usure se fait par des mécanismes physiques produisant la fragmentation des matériaux et des réactions chimiques donnant des solutions de lessivage (altération chimique). Les éléments en solution sont transportés par l'eau (Figure 1). Une partie des produits de destruction peut s'accumuler momentanément sur place, sans être transportée, et constitue alors une couche d'altération ou éluvion. Les débris, dans leur majeure partie, sont déplacés puis déposés, généralement dans l'eau, pour former un sédiment détritique (alluvions au sens large). Les éléments en solution qui précipitent, avec intervention des êtres vivants, forment un sédiment d'origine chimique ou biochimique.

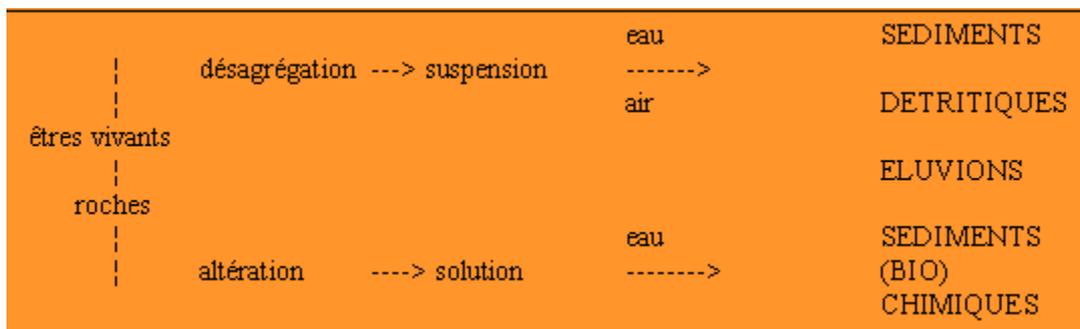


Figure 1: Cycle de formation des sédiments [Beauchamp, J., 2005]

1.2. Origine

Les sédiments ont principalement deux origines [Schneider, G., 2001]:

- une origine endogène lorsque la sédimentation provient de la production autochtone du milieu qui engendre des débris de macrophytes (plantes aquatiques, produits de décomposition d'organisme animaux ou végétaux)
- une origine exogène lorsque il s'agit d'apport de matières allochtones. Celles-ci sont issues du ruissellement des fleuves, des effluents ou de l'atmosphère. Cet apport peut être d'origine naturelle (érosion des sols, décomposition de la matière végétale...), ou anthropique (apports de matière en suspension, de matières organiques,

de nutriments ou de micro-polluants en raison des rejets agricoles, industriels et domestiques) qui apportent des polluants organiques (hydrocarbures, HAP, PCB,...) et inorganiques (éléments traces métalliques ETM).

1.3. Composition des sédiments

Le sédiment est une matrice très hétérogène. On distingue la fraction solide composée d'éléments de nature minérale et des matières organiques [Power, E.A., et al., 1992], ces composés jouent un rôle sur les caractéristiques physiques, mécaniques et environnementales du sédiment. Le sédiment est principalement composé de :

1.3.1. Eau

L'eau occupe l'espace entre les particules solides représente une teneur très variable allant de 100% à 300% en masse. Cette teneur dépend généralement de la technique de dragage. Il faut aussi distinguer dans les sédiments l'eau interstitielle.

1.3.2. Phase organique

1.3.2.1. Définition

L'origine des matières organiques dans les sédiments est très variée, elles peuvent être composées de débris végétaux, des colloïdes humiques ou des micro-organismes. Elles subissent une décomposition continue par la biomasse microbienne (microflore : bactéries, champignons, et micro-faune). La fraction organique est faiblement représentée dans le sol, en comparaison avec la fraction minérale, cette fraction est très variable au cours du temps, [Mustin, M., 1987]. Les matières organiques sont généralement regroupées en quatre classes [Mustin, M., 1987] (Figure 2):

- matière organique vivante (biomasse active) ;
- matière organique fraîche (débris végétaux, organismes...) ;
- composés en cours d'évolution ;
- humus, composés organiques stable représentent 60% de matières présentes dans un sédiment. Selon le pH, on distingue trois fractions dans les substances humiques :
 - ✓ les acides humiques insolubles dans l'acide mais solubles en milieu alcalin.
 - ✓ les acides fulviques solubles dans les acides et les bases.
 - ✓ l'humine insoluble dans les acides et les bases.

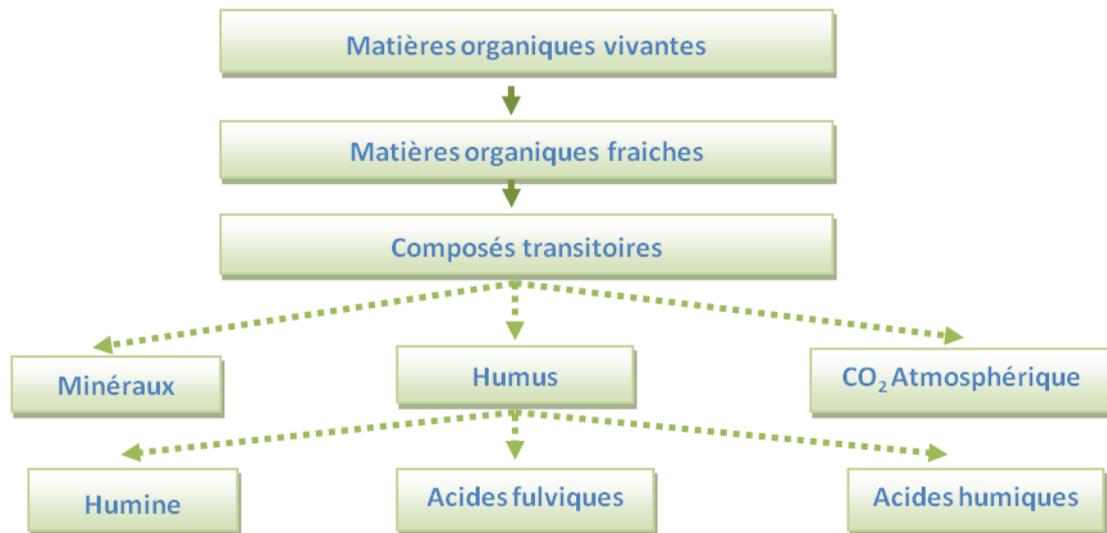


Figure 2: Processus d'évolution des matières organiques [Mustin, M., 1987].

Les acides humiques et les acides fulviques forment de grandes chaînes avec de nombreux groupements fonctionnelles tels que : les benziles (cycle à 6C), les carboxyles (COOH), les hydroxyles (OH), les carbonyles (C=O) et les amines. La nature des substances organiques se simplifient avec leur humification. Sans tenir compte du soufre, leur formule chimique moyenne serait $C_{10}H_{12}O_5N$ pour les acides humiques et $C_{12}H_{12}O_5N$ pour les acides fulviques [Calvet, 2003]. Les composés humiques sont de nature acide et chargés négativement [Mitchell, J.K., et al., 1992].

1.3.2.2. Influence des matières organiques sur le sol

Les fractions organiques interagissent avec les composés minéraux du sol et plus particulièrement la fraction argileuse. Ainsi, il y a formation d'un complexe argilo-organique de différents degrés de stabilité [Stevenson, 1994]. Les substances organiques peuvent être retenues par les minéraux argileux de deux façons [Stevenson, 1994] :

- par échange cationique ou anionique en surface par des liens hydrogènes ou par des forces de Van Ders Waals.
- par pénétration dans les espaces inter-couches des argiles.

L'interaction des matières organiques avec les fractions minérales modifie les caractéristiques géotechniques du sol comme la plasticité et la consolidation [Keller, G.H., 1982]. La formation des complexes argilo-organiques augmente l'indice des vides et par conséquent la compressibilité [Rashid et Brown, 1975]. Une étude réalisée par Tremblay et al., 2002, sur un sédiment de dragage dont l'étude de la teneur en matière organique a été

régulée par oxydation avec de l'eau oxygénée (H_2O_2), montre que le sédiment contenant 8% de matière organique représente une compressibilité plus élevée que les sédiments qui en contiennent 0% et 3%. Ces résultats s'accordent avec ceux de [Rashid et Brown, 1975] qui ont noté une l'augmentation de la compressibilité d'un facteur de 10 quand la teneur en matière organique augmente de 0 à 4 %.

Les matières organiques présentent des masses volumiques faibles par rapport aux matières minérales, l'augmentation de leur quantité conduit à la réduction de la densité des sédiments causant l'augmentation de la teneur en eau optimale de compactage [Hussein, A I., et al. 1999] (Figure 3). Zentar, R., et al., 2009 a montré aussi que la quantité de matière organique influence les paramètres tels que la limite de liquidité, de plasticité et de la résistance au cisaillement des sédiments.

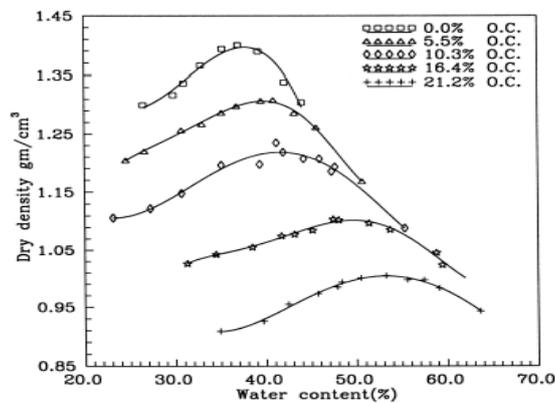


Figure 3: Courbe de compactage du sol en fonction de la quantité de matière organique [Hussein, A I., et al. 1999]

1.3.3. Phase inorganique ou minérale

Les minéraux sont les principaux constituants des sédiments. Ils influencent essentiellement les caractéristiques physiques et mécaniques des sédiments. Selon leur origine et leur provenance, la composition minérale des sédiments diffère :

- les cailloux, les gravillons, les graviers et les sables sont d'origines terrigènes, issues de l'érosion des sols dont la composition pétrographique dépendent des terrains érodés ;
- les sables renferment essentiellement du quartz avec présence ou non de micas ou feldspaths ;

- les éléments fins, vases contiennent des éléments minéraux argileux dans leurs compositions d'origine terrigène et aussi des squelettes d'organismes d'origine endogène.

1.3.3.1. Classement granulométrique des sédiments

La répartition des sédiments est très variable, cette granulométrie varie en fonction de l'origine du point du prélèvement et la nature de la matière solide. En effet, les particules grosses restent en amont tandis que les particules fines se trouvent en aval. Le Tableau 1 détaille les différentes classes granulométriques des sédiments en géologie [GTR, 1992].

<i>Taille</i>	<i>Granulats</i>
<i>> 20 cm</i>	<i>Blocs</i>
<i>2 cm à 20 cm</i>	<i>Cailloux</i>
<i>2 mm à 2 cm</i>	<i>Graviers</i>
<i>63µm à 2 mm</i>	<i>Sables</i>
<i>2 µm à 63 µm</i>	<i>Limons ou silt</i>
<i>< 2 µm</i>	<i>Vases, boues argileuses</i>

Tableau 1: Classement granulométrique [GTR, 1992]

L'analyse granulométrique des sédiments où la fraction est supérieure à 63µm, représente un sable caractérisé par une faible cohésion, une surface de contact peu significative et ne comportait pas de contamination. La fraction inférieure à 63µm, représente une fraction fine où on trouve les limons et les argiles. Cette fraction fine peut contenir de la matière organique, qui peut s'expliquer par la présence des polluants dans cette dernière. Gosselin, A., et al., 1999 ont démontré après des analyses sur des sédiments d'une zone portuaire de Montréal, qu'environ 70% des contaminants inorganiques se trouvent dans la fraction fine.

1.3.3.2. Les argiles dans le sédiment

Les argiles sont des phyllosilicates d'aluminium hydratés présentant une structure cristalline en feuillets. Ces derniers sont constitués de couches d'octaèdres $Al(OH)_6$ et de couches de tétraèdres SiO_4 reliées par les atomes O et OH mis en commun. Les minéraux argileux les plus présents dans les sédiments sont :

- *la kaolinite* : Composée d'une succession de couches alternées de feuillets de silice et de feuillets d'alumine.
- *la smectite* : Composée par deux feuillets de silice et d'un feuillet d'alumine ou gibbsite.

- *l'illite* : Argile de structure similaire à celle de smectite. Les atomes de potassium occupent les espaces entre les couches.

2. Les polluants dans les sédiments

Le milieu marin est souvent soumis à des rejets industriels, urbains ou agricoles, entraînant l'apport d'un grand nombre de substances toxiques de nature organique (HAP, PCB, TBT....) et inorganique (éléments traces métallique : Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Zn, As, Mo) [Babut, M., et al., 1999] qui vont s'accumuler dans les sédiments. Depuis les années 1970, les substances toxiques sont considérées comme une destination finale vers les sédiments qui deviennent par la suite une réserve toxique potentiellement mobilisable. Comme on peut l'apercevoir sur le diagramme de la Figure 4, de nombreux paramètres jouent un rôle important dans le comportement du polluant [Marchandise, P, et Robbe, D., 1978].

Les contaminants n'ont pas le même pouvoir de fixation selon les conditions géochimiques et la nature des solides. En effet, le sédiment peut présenter des teneurs élevées de polluants qui ne sont pas remobilisables dans les conditions naturelles du milieu, mais il peut aussi devenir toxique lorsque les conditions physico-chimiques sont modifiées lors d'un dragage par exemple. Les sédiments ne constituent pas uniquement un simple réservoir pour les polluants, ce sont de véritables réacteurs biogéochimiques capables d'adsorber et de transformer les polluants, de modifier leur biodisponibilité, de les recycler ou de les transférer vers la colonne d'eau, vers le sol ou les nappes phréatiques.

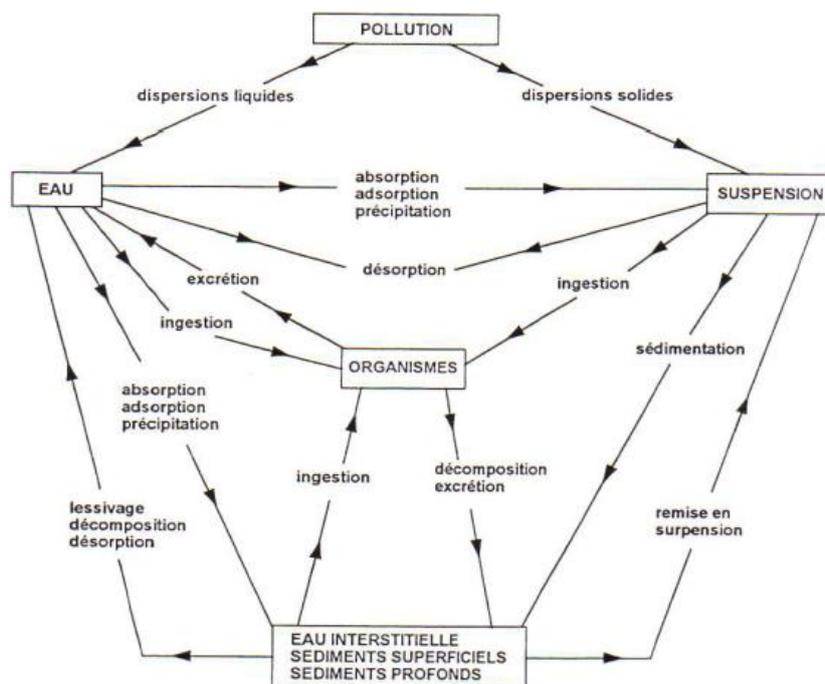


Figure 4: Comportement des polluants rejetés dans les cours d'eau [Marchandise et Robbe 1978]

2.1. Les polluants organiques

Les polluants organiques sont composés de carbone, d'hydrogène, d'oxygène et d'azote. Ces éléments sont très toxiques, solubles ou absorbés par les matières en suspension. On distingue trois grandes familles de composés organiques : les HAP (Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques), les PCB (Poly-Chloro-Biphényles) et les TBT (Tri-Buyl-Etain).

2.2. Les éléments traces métalliques

Les éléments traces métalliques se trouvent à l'état de traces dans les sédiments puisqu'ils entrent dans la composition de nombreuses roches. Ils sont non biodégradables, leur durée de vie est infinie. Leur origine est liée à l'activité humaine de stockage des déchets industriels et urbains, les pratiques agricoles et à la pollution liée aux retombées atmosphériques par l'utilisation de combustibles fossiles, d'essences au plomb, de poussières et des industries métallurgiques. Les principaux métaux lourds sont le cadmium, le chrome, le cuivre, le plomb, le mercure, le nickel, le sélénium, l'arsenic et d'autres éléments spécifiques. Ces derniers peuvent être fixés sur les éléments minéraux et les matières organiques des sédiments.

Pour évaluer la toxicité de ces substances, les laboratoires doivent déterminer la teneur totale de chaque élément, mais aussi la forme chimique de chaque élément. La Figure 5 illustre les éléments traces les plus souvent rencontrés dans les sédiments.

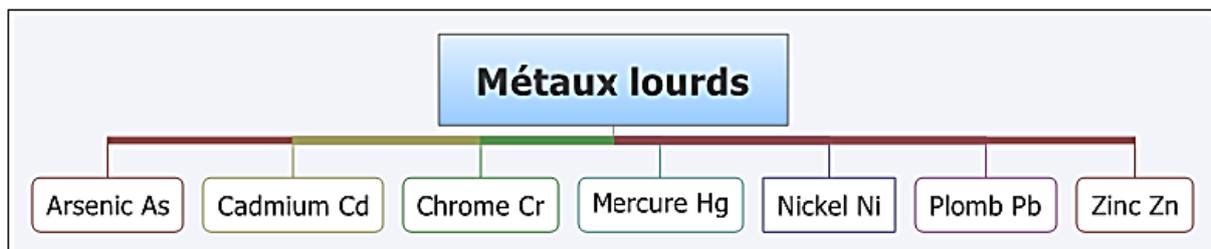


Figure 5: Principaux métaux lourds présents dans le sédiment

3. Dragages et échantillonnage

3.1. Problématique de la gestion portuaire des dragages

Les opérations de dragage dans les ports constituent une nécessité vitale au maintien et au développement de leur activité (sécurité de la navigation, travaux d'aménagement).

Boutin B., 2000 a défini le dragage comme étant « des terrassements effectués sous l'eau avec des engins flottants au moyen de procédés mécaniques ou par aspiration ». Donc, pour maintenir et garantir ces accès pour la navigation et la restauration des milieux portuaires, il est indispensable de les entretenir en effectuant régulièrement des opérations de dragage. Les Grenelles de l'environnement et de la mer ont permis de mettre en avant de nouvelles formes de gouvernance environnementale pour les ports [Le grenel de la mer, 2011]. La gestion des sédiments de dragage est traitée par l'engagement 29 du grenel de la mer intitulé « réduire les pollutions de la mer par les activités maritimes autres que le transport » et plus particulièrement l'engagement 29a intitulé « interdire le rejet en mer des boues de dragage polluées : mettre en place un filière de traitement des boues et de récupération des macro-déchets associés » et l'engagement 29 c intitulé « faire évoluer les pratiques d'entretien des estuaires, espaces portuaires et chenaux d'accès et les modalités de gestion des sédiments et boues de dragage.

En France, la problématique du traitement des sédiments issus de dragage a été initiée par [Troalen, J.P., 1998], notamment sur les questions de dépollution, traitement et séparation de phases, pour amener les sédiments dragués à un niveau de densification qui permet le bon déroulement du transport et du stockage. Fort de cette évolution, le GPMD a poursuivi ses efforts en renforçant sa stratégie de gestion des sédiments issus de dragage en 2010 par un outil opérationnel indispensable pour une gestion optimale : le Plan de Gestion Opérationnelle des Dragues (PGOD), qui propose des solutions de gestion acceptable au regard de la qualité et de la quantité des sédiments. Le GPMD mène donc une politique de gestion des sédiments lui assurant une amélioration constante du milieu. Par ailleurs, les sédiments non immergeables en raison de la qualité insuffisante sont gérés à terre. Cette nouvelle filière de gestion prend appui sur une plate-forme de traitement par déshydratation naturelle par lagunage actif (Figure 6) permettant d'accueillir 50 000 m³ de vases par campagne de stockage et de valorisation [Envisan, 2009].

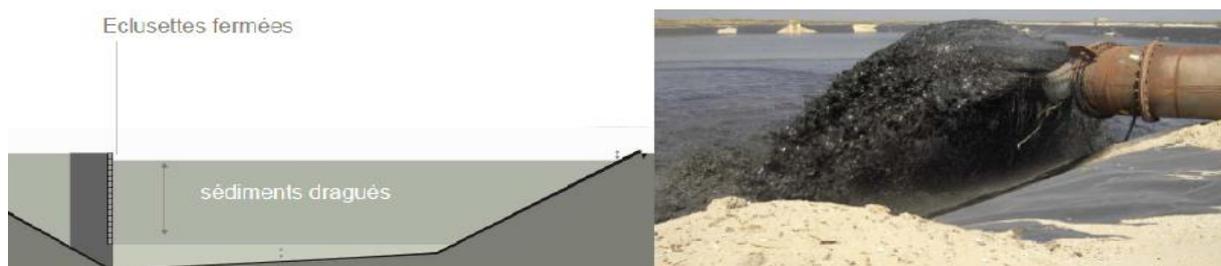


Figure 6: Concept et fonctionnement d'une lagune [Envisan, 2009]

3.2. Méthodes d'échantillonnage et de conservation

3.2.1. Méthode d'échantillonnage

L'échantillonnage constitue une étape cruciale dans le processus de caractérisation d'un sédiment. Le but visé est d'obtenir des éventails échantillons représentatifs qui reflètent toutes les caractéristiques physiques, chimiques et environnementales de l'ensemble du site étudié. La caractérisation des sédiments passe inévitablement par la récupération des données antérieures et/ou par la validation d'un plan d'échantillonnage (définition de la méthode de prélèvement et localisation des points de prélèvement, en fonction des relevés bathymétriques, des zones de confluence de rejet ou supposées à risque). Dans cette démarche d'échantillonnage, il est très important de préciser le site de distribution, les propriétés physico-chimiques et son hétérogénéité de constitution. La circulaire du 14 juin 2000, définit les instructions techniques portant sur les prélèvements et les analyses des déblais de dragage. Cette circulaire abroge la directive du 24 mars sur la « méthodologie portant sur le prélèvement et l'analyse des déblais de dragage ». En réalité, il existe une dizaine de stratégies d'échantillonnage d'un milieu, par contre, dans la pratique trois types d'échantillonnage sur une surface peuvent être appliqués :

- ***Echantillonnage aléatoire ou au hasard***

Le principe de ce type d'échantillonnage est de recueillir un nombre prédéterminé d'échantillons. Cette méthode permet d'éviter d'obtenir des résultats biaisés du fait de l'attribution et de la sélection aléatoires des lieux d'échantillonnage. Cette méthode d'échantillonnage est pratique si la zone est parfaitement homogène.

- ***Echantillonnage en grille***

Dans l'échantillonnage en grille, le premier lieu d'échantillonnage est choisi de manière aléatoire et toutes les stations suivantes sont placées à intervalles réguliers (exemple 50 m) dans toute la zone étudiée. Les points d'échantillonnage en grille sont souvent utilisés pour l'évaluation environnementale de la qualité des sédiments.

- ***Echantillonnage ciblé***

Il est réalisé dans une petite zone qui est estimée comme critique d'après des informations récoltées par ailleurs. Pendant l'opération d'échantillonnage, il convient de réaliser une

évaluation visuelle de la qualité des échantillons sur le terrain et de ne pas perturber l'eau superficielle recouvrant la surface des sédiments. Il est parfois admis de prélever un échantillon dont l'apparence ou les caractéristiques sont différentes de celles des répliques. Cela peut montrer une micro répartition ou une hétérogénéité, ce qui explique qu'il est recommandé de prélever un ou plusieurs autres échantillons. Les échantillons doivent être réfrigérés lors du transport, à l'abri de la lumière et livrés au laboratoire dans les 24 heures suivant l'échantillonnage.

3.2.2. Conditionnement et conservation des échantillons de sédiments

Le choix du conditionnement des sédiments est lié à la nature et à la fonction des analyses à effectuer. Pour cela, il est recommandé de consulter le laboratoire d'analyse pour assurer une manutention et une conservation correcte des échantillons. Il faut donc que les informations suivantes doivent être clairement marquées sur le récipient et le couvercle le cas échéant :

- le code d'identification de la station d'échantillonnage
- la date, l'heure, les coordonnées et l'intervalle de section, c'est-à-dire la profondeur des sédiments à partir de laquelle la section a été prélevée de l'échantillon.

L'objectif de la conservation est de garder l'intégralité du matériau prélevé tel qu'il était sur le site par rapport aux paramètres à analyser. Les éléments à doser peuvent se biodégrader, se volatiliser, s'oxyder, être réduits ou se dégrader par photolyse pendant le stockage.

Par conséquent, une attention particulière doit être apportée aux processus et aux conditions de stockage nécessaire pour éviter toute altération. Il est nécessaire aussi de conserver les boues, les sédiments et les matières en suspension juste après le prélèvement de l'échantillon.

4. Aspect réglementaire de gestion des sédiments et approche éco toxicologique

L'immersion présente la filière majoritaire pour l'évacuation des sédiments les moins contaminés issus de dragage d'entretien. Elle concerne environ 50 millions de m³ en France chaque année [In vivo, 2010] (Figure 7), soit 95% restitués au milieu aquatique et 5% gérés à terre [Idra, 2011].

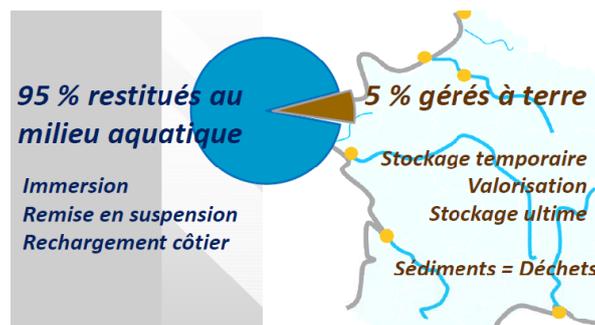


Figure 7: Pourcentages d'immersion des sédiments de dragage en France [Idra, 2011]

4.1. Les aspects réglementaires

Plusieurs réglementations encadrent les activités de dragage et la gestion des sédiments au niveau international et national :

Au niveau international

- **La convention OSPAR**, « convention pour la protection du milieu marin de l'Atlantique nord-est », est issue de la fusion de la convention d'Oslo de 1972, traitant de la pollution marine par les opérations d'immersion, et de la convention de Paris, traitant de la pollution d'origine terrestre. Signée en 1992 par 15 États européens ainsi que l'Union européenne, elle n'est entrée en vigueur qu'en 1998. La convention fixe des lignes directrices sur la prévention et la suppression de la pollution provenant de sources telluriques, mais ne définit pas de seuil de tolérance. Aussi, cette convention fixe la prévention et la suppression de la pollution par les opérations d'immersion et d'incinération en mer dont l'immersion peut être autorisée.

En 2009, OSPAR a publié un guide sur la gestion des sédiments de dragage, qui définit des critères pour le choix des sites d'immersion. 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 l'établissement d'une

surveillance permanente du milieu marin. Elles visent en outre à déterminer pour les éléments métalliques et les substances les plus toxiques, les valeurs et les seuils guides permettant de caractériser les sédiments qui méritent une attention particulière.

- **Le protocole de Londres (1996)**, version actualisée de la convention de Londres sur la prévention de la pollution de mer résultante de déchets, mentionne le « déblai de dragage ».
- La version adoptée en 1995 du texte du protocole immersion de la **convention de Barcelone** (convention de mer régionale sur la zone Méditerranée) répond à la même catégorie qu'OSPAR « matériaux de dragage ». Cette convention vise à protéger l'environnement marin et côtier de la Méditerranée tout en encourageant des plans régionaux et nationaux contribuant au développement durable.

Ces trois instruments organisent les immersions selon un principe général commun d'interdiction de toutes substances. Des catégories d'exception sont énumérées (système de liste inversée), pour lesquelles l'immersion est subordonnée à l'obtention d'une autorisation matérialisée par un permis délivré par une autorité nationale compétente. C'est l'Etat qui désigne l'autorité nationale compétente pour délivrer des permis.

Au niveau national

La législation française interfère à plusieurs niveaux sur les opérations d'entretien des infrastructures portuaires. En effet, l'ensemble des opérations de dragage et de valorisation des sédiments marins ou estuariens est soumis à des obligations réglementaires, issues de différents textes de loi, regroupés au sein du code de l'environnement, et qui donnent lieu à des procédures et des autorisations spécifiques avant toutes formes de travaux (Figure 8).

- ***Règlementations de la gestion des sédiments dans l'eau***

Les filières de destination des sédiments dépendent de la teneur de pollution. En effet l'arrêté interministériel du 23 décembre 2009 complétant l'arrêté du 9 août 2006 définit les valeurs de référence prises en compte lors de l'analyse de sédiments marins présents en milieu naturel et précise les seuils de concentration pour les contaminants organiques et inorganiques. L'arrêté définit huit éléments traces métalliques et sept congénères

polychlorobiphényles (PCB) où sont définis les seuils de contamination. Les valeurs seuils pour l'immersion en mer des sédiments marins sont présentées dans le Tableau 2.

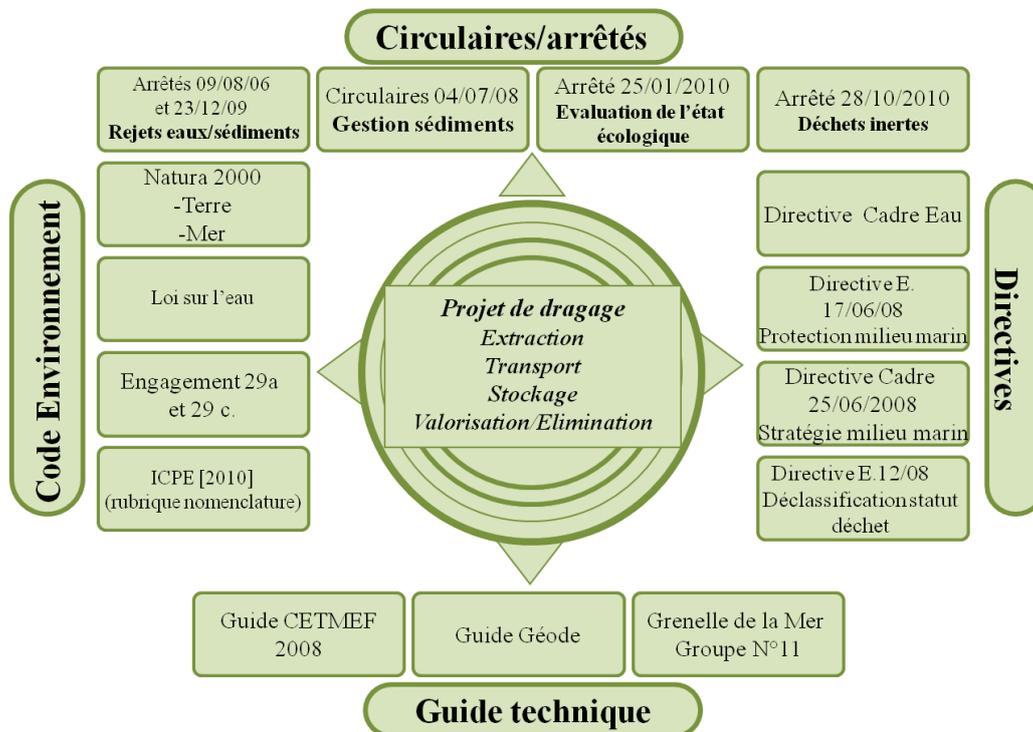


Figure 8: Principales réglementations de remise en suspension ou immersion et gestion à terre des sédiments

Métaux	Unités	N1	N2	PCB	N1	N2
Arsenic (As)	mg/kg	25	50	PCB 28	0,025	0,05
Cadmium (Cd)	mg/kg	1,2	2.4	PCB 52	0,025	0,05
Chrome (Cr)	mg/kg	90	180	PCB 101	0,050	0,10
Cuivre (Cu)	mg/kg	45	90	PCB 118	0,025	0,05
Mercure (Hg)	mg/kg	0,4	0.8	PCB 138	0,050	0,10
Nickel(Ni)	mg/kg	37	74	PCB 153	0,050	0,10
Plomb (Pb)	mg/kg	100	200	PCB 180	0,025	0,05
Zinc (Zn)	mg/kg	276	552	PCB Totaux	0,500	1

Tableau 2: Niveaux référentiels relatifs aux métaux lourds et PCB (arrêté du 23/12/ 2009)

La signification des deux niveaux de valeurs guide, pour les métaux et les PCB sont définie comme suit :

- **au-dessous du niveau N1** : l'immersion est autorisée sans étude particulière, et l'impact potentiel est neutre ou négligeable.
- **si le niveau est au-dessus du niveau N1** des études plus approfondies que la simple analyse physico-chimique doit être réalisée. Ces études souvent complétées par un test

éco toxicologique permettant d'évaluer l'impact du matériau sur les organismes vivants.

- **au-dessus du niveau 2** l'immersion est susceptible d'être interdite, sauf si cette solution représente la solution la moins préjudiciable pour l'environnement.

La circulaire du 4 juillet 2008 relative à la procédure concernant la gestion des sédiments lors des travaux ou d'opérations impliquant des dragages maritimes et fluviaux précise les notions de curage et de dragage ainsi que le droit applicable aux techniques de remise en suspension.

L'arrêté du 25 janvier 2010 relatif aux méthodes et critères d'évaluation de l'état écologique de l'aspect chimique et du potentiel écologique des eaux de surface désigne notamment 10 substances et les normes de qualités environnementales correspondantes.

Règlementations de la gestion des sédiments à terre

Cette partie traite des engagements suivant le livre bleu :

L'engagement 29a : « Mettre en place une filière de traitement des boues et de récupération des macro-déchets associés » et **l'engagement 29c** : « faire évoluer les pratiques d'entretien des estuaires, espaces portuaires et chenaux d'accès et les modalités de gestion des sédiments et boues de dragage afin de :

- développer la recherche appliquée et les approches innovantes dans la valorisation des sédiments de dragage (e.g. réutilisation) et améliorer les connaissances pour l'analyse et techniques de tri et de traitement de dépollution, dont l'extraction des macro-déchets ;
- favoriser le développement de filière économique de traitement, y compris le traitement à terre des rejets les plus pollués, les activités portuaires associées et l'examen des conditions de financement »

La réglementation existante (Figure 9) permet de prendre en compte la protection de l'environnement et de la santé humaine. Il est toutefois nécessaire de préciser les modalités d'application de la réglementation, de développer des méthodes opérationnelles pour caractériser les sédiments et des guides d'application permettant d'améliorer leur valorisation à terre. Selon l'article L.541-1 du code de l'environnement, le sédiment est considéré comme un déchet. A ce stade, l'article L.541-2 définit que le propriétaire du sédiment doit identifier la dangerosité du matériau pour l'environnement et l'homme.

La caractérisation des sédiments se fait selon des essais de lixiviation selon la norme NF EN 12457-2. La comparaison des résultats de ces essais avec les seuils définis dans le décret n°2002-540 du 18 avril 2002, permettront de définir la classification des matériaux en décharge de catégorie de classe 1, 2 ou 3 correspondants respectivement aux déchets dangereux, non dangereux et inertes [JOCE, 2003]. Selon le même décret, les sédiments sont répertoriés en deux annexes : annexe 1 qui définit les propriétés rendant les déchets dangereux (H1 à H14), annexe 2 qui définit le sédiment comme déchet selon les rubriques 170505 pour les boues de dragage contenant des substances dangereuses et 170506 pour les autres boues de dragage.



Figure 9: Règlementation de la gestion des sédiments non immergeable à terre [DREAL, 2011]

La Figure 10 résume les principales réglementations de gestion des sédiments dans l'eau et à terre.

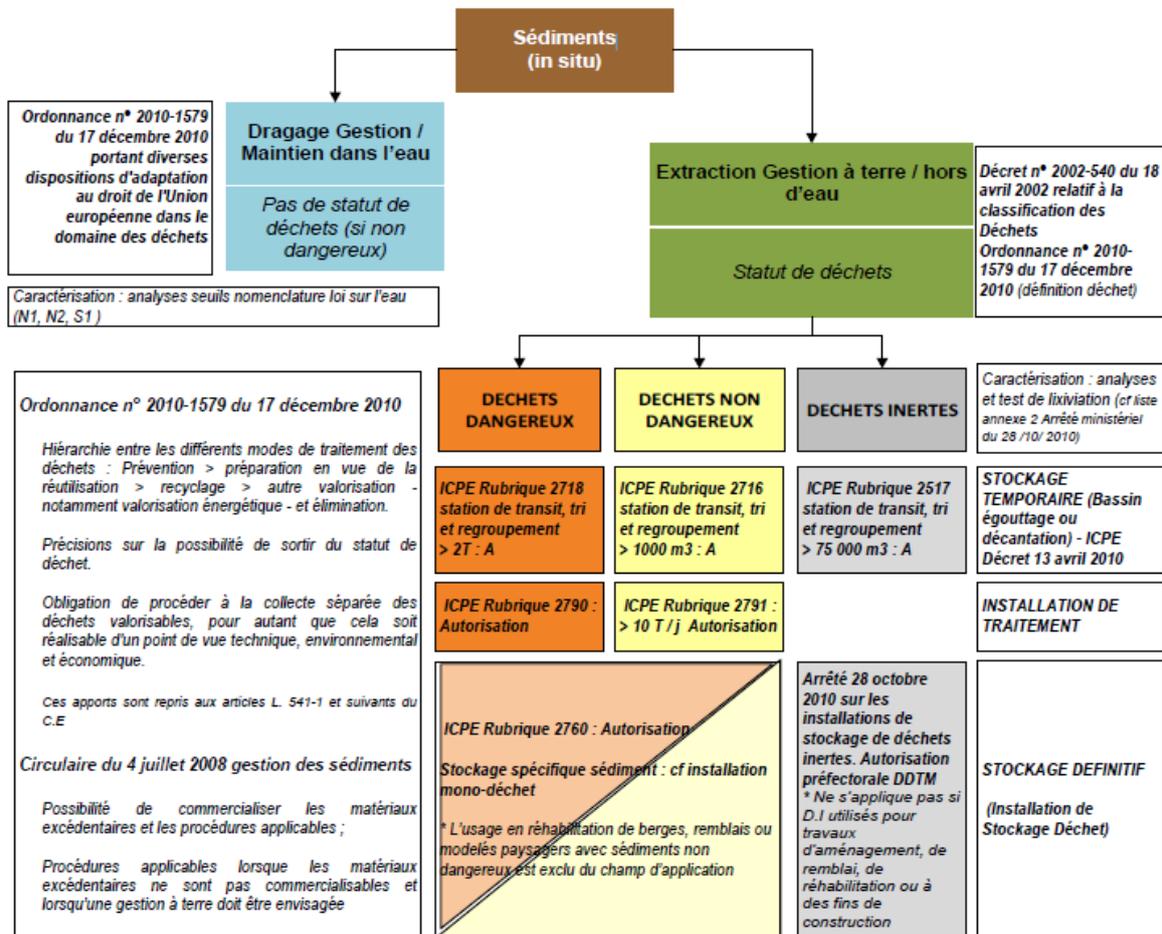


Figure 10: Installations classées pour la protection de l'environnement [ICPE, 2010]

4.2. Approche éco toxicologique et développement des bio-tests

L'éco toxicologie est définie comme étant l'étude des effets des polluants sur les écosystèmes, plus particulièrement l'impact des substances toxiques sur la dynamique des populations.

Concernant l'essai éco-toxicologique, la proposition de base est d'insérer le sédiment et de suivre les principes de base dans le contexte général de protocole « déchet » issu des travaux de l'INERIS de 1998 optimisé en 2000 et 2006 en prenant en compte la toxicité de l'éluât (toxicité aigüe) « c'est une toxicité à court terme liée à des fortes concentrations en substances chimiques, l'essai se fait à l'aide de Vibro Fischeri et Daphnia Magna » et toxicité chronique « cette toxicité désigne un effet nocif résultant de doses répétées au cours d'une période relativement longue ») et la toxicité de la matrice brute (toxicité aigüe et sub-létale).

5. Réglementation des sédiments vis-à-vis de l'application en technique routière - Caractérisation environnementale

5.1. Introduction

Dans la logique du développement durable, la valorisation des sédiments de dragage dans des conditions environnementales maîtrisées est nécessaire afin de réduire l'incidence globale liée à l'utilisation de ce matériau en technique routière. La gestion des matériaux de dragage représente aujourd'hui un vrai problème en raison des fortes quantités de sédiments chaque année. Cette gestion est complexe, évolutive, et demande des moyens importants [Boutin, R., 2000].

L'évaluation de l'acceptabilité environnementale est un sujet qui a fait l'objet de débats et de groupes de travail afin de mettre au point un guide méthodologique pour l'acceptabilité des matériaux alternatifs en techniques routières.

Une version définitive a été mise au point et apparue en octobre 2012. Ce guide est destiné aux professionnels des travaux publics et aux industriels qui souhaitent étudier les possibilités de valorisation, en technique routière, des déchets qu'ils détiennent ou qu'ils produisent.

A ce stade, il est intéressant d'introduire les termes employés dans ce guide, comme :

- le matériau alternatif (MA), défini comme « tout matériau élaboré à partir d'un déchet et destiné à être utilisé, seul ou en mélange avec d'autres matériaux, alternatifs ou non » dans notre cas d'étude il s'agit du sédiment marin de Dunkerque.
- le matériau routier, présenté comme « tout matériau alternatif ou mélange d'un matériau alternatif avec d'autres matériaux, alternatifs ou non-répondant à un usage routier » il s'agit dans le cas de notre étude d'un matériau routier dans lequel on a ajouté des sédiments marins.

Les hypothèses de calcul sur lesquelles sont basées les valeurs seuils sont :

- transfert des eaux souterraines au sein d'un milieu poreux
- interactions nulles des polluants avec les sols traversés ;
- écoulements verticaux depuis la source (l'ouvrage) vers la cible (les eaux souterraines) ;
- valeurs moyennes des pluies efficaces pour le territoire métropolitain ;

- respect de la qualité des eaux destinées à la consommation humaine.

Actuellement, plusieurs recherches sont orientées pour trouver des solutions à cette problématique. Cette gestion dépend du degré de pollution des sédiments et les méthodes envisagées pour le traitement. Les sédiments de dragage représentent une véritable filière de traitement et de valorisation en tant que matière première dans le domaine de génie civil.

5.2. Étude méthodologique d'évaluation environnementale

Le guide méthodologique présente une démarche permettant de valider l'utilisation d'un matériau alternatif pour un usage routier. De point de vue impact environnemental et comportement géotechnique, cette approche peut être schématisée comme sur la Figure 11.

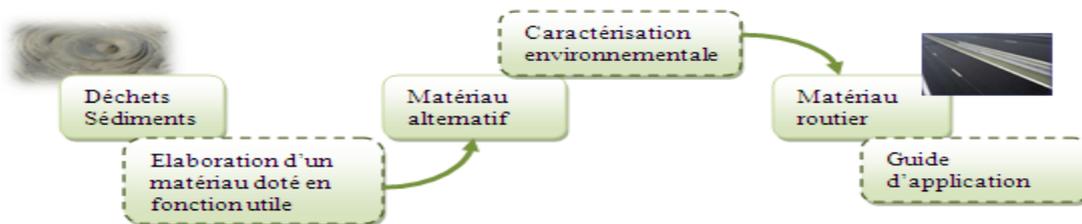


Figure 11: Processus d'évaluation environnementale pour une valorisation en technique routière.

La démarche d'évaluation de l'impact environnemental envisage trois niveaux d'investigation permettant de monter le risque que présentent les matériaux alternatifs vis-à-vis de l'environnement (Figure 12).

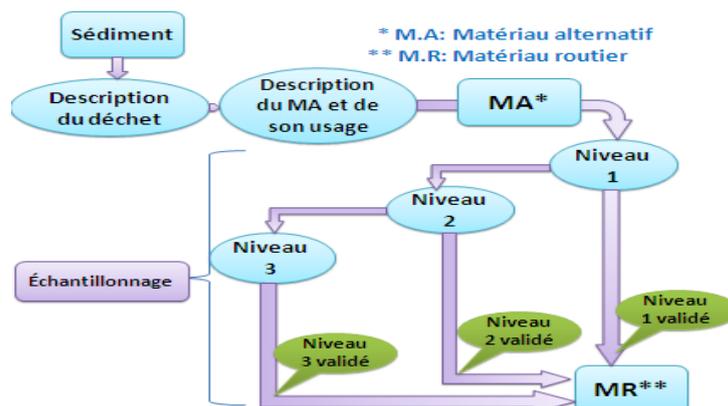


Figure 12: Diagramme de caractérisation environnementale

❖ Niveau 1

Le niveau 1 permet de fournir des informations sur la variabilité et justifier l'acceptabilité en technique routière des matériaux sur la base d'essais de lixiviation NF EN 12457 « 2 ou 4 selon la granulométrie du matériau » et de doser certains paramètres en

contenu total pour caractériser le relargage du matériau alternatif, ainsi que pour le matériau routier comparer les valeurs obtenues aux valeurs seuils présentées dans le Tableau 3.

<i>Quantité relarguée cumulée à L/S=10 l/kg (Essai de lixiviation NF EN 12-457-2)</i>				
<i>Éléments</i>	<i>Valeur à respecter par au moins 80% des échantillons (mg/kg de MS)</i>	<i>Valeur à respecter par au moins 95% des échantillons (mg/kg de MS)</i>	<i>Valeur à respecter par au moins 100% des échantillons (mg/kg de MS)</i>	<i>Valeurs limites à ne pas dépasser en lixiviation pour être candidat à une utilisation TR (mg/kg de MS)</i>
As	0,5	1	1,5	2
Ba	20	40	60	100
Cd	0,04	0,1	0,12	1
Cr	0,5	1	1,5	10
Cu	2	4	6	50
Hg	0,01	0,02	0,03	0.2
Mo	0,5	1	1.5	10
Ni	0,4	0,8	1.2	10
Pb	0,5	1	1.5	10
Sb	0,06	0,12	0.18	0.7
Se	0,1	0,2	0.3	0.5
Zn	4	8	12	50
Fluorure	10	20	30	150
Chlorure	800	1600	2400	15000
Sulfate	1000	2000	3000	20000
Fraction soluble	4000	8000	12000	60000
pH	5,5-12,5	5,5-12,8	5,5-13	
<i>Valeurs limites à ne pas dépasser en contenu total pour être candidat à une utilisation en T.R (mg/kg de MS)</i>				
COT	3000		6000	
PCB	1		1	
BETX	6		6	
HCT	500		500	
HAP	50		50	

Tableau 3 : Valeurs limites à ne pas dépasser en lixiviation pour être candidat à une utilisation en technique routière [AMATR, Sétra, 2012]

Si pour l'ensemble des échantillons, les résultats obtenus sont inférieurs ou égaux aux valeurs limites, l'acceptabilité est donc validée. Par contre, si au moins un dépassement est enregistré, l'acceptabilité est donc invalidée, il convient donc d'envisager la réalisation de la caractérisation environnementale niveau 2.

❖ Niveau 2

Le niveau 2 permet de justifier l'acceptabilité en technique routière sur la base d'essais de percolation NF CEN/TS 14405 en comparant les résultats obtenus aux valeurs seuils présentées dans le Tableau 4. De même, si les valeurs obtenues sont inférieures ou égales aux

seuils proposés, l'acceptabilité est validée. Si un dépassement est enregistré, l'acceptabilité est invalide, donc il faut passer au niveau 3.

Éléments	Scénario « sous-couche de chaussée ou d'accotement revêtus »	Scénario « remblais technique ou d'accotement recouverts »
	Quantité relarguée cumulée à L/S=10 (essai de percolation NF CEN/TS 14405 (mg/kg de MS)	Quantité relarguée cumulée à L/S=10 (essai de percolation NF CEN/TS 14405 (mg/kg de MS)
As	0,8	0,5
Ba	56	28
Cd	0,32	0,16
Cr	4	2
Cu	50	50
Hg	0,08	0,04
Mo	5,6	2,8
Ni	1,6	0,8
Pb	0,8	0,5
Sb	0,4	0,2
Se	0,5	0,4
Zn	50	50
Fluorure	60	30
Chlorure	10000	5000
Sulfate	10000	5000
pH	5,5-12,5	5,5-12,8

Tableau 4: Valeurs limites en percolation (niveau 2) permettant de justifier certaines utilisations visées par le présent guide [AMATR, Sétra, 2012]

❖ Niveau 3

Le niveau 3 se base sur une étude spécifique si les conditions positives n'ont pas été tirées des deux premières. Cela permet de laisser la possibilité de justifier l'acceptabilité du matériau alternatif par une étude spécifique. Le choix des expériences 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+A ;
- le devenir des polluants émis par l'ouvrage via leur transfert dans la nappe et dans le sol doit être étudié afin de montrer que l'usage routier envisagé permet un niveau suffisant de protection de l'environnement.

6. Recherche développée en valorisation du sédiment marin en génie civil

Les quantités importantes de sédiments générées chaque année doivent être gérées dans des conditions respectueuses de l'environnement. Cette filière d'élimination est favorisée par la loi française pour que seuls les déchets ultimes soient conservés en installation de stockage.

Actuellement, la quasi-totalité des matériaux de dragage est immergée en mer. Mais, dans la perspective d'évolution des lois, les sédiments marins pourraient être valorisés en BTP, comme sable de remblaiement, graves routières ou encore comme béton de sable [Abriak, N.E, et al., 2003]. En génie civil, la valorisation des sédiments est souvent envisagée dans les matériaux après traitement. L'école des mines de Douai s'est entourée donc de divers partenaires industriels, institutionnels et universitaires afin de mener des projets de recherche de valorisation des sédiments sous diverses formes : technique routière (couche de fondation, couche de base...), granulats artificiels, formulation des bétons (Figure 13). Dans la démarche de cette valorisation et avec l'actualisation et l'apparition des nouvelles réglementations, la valorisation suit généralement le schéma suivant : valorisation des sédiments marins en un matériau alternatif tout en respectant les exigences réglementaires, environnementales et écotoxicologiques.

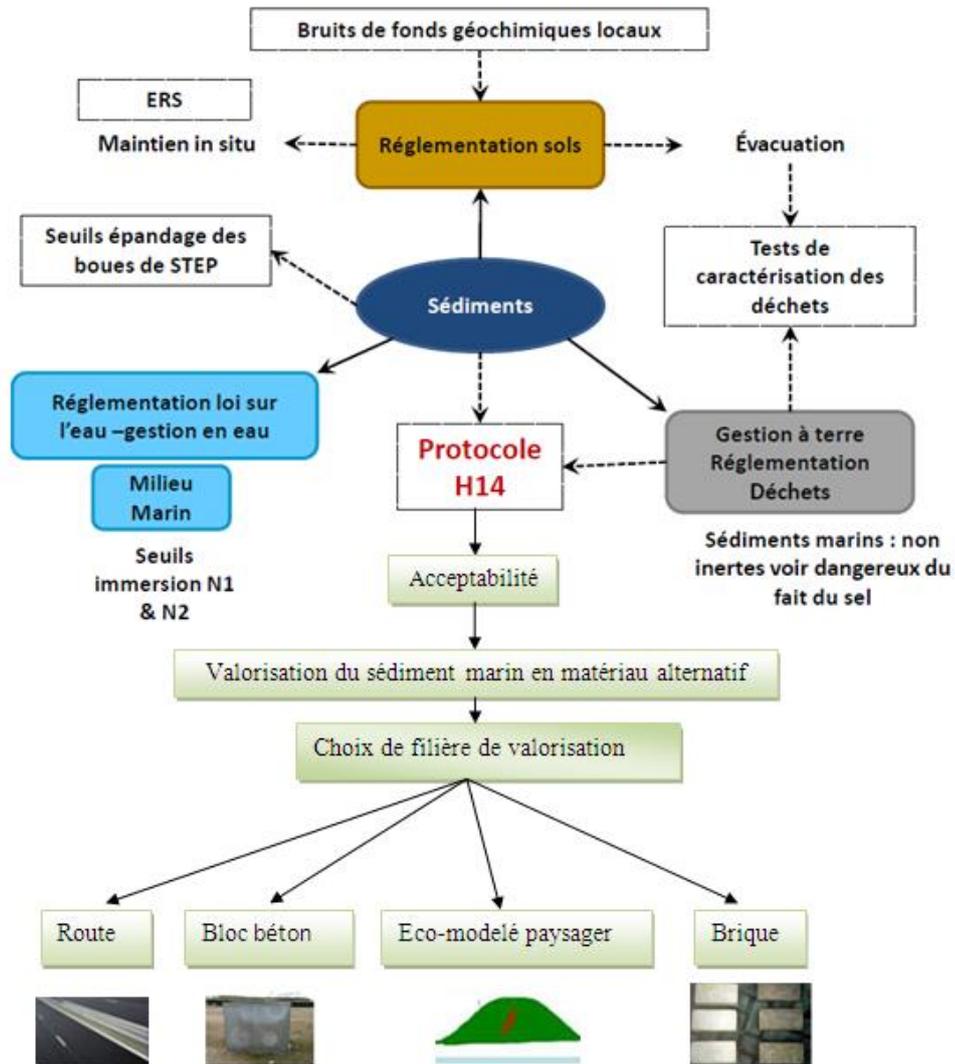


Figure 13: Schéma général de valorisation des sédiments en matériau alternatif pour une utilisation en génie civil

6.1. Valorisation des sédiments marins en technique routière

La valorisation des sédiments marins en technique routière a fait l'objet de plusieurs études. Le laboratoire de l'école des mines était parmi les premiers laboratoires en France qui a abordé cette problématique. Dans le cadre d'une première approche de valorisation des sédiments marins en technique routière en 2005, l'école des mines de Douai a validé une démarche méthodologique élaborée en laboratoire par la réalisation d'une planche expérimentale d'une surface de 300 m² (50 m de long et 6 m de large) (Figure 14). L'objet de sa réalisation était de valider une technique expérimentale en remplissant les exigences des normes et les guides d'application selon l'aspect mécanique et environnemental, de vérifier la faisabilité de mise en place des engins de chantier, d'atteindre les proportions de sédiments

marins fixées en laboratoire et de suivre l'évolution de la structure pendant une année sur le plan mécanique et environnemental [Dubois, V., 2006].



Figure 14: Réalisation d'une planche expérimentale au GPMD en 2005 [Dubois, V., 2006]

Plusieurs travaux ont été réalisés sur la valorisation des sédiments pollués après avoir été traités par des procédés industriels, dans le domaine de construction routière [Scordia, P.Y., 2008 ; Tribout, C., et al., 2011 ; Miraoui, M., 2010 et Dia, M., 2013].

6.2. Valorisation des sédiments marins en granulats artificielles

En France, la consommation des granulats représente 376 millions de tonnes de provenant essentiellement de gisements terrestres [UNPG, 2009] (Figure 15).

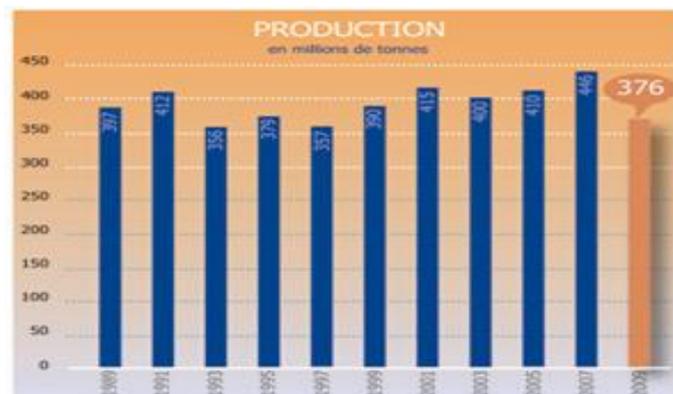


Figure 15: Consommation des granulats en génie civil [UNPG, 2009]

Devant les difficultés croissantes d'accès aux gisements terrestres, les producteurs de granulats ont diversifiés leurs ressources, notamment par les granulats marins (sables et sédiments marins). Ces matériaux extraits en mer possèdent des caractéristiques semblables à celles des granulats de roches meubles extraits des carrières terrestres. Ils sont donc une ressource complémentaire, en particulier pour les régions littorales et les grands centres urbains qui peuvent être desservis par voie d'eau. Les villes de Dunkerque, Lille, Nantes et Bordeaux satisfont une bonne part de leurs besoins en matériaux grâce aux granulats marins.

Cette production présente 7 millions de tonnes par an soit 2% de la production française des granulats. Dans le cas des sédiments, la fraction sableuse (sables marins) peut être utilisée directement comme granulat. D'autre part les sédiments fins ont fait l'objet de travaux pour la confection de granulats [Brakni, S., 2008]. Les granulats confectionnés qui ont pour but de lutter contre l'érosion côtière, seront les produits de cette filière. Les granulats artificiels sont élaborés à base de sédiments marins. Ces sédiments sont ensuite intégrés au sein d'un mélange eau et ciment, permettant de former une matrice cimentaire (Figure 16). Ces granulats seront immergés dans le cadre de plusieurs applications (lutte contre l'érosion et stabilisation dunaire ou sous forme de couche d'usure, protection des pieds de jetées et digues ou éventuellement, en fonction de leurs caractéristiques, en sous-couche routière)



Figure 16: Granulats à base de sédiment marins [Brakni, S., 2008]

6.3. Valorisation des sédiments marins dans le secteur briqueterie

Le potentiel minéral des sédiments de dragage peut être valorisé en fabrication des briques (Figure 17) par traitement thermique réalisé [Harmer, K., et al., 2002 ; Lafhaj, Z., et al., 2007, Samara, M., et al., 2009]. De nombreux tests ont été lancés en Wallonie en Belgique, depuis quelques années. Le problème majeur à résoudre réside dans la nécessité d'obtenir un matériau présentant une teneur en eau suffisamment basse pour éviter les gonflements lors de la phase de chauffage et donc la fissuration des briques. A Hambourg en Allemagne, les silts sont séparés des sables dépollués. La teneur en eau est ensuite abaissée par un processus au cours duquel le matériau est asséché en système fermé.

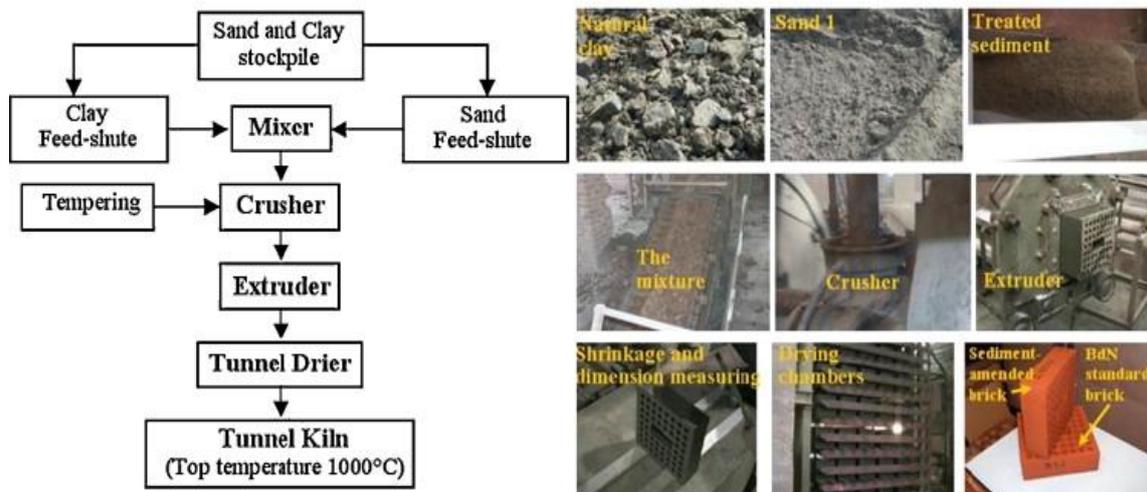


Figure 17: Processus de fabrication des briques à base de sédiments [Samara, M., et al., 2009]

D'autres travaux de recherche ont été réalisés au laboratoire de génie civil et environnemental à l'institut de technologie de Georgia aux Etats unis, où ils ont utilisé le sédiment du port du Savannah comme matière première dans la production des briques [Mezencevoca, A., et al., 2012] (Figure, 18).



Figure 18: Brique à base de sédiment de Savannah [Mezencevoca, et al., 2012]

6.4. Valorisation des sédiments marins en production de mortier et de béton

Agostini, F., et al., 2007 ont étudié le comportement des sédiments marins traité par un procédé industriel dans les matériaux cimentaires par la production des mortiers. L'étude en laboratoire était focalisée sur l'évaluation de la faisabilité pratique de l'incorporation des sédiments dans le mortier par l'étude des contraintes liés à l'absorption d'eau par les granulats, la détermination des caractéristiques de base du mortier (porosité, masse volumique), évaluation de l'influence des conditions de cure et enfin l'étude des performances mécaniques. D'après plusieurs études de formulation, les chercheurs ont montré la faisabilité

de l'utilisation des sédiments traités comme matière première pour la confection de matériaux à matrice cimentaire. D'autres études de valorisation de sédiment marin en matrice cimentaire ont été réalisées par la production d'un béton de sable à base de sédiment, l'étude consistait à trouver un mélange optimal possible entre le sable de dragage et un ou plusieurs ajouts avec du ciment et de l'eau afin d'obtenir des caractéristiques mécaniques satisfaisantes. Le sable de dragage étudié est d'origine marine; il s'agit du sable déposé à la Capitainerie Ouest du Port Autonome de Dunkerque [Zri, A., et al., 2009]. D'après les auteurs, les résultats obtenus ont montré la possibilité de valorisation du sable de dragage et du sédiment fin dans les bétons de sable.

6.5. Valorisation des sédiments marins en éco-modelé paysager

La valorisation des sédiments non immergeables en merlon éco-modelé paysager représente une nouvelle voie de valorisation afin de minimiser la quantité des sédiments dragués. Le GPMD dans sa démarche de développement durable a aménagé jusqu'à présent cinq merlons éco-modelés paysagers en vue de favoriser la biodiversité (Figure 19).



Figure 19: Merlon éco modelé paysager au GPMD

Conclusion

L'accumulation des sédiments dans les ports est devenue un enjeu économique et environnemental majeur. Les quantités draguées sont très importantes, les opérations de dragage génèrent 6,5 Mm³ de sédiments dans le GPMD. Le réseau européen de recherche sur les sédiments [Sednet, 2011] estime la quantité de matériaux dragués en Europe entre 200 et 250 Mm³ par an.

Ces sédiments sont potentiellement pollués par les métaux lourds (Hg, Pb, Zn...) et des polluants organiques (PCB, HAP...). Les filières de gestion telles que la valorisation ou l'immersion permettent d'évacuer une partie importante, mais ces voies ne sont pas toujours possibles en raison des risques liés à la toxicité. Ce niveau de contamination reste très variable selon les sites de prélèvement. Vu la complexité de gestion de ces derniers, d'autres pistes d'orientation restent à développer sur le plan de gestion des sédiments dragués mais aussi sur les méthodes de dépollution, l'amélioration de leurs caractéristiques pour l'utilisation dans le domaine de génie civil.

La filière de valorisation des sédiments en technique routière présente une voie très intéressante vu que les entreprises routières ont déjà de l'expérience dans la valorisation des déchets (mâchefer MIOM, cendres volantes,...) et d'autre part ce secteur est parmi les plus gros consommateurs de granulats (215 millions tonnes en France) [UNPG, 2009] ce qui permet de diminuer un important volume de sédiments.

Dans le cadre du projet SEDIMATERIAUX une étude de caractérisation physique, environnementale et mécanique du sédiment marin du GPMD fera l'objet de cette thèse afin de classer le sédiment étudié et appréhender la valorisation dans le domaine routier par la construction d'une première route à base de sédiment marin.

Partie 2
Valorisation des sédiments
en technique routière

Chapitre 1

Caractérisation des sédiments marins du GPMD

1. Caractérisation des sédiments marins non immergeable avant et après séchage naturel

1.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à l'identification des sédiments marins du Grand Port Autonome de Dunkerque **GPMD** prélevés du bassin Est DARSE 6. Une carte d'identité est dressée avant d'envisager une valorisation en matériau routier. La caractérisation physico-chimique, environnementale et minéralogique permet de définir l'aspect physique et les principaux minéraux présents ainsi que le taux de pollution du sédiment marin.

En construction routière, une valorisation du sédiment marin en couche de fondation est envisagée. Le matériau développé sera utilisé dans la construction d'une route à Dunkerque. Un suivi de l'impact environnemental et du comportement mécanique sera également entrepris.

1.2. Présentation du site de prélèvement du sédiment et mode traitement

Situé sur la Mer du Nord, à 40 kilomètres de Douvres, côté britannique, et à 10 kilomètres de la frontière belge, le GPMD, est un port côtier de haute mer très proche du rail de séparation des trafics qui franchissent le détroit du Pas de Calais sur la route maritime la plus fréquentée du monde avec pas moins de 600 navires par jour. Le GPMD se compose de deux parties: le port Ouest et le port Est (Figure 20) (le canal des Dunes reliant ces deux zones portuaires), et s'étend sur 7000 hectares et sur 17 kilomètres de façade en fond de mer et deux entrées maritimes. La plus ancienne située, à l'est, accueille des navires de 14,2 mètres de tirant d'eau et est contrôlée par des écluses. L'autre à l'ouest, plus récente, est soumise à la marée et permet d'accueillir des navires ayant jusqu'à 22 mètres de tirant d'eau. Le volume d'activité commercial place ce port au troisième rang national.

De fait, l'ensemble des infrastructures portuaires nécessite des dragages d'entretien de fréquence plus ou moins rapprochée pour restaurer les tirants d'eau indispensables à la navigation, à la sécurité et, au bon fonctionnement du port. Dans ce cadre, le GPMD est

engagé à des opérations de dragage et d'élimination des sédiments qui conduisent à l'extraction de plusieurs millions de m³ de sédiments annuellement. Suite à la construction du futur terminal méthanier, ce sont 6,3 millions de m³ par an, qui devront être dragués, dont 500 000 m³ ne sont pas immergeables. Le GPMD souhaite en retraiter la majeure partie, dans le cadre de sa démarche de développement durable. La qualité des sédiments est suivie de près, car le port souhaite atteindre un bon état écologique de ses eaux à l'horizon 2021 [Gregoire, P., 2012].

En 2007, un arrêté préfectoral « de dragage et d'autorisation de gestion à terre des sédiments non immergeables du Port Est de Dunkerque » a été établi offrant ainsi au GPMD la possibilité de draguer et gérer à terre les sédiments du port Est. Cet arrêté vient compléter ceux relatifs à « l'autorisation pour le dragage du Port Est de Dunkerque et l'immersion des produits de dragage ». Les sédiments marins de la Darse 6 Watier (non-immmergeables) font l'objet de cette étude.

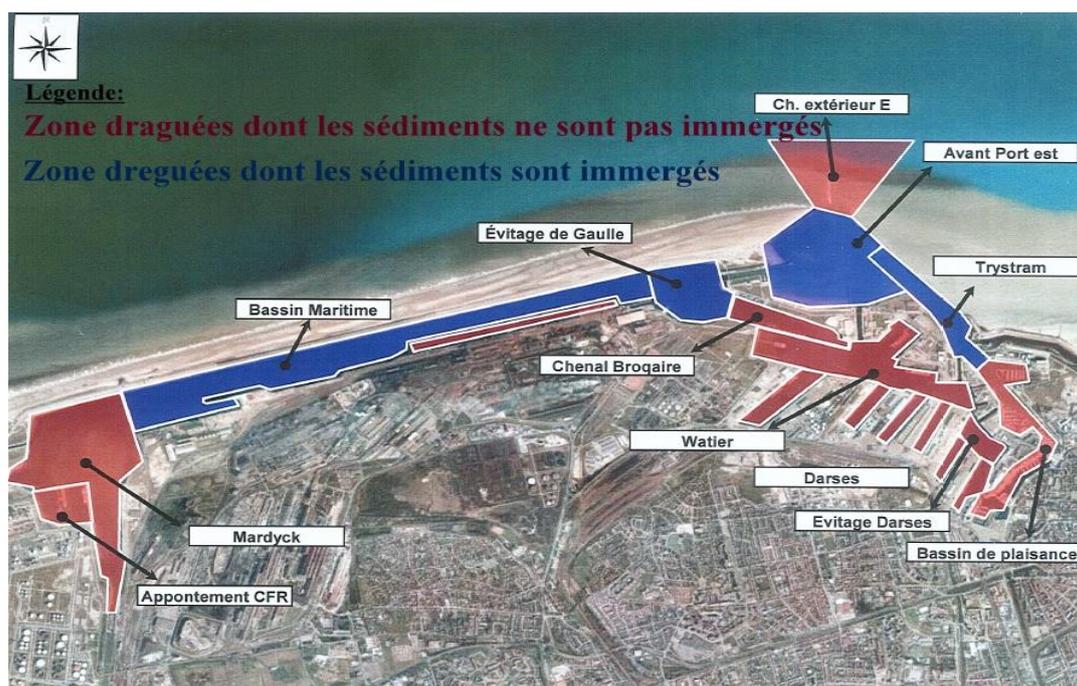


Figure 20: Localisation géographique des zones draguées et immergées du GPMD

Solution de gestion à terre : Traitement par séchage naturel

De nombreuses techniques de traitement de sédiments marins existent, mais peu d'entre elles sont adaptées aux objectifs de valorisation à grande échelle. Cependant, parmi les solutions envisagées, la mise en œuvre de cette technique permet de réduire les teneurs en eau et du sel et aussi à stabiliser les sédiments afin d'offrir plus de solutions de réemploi et

facilitant le stockage et la manipulation éventuels des produits. La solution de séchage naturel dans une lagune de décantation présente un premier traitement des sédiments marins. En effet les sédiments dragués hydrauliquement sont refoulés dans la lagune de décantation. Une fois égouttés, les sédiments sont disposés en andain à l'intérieur des bassins de décantation pour parfaire leur séchage.

Dans le cadre de notre étude, le site de traitement des sédiments non immergeables est composé de trois lagunes de décantation qui sont créées dans le cadre du projet de valorisation des sédiments marins du GPMD (Figure 21). Ce site permet la décantation des sédiments dans de bonnes conditions. Son aménagement a été prévu pour permettre l'intervention de machines de chantier pour le retournement des andains et le chargement des vases asséchées. Le transfert des vases asséchées vers les différentes filières de valorisation se fait plus facilement via des camions.



Figure 21: Trois bassins de décantation au GPMD

1.3. Sédiments : Prélèvement et stockage des sédiments marins avant et après décantation

Dans le cadre de cette thèse, l'étude expérimentale a été réalisée sur des sédiments provenant des 3 bassins de décantation. Les sédiments marins ont été dragués et refoulés dans les bassins en novembre 2010. Les sédiments marins ont été prélevés à des profondeurs différentes par rapport à la surface. Ils sont ensuite conservés et conditionnés dans des fûts en plastique hermétiques de 50 litres. Deux campagnes de prélèvement ont eu lieu, à quatre mois d'écart (Tableau 5). Après chaque campagne de prélèvement, une homogénéisation de tous

les fûts a été réalisée dans un grand bac afin d'obtenir un matériau représentatif. Deux échantillons du prélèvement de sédiment marin ont été étudiés : P1 et P2 (Figure 22 et 23).

<i>Point de prélèvement</i>	<i>Période</i>	<i>Quantité</i>
<i>Port Est « darse 6 » (P1)</i>	<i>Mars 2011</i>	<i>12 futs de 50 litres</i>
<i>Port Est « darse 6 » (P2)</i>	<i>Juin 2011</i>	<i>12 futs de 50 litres</i>

Tableau 5: campagne de prélèvement des sédiments P1 et P2.



Figure 22: Sédiment P1



Figure 23: Sédiment P2

Pour les caractéristiques chimiques et afin de conserver les propriétés originales des sédiments, nous avons placé, pour chaque prélèvement, un fût hermétique à 4°C et à l'abri de la lumière. Ce protocole est recommandé par l'agence de l'eau. Pour le reste des échantillons soient 11 fûts, ils sont conservés dans une salle froide à l'abri de la lumière.

2. Caractérisations physiques des sédiments marins bruts P1 et P2

La caractérisation physique des sédiments englobe la détermination de la teneur en eau, du taux de matière organique, de la valeur du bleu de Méthylène, de la distribution granulométrique, de la masse volumique des particules solides et des limites d'Atterberg.

Ces paramètres sont importants pour le secteur de valorisation envisagée. Cette caractérisation nous permettra de comprendre l'évolution des propriétés physiques des sédiments due au séchage naturel.

2.1. Teneur en eau naturelle W(%)

La teneur en eau représente un paramètre important, car elle définit l'état hydrique du matériau et intervient directement lors de la valorisation en matériaux routiers. Les sédiments marins étudiés sont des matériaux (couleur noire) très fins et saturés en eau pour P1, tandis que les sédiments du deuxième prélèvement P2 sont de couleur grise et contiennent moins d'eau. La phase organique présente une sensibilité à la température ; pour cela, les sédiments ont été séchés en étuve à 40°C, 60°C et 105°C selon la norme NF P 94-050, micro-onde NF P 94-049-1 et lyophilisation afin de comparer la perte de masse.

La teneur en eau est définie en (%) comme le rapport de la masse humide sur la masse sèche.

$$W(\%) = \frac{\text{masse eau}}{\text{masse sèche}} \cdot 100 \quad \text{Eq. 1}$$

Les résultats moyens obtenus du prélèvement P1 et P2 sont reportés dans la figure 24 :

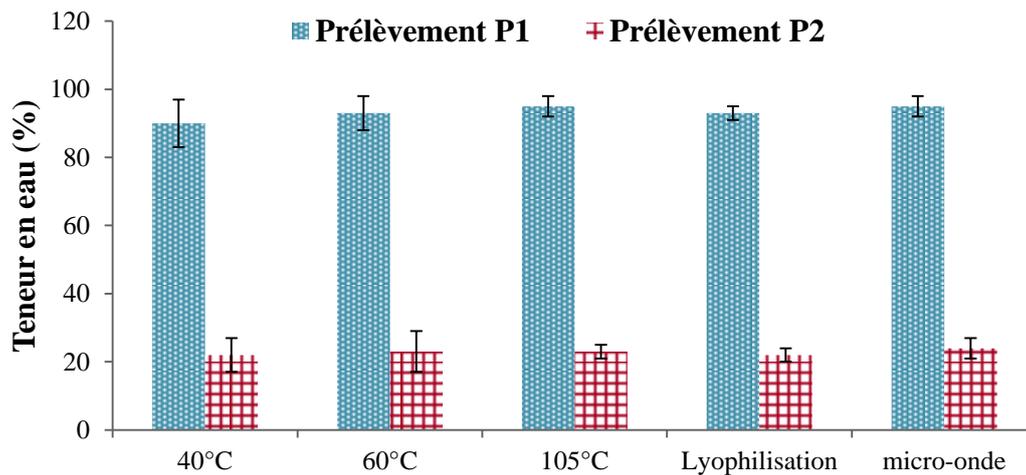


Figure 24: Teneur en eau des sédiments marins bruts (P1 et P2)

L'opération de séchage des sédiments marins P1 et P2 a été réalisée aux différentes températures (40°C, 60°C, 105°C, micro-onde et lyophilisation) en respectant le temps de séchage afin de comparer l'effet de température. Les résultats de sédiment P1 présentent une teneur plus élevée que P2 ce qui s'explique par le fait que les sédiments du P2 ont été déshydratés à l'air libre durant les quatre mois qui séparent les deux prélèvements. L'effet de séchage naturel a ainsi rendu le produit pelletable et a transformé les sédiments non immergeables saturés en eau pour apporter une valeur ajoutée. Dans les deux cas d'étude, on a observé une légère différence entre les teneurs à 40°C, 60°C, 105 ° C et la lyophilisation. Ceci peut s'expliquer par la très faible destruction de la matière organique ou d'autres éléments volatils entre 40°C et 105°C.

A titre de comparaison des teneurs en eau mesurées sur les sédiments du GPMD des années précédentes par Tran, N.T., 2009 et Miraoui, M., 2011 (Tableau 6), les résultats montrent que les teneurs sont très élevées, mais restent variables et dépendent des conditions climatiques (hiver, été), des méthodes de prélèvement, de la nature du matériau et du site de prélèvement.

<i>Sédiment</i>	<i>Teneur en eau (%)</i>
<i>Miraoui, 2010 (sédiment juin 2006/juin2008)</i>	222
<i>Tran, 2009(sédiment 2005)</i>	152

Tableau 6: Teneur en eau des sédiments du port de Dunkerque [Miraoui, M., 2011; Tran, N.T., 2009]

2.2. Teneur en matières organiques

Les matières organiques sont indésirables dans le matériau dans le secteur de valorisation envisagé. Elles présentent une résistance mécanique faible mais surtout un caractère évolutif. La détermination de la proportion de matière organique présente un point essentiel pour l'identification du matériau. Pour se faire, nous avons utilisé la norme NF EN 12879 qui consiste à déterminer la perte de masse du sédiment séché entre 40°C et 105°C, puis à effectuer la calcination des échantillons à une température de 450°C pendant 3h (Figure 34). Dans cette étude les mesures ont été réalisées sur 3 échantillons séchés à 40°C, 60°C, 105°C et lyophilisé afin d'estimer l'influence de la température de séchage préalable. La Figure 25 présente l'évolution de la teneur en matières organiques en fonction des températures de séchage.

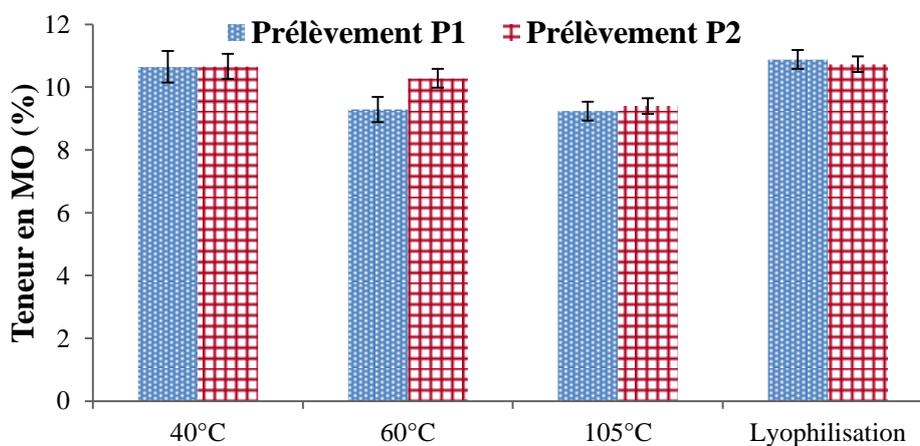


Figure 25: Teneur en matière organique des sédiments marins brus P1 et P2.

Les résultats de cette étude montrent une faible différence de perte de masse obtenue sur le sédiment marin préparé selon différentes méthodes, mais montrent aussi une importante fraction organique présente dans les deux matériaux P1 et P2. En comparaison avec d'autres études sur le même site, les sédiments P1 et P2 présentent des valeurs de l'ordre de 9,2 pour P1 et de 9,4 pour P2, qui sont presque similaires par rapport aux sédiments prélevés en 2006 qui présentent une teneur 8,6 % [Thran, N.T., 2009] et 8,3 % en 2004 [Dubois, V., 2006].

2.3. Valeur au bleu de méthylène (VBS)

Les minéraux argileux présents dans les sédiments sont principalement issus de l'altération physico-chimique des roches. La structure cristalline feuilletée des argiles leur confère un ensemble de propriétés de comportement liées à leur affinité pour l'eau (appelée activité), ce qui entraîne des phénomènes de gonflement, de plasticité ou de cohésion [Dupain, R., et al., 2000]. L'essai au bleu de méthylène permet d'apprécier l'activité argileuse. Dans cette étude, l'essai est réalisé suivant la norme NF P 94 068. La Figure 26 présente les valeurs au bleu de méthylène des deux sédiments exprimés en g/100g de matière sèche.

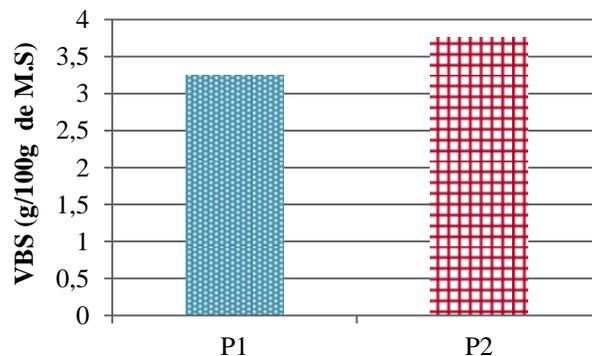


Figure 26: Argilosité des sédiments marins P1 et P2

D'après le « guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme » [GTR, 1992], les seuils de la classification en fonction de la valeur au bleu de méthylène sont définis dans la Figure 27:

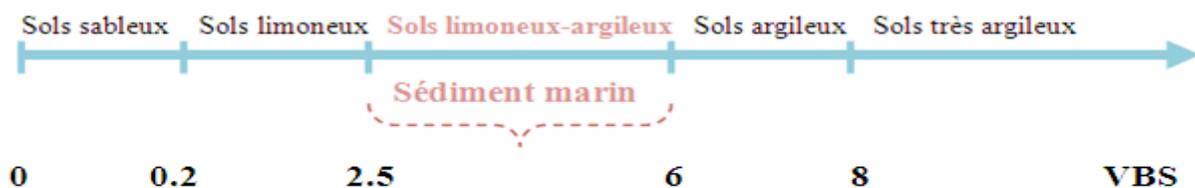


Figure 27: Classification des sédiments marins en fonction de VBS [GTR, 1992]

D'après les résultats du VBS, les deux sédiments P1 et P2 se classent dans la catégorie de sols limoneux argileux. A titre de comparaison, les valeurs mesurées par [Tran, N.T., 2008; Dia, M., 2013] sur les sédiments marins du port Est de Dunkerque dans une étude antérieure étaient respectivement de 3,4 et 3,2 g/100g de M.S.

2.4. Analyse granulométrique

Le sédiment est une matrice relativement hétérogène constituée d'eau, de matériaux inorganiques et de composés anthropiques [Bonnet, 2000]. Généralement le sédiment est décrit par sa composition minéralogique et sa structure. La granulométrie présente donc un paramètre nécessaire pour la classification des sédiments P1 et P2, non seulement pour la définition du matériau lui-même, mais aussi leur utilisation et valorisation en matériaux en technique routière.

Dans notre étude la distribution est déterminée par voie humide afin de séparer les particules les plus fines des plus grosses en premier lieu. La détermination de la courbe granulométrique des sédiments P1 et P2 a été réalisée à l'aide de deux méthodes :

- Granulométrie laser à l'aide d'un appareil laser Coulter LS 230, cet appareil permet de déterminer la taille des particules comprises entre 0,04 μm et 2000 μm . L'essai est réalisé selon la norme NF ISO 13320-1. Le principe de cet appareil se base sur la diffraction d'un faisceau laser par des particules mises en suspension dans une solution de concentration 5 % d'hexamétaphosphate de sodium pour améliorer la défloculation. Le principe d'essai consiste à analyser la tache de diffraction créée par les particules lorsqu'elles coupent le faisceau laser. Pour chaque prélèvement, trois échantillons de sédiments bruts (P1 et P2) ont été analysés. La Figure 28 montre deux courbes granulométriques du sédiment brut de P1 et P2.

- Sédimentométrie par densimètre associée au tamisage : Pour les particules fines, une analyse granulométrique par sédimentation a été effectuée, le principe de cet essai consiste à analyser le passant à 80 μm par sédimentation suivant la norme NF P 94-057. Le matériau est tamisé par voie humide, après siphonage ce dernier est mis en étuve jusqu'à dessiccation puis pilonné dans un mortier pour le désagréger. Après une imbibition préalable, le matériau est mis en suspension avec une solution pour assurer la défloculation. Par ailleurs, la détermination de la fraction supérieure à 80 μm a été réalisée par la technique de tamisage. La méthode utilisée consiste à un criblage à sec sur des tamis à mailles carrées suivant la norme NF P 94-040. L'analyse par tamisage a été réalisée sans exercer des contraintes mécaniques

susceptibles de briser les amas. La Figure 28 montre deux courbes granulométriques par sédimentation associée au tamisage de deux sédiments P1 et P2.

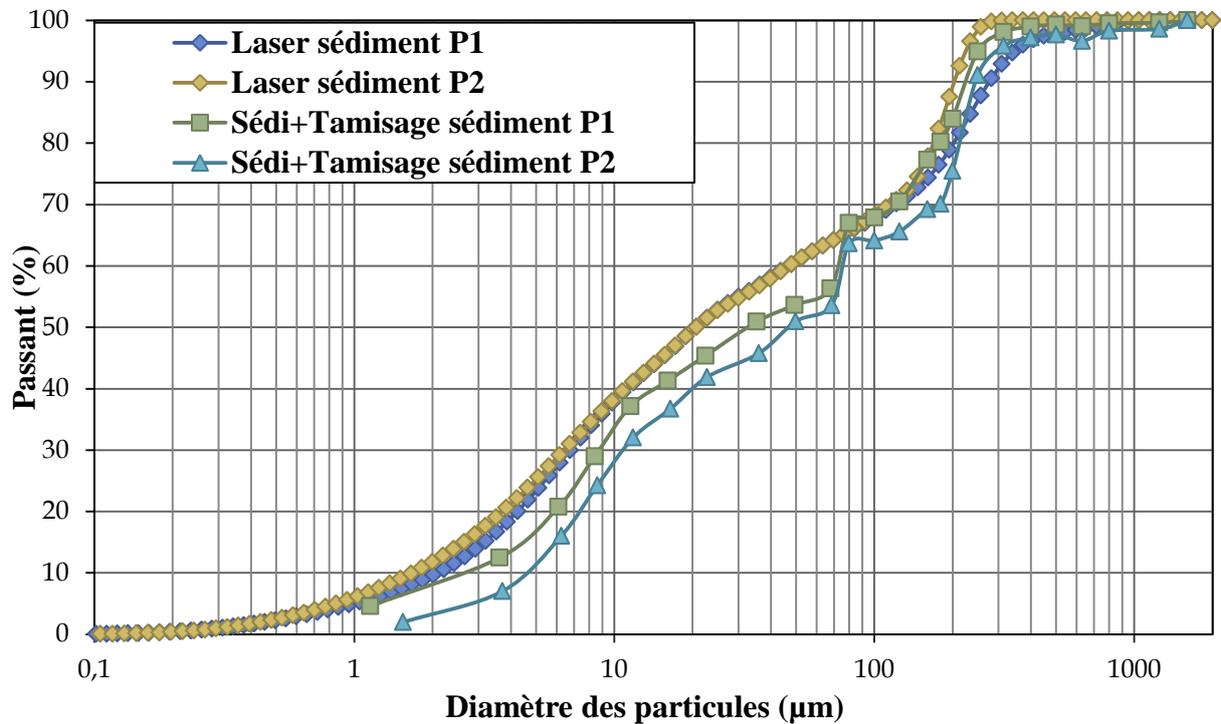


Figure 28: Distribution granulométrique par granulométrie laser et par sédimentation associée par tamisage des sédiments P1 et P2

Selon la classification de GTR, on peut classer les sédiments comme indique le Tableau 7 :

<i>Paramètres</i>	<i>Granulométrie laser</i>		<i>Granulométrie par sedimentométrie + tamisage</i>	
	<i>P1</i>	<i>P2</i>	<i>P1</i>	<i>P2</i>
<i>Prélèvement</i>				
<i>Grains < 2µm (argile) (%)</i>	10	12	9	5
<i>2µm < Grains < 63µm (limon) (%)</i>	55	53	46	49
<i>> 63 µm (sable fin) (%)</i>	35	35	45	46
<i>D₁₀</i>	1,9	1,8	2,6	4,5
<i>D₃₀</i>	6,9	6,7	8,9	11
<i>D₆₀</i>	48	48	74	75
<i>C_u</i>	24	26,6	30,8	16,6
<i>C_c</i>	0,49	0,51	0,41	0,35

Tableau 7 : Caractéristiques granulométriques des sédiments marins P1 et P2.

D'après les résultats des analyses, les fractions 0/2mm, sur laquelle a été effectuée l'analyse granulométrique au laser, représentent 100% de la masse brute des sédiments P1 et P2. Les résultats mettent en avant le caractère extrêmement fin du matériau, la distribution granulométrique montre un net décalage de la courbe d'analyse granulométrique au laser vers les particules fines. Le coefficient d'uniformité Cu des sédiments P1 et P2 avec les deux

méthodes est très supérieur à 6, ce qui indique une répartition très étalée. D'un point de vue géotechnique, les sédiments P1 et P2 se classent comme matériau limoneux d'après la méthode par sédimentation associée au tamisage et comme catégorie du limon silteux d'après la méthode par granulométrie laser selon le diagramme triangulaire des classifications des sols fins (Figure 29).

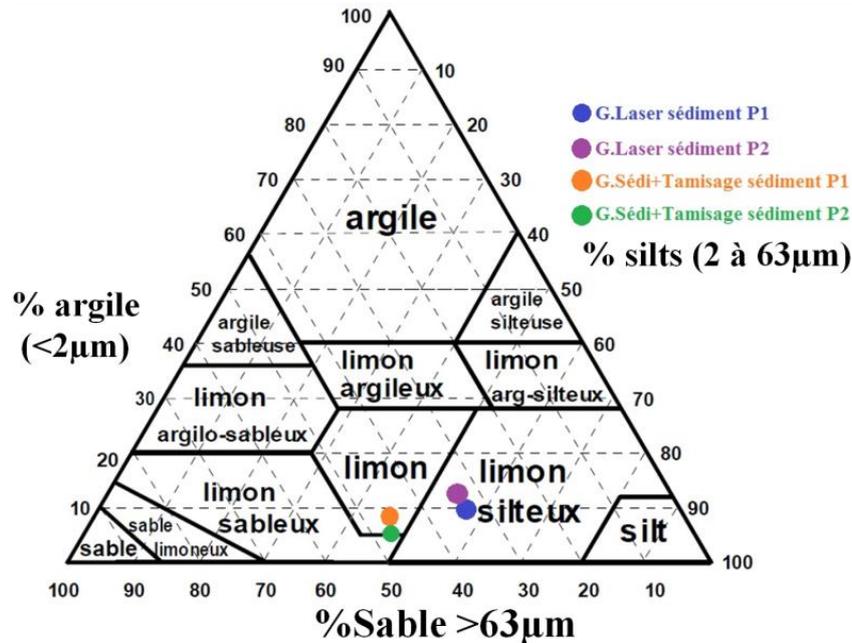


Figure 29: Classification triangulaire des sédiments marins P1 et P2.

Les deux sédiments présentent des granulométries assez proche, et ce malgré l'éloignement des points et de la période de prélèvement. En outre, les deux modes d'analyse, nous permettent de constater que globalement les sédiments P1 et P2 se composent d'une importante fraction silteuse d'environ 60% et d'au moyen 12 % d'éléments inférieurs à 2 μm .

A partir de ces analyses, il semble difficile de tirer une conclusion sur la correspondance ou la divergence des résultats obtenus par les deux méthodes. Cela s'explique par la différence entre les principes de mesure et les techniques utilisées.

La granulométrie laser se base sur une analyse optique qui dépend de l'orientation des particules vis-à-vis du rayon laser. Par contre, l'essai par sédimentation se base sur la loi de Stokes, qui dépend de la taille des particules et de la masse volumique des grains solides. Sur la base des résultats obtenus par les deux méthodes, la composition des deux sédiments en argile, limons et sable ont presque le même ordre de grandeurs que celles obtenus par Dia, M., 2013.

2.5. Masse volumique des particules solides (ρ_s)

La masse volumique des particules solides « masse volumique absolue » a été mesurée par un pycnomètre à hélium « MICROMERITICS » de type Accupyc 1330 dont le principe repose sur la loi des gaz parfaits. La mesure de ce paramètre est importante, elle permet de déterminer les courbes de saturation en fonction de la teneur en eau dans les sédiments. L'étude a été réalisée sur P1 et P2 broyés et séchés à 40°C. Pour chaque échantillon 20 mesures à différentes pressions sont effectuées. Les résultats d'analyse sont présentés dans le Tableau 8:

<i>Prélèvement</i>	ρ_s (g/cm ³)
<i>P1</i>	2,55
<i>P2</i>	2,56

Tableau 8: Masse volumique des particules solides des sédiments marins P1 et P2.

Les mesures indiquent que la masse volumique absolue de P2 est équivalente à celle de P1. En comparant les valeurs de la masse volumique des particules solides des sédiments P1 et P2 (2,55 t/m³ / 2,56 t/m³) par rapport aux matériaux standards (2,6 à 2,7 t/m³) on remarque qu'il y a un écart, cela peut être traduit par la présence des matières organiques dans les deux sédiments. Avec le même principe, nous avons réalisé deux mesures de la masse volumique absolue de sédiments marins calcinés à 450°C. Les résultats de l'analyse sont présentés dans le Tableau 9.

<i>Prélèvement</i>	ρ_s (g/cm ³)
<i>P1</i>	2,68
<i>P2</i>	2,75

Tableau 9: Masse volumique absolue des sédiments marins P1 et P2 calcinés à 450°C.

Après une série d'essais les résultats montrent une augmentation de la masse volumique absolue des sédiments après calcination à 450°C pour atteindre 2,68 (g/cm³) pour P1 et 2,75 (g/cm³) pour P2, ce qui semble proche et comparable avec les valeurs des matériaux standards comme les sables silteux dont les valeurs sont comprises entre 2,6 et 2,8 g/cm³.

2.6. Limites d'Atterberg des sédiments P1 et P2

Les sols fins sont sensibles à l'eau, leur teneur en eau peut donc changer (diminuer avec la sécheresse, augmenter avec l'humidité). Les teneurs en eau correspondant aux passages de ces différents états définissent pour un sol « les limites d'Atterberg ». Les limites d'Atterberg présentent des teneurs en eau correspondant à des transitions particulières de la consistance d'un matériau. La détermination des limites d'Atterberg permet de prévoir le comportement

du matériau sous l'action des variations hydriques. La décroissance de la teneur en eau d'un matériau montre le passage de l'état liquide vers l'état plastique jusqu'à l'état solide.

On définit pour les sols fins :

- la limite de liquidité (W_L) est la limite qui sépare l'état plastique de l'état liquide ; elle sera déterminée selon deux procédures différentes : limite de liquidité à la Coupelle de Casagrande « NF P 94-051 » ou limite de liquidité au cône «NF P 94-052-1».
- la limite de plasticité (W_P) est la limite qui sépare l'état plastique de l'état solide ; elle est déterminée par la méthode du rouleau « NF P 94-051 ».
- pour l'indice de plasticité (I_p) est défini par la différence entre la limite de liquidité et la limite de plasticité I_p :

$$I_p = W_L - W_P \quad \text{Eq. 2}$$

Cette différence définit l'indice de plasticité qui est le domaine situé entre l'état liquide et l'état solide. La plasticité est une propriété caractéristique des éléments très fins ou argileux du sol.

L'essai est réalisé selon la norme NF P 94-051. Les résultats obtenus sont présentés dans la Figure 30, indiquant les limites d'Atterberg des deux sédiments P1 et P2 :

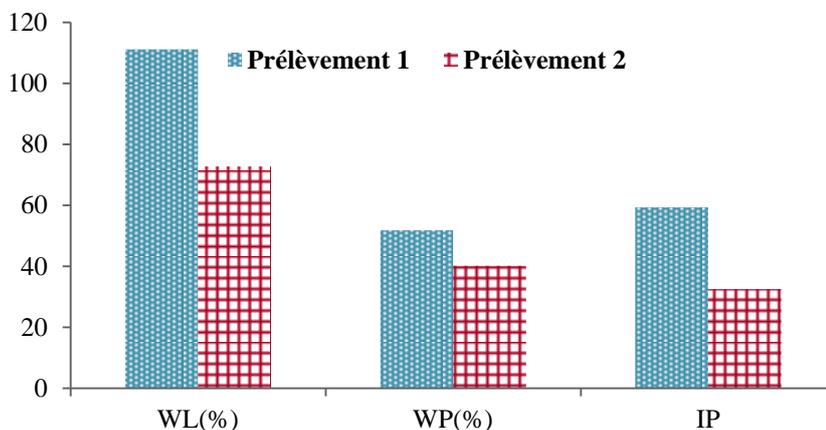


Figure 30: Limites d'Atterberg des sédiments marins P1 et P2.

D'après les résultats obtenus, on peut observer que la limite de liquidité du sédiment P1 est largement supérieure à celle de P2. Pour la limite de plasticité, la différence observée est plus faible. Cette différence observée peut s'expliquer par la différence entre les teneurs en eau et les types de matières organiques. La détermination de W_L et I_p permet de situer les sols dans un diagramme de plasticité de Casagrande : les deux sédiments marins P1 et P2 sont associés à la classe de matériaux dits argile organique et limon minéral de haute

compressibilité. Ces résultats nous confirment que l'effet de séchage naturel permet de réduire la plasticité des sédiments de dragage. La Figure 31 illustre une comparaison des résultats issus d'autres études sur le comportement des sédiments. L'analyse de ces résultats montre que les sédiments étudiés ont tendance à se regrouper autour de la ligne A du diagramme de Casagrande définie par :

$$I_p = 0,73 (W_L - 20) \quad \text{Eq. 3}$$

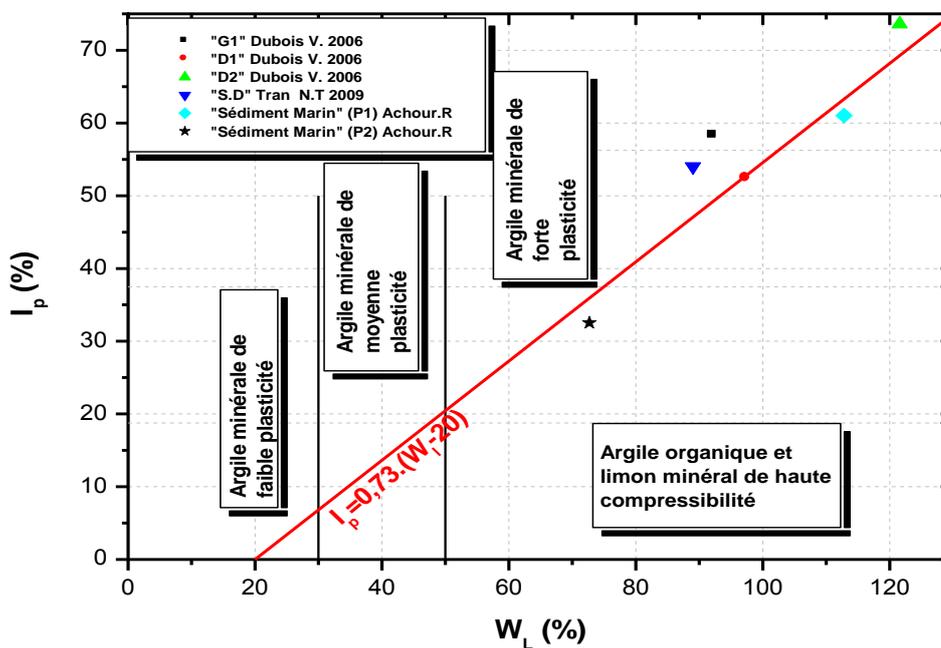


Figure 31: Diagramme de plasticité de Casagrande pour différents sédiments marins

3. Caractérisation de portance

L'évaluation de l'aptitude au compactage des sédiments marins a été effectuée à l'aide de l'essai Proctor. Il existe deux types d'essais Proctor à deux énergies de compactage différents : Proctor normal pour les constructions des remblais et Proctor modifié pour la réalisation des couches d'assises.

L'essai consiste à compacter un échantillon de matériau dans un moule normalisé, à l'aide d'une dame dans le but d'étudier et mesurer sa teneur en eau ainsi que son poids spécifique sec après compactage selon un processus bien déterminé. L'essai Proctor réalisé est

de type Proctor modifié conformément à la norme NF P 94 093. Pour chacune des valeurs de teneur en eau considérées, on détermine la masse volumique sèche du sédiment et on trace la courbe des variations de cette masse en fonction de la teneur en eau. Chaque point tracé sur la courbe représente un essai de compactage. Le sommet de cette courbe est un point important puisqu'à la masse volumique maximale du sol sec ($\rho_{d_{max}}$), correspond la teneur en eau optimale (W_{OPM}).

Pour la portance, des mesures de poinçonnement avec un piston de 19,3 cm³ de section sur les moules compactés ont été réalisées afin d'estimer l'indice de portance immédiat (IPI) conformément à la norme NF P 94 078. Le Tableau 10 présente les valeurs de densité sèche en g/cm³ et d'IPI en % à l'optimum. Les Figures 32 et 33 exposent les courbes Proctor et IPI du prélèvement P1 et P2. On constate que la densité sèche a augmenté avec l'ajout de l'eau pour atteindre une valeur maximale de 1,55 g/cm³ pour P1 et de 1,59 pour P2.

La densification des deux sédiments est liée à l'humidification et la réorganisation des grains qui optimise la compacité. Les teneurs en eau optimale sont respectivement de 20,8% et de 19,8 pour P1 et P2 pour atteindre les densités sèches optimales. Au-delà de ces teneurs en eaux optimales, la densité sèche diminue avec l'augmentation de la teneur en eau. L'analyse de l'IPI montre que les valeurs décroissent rapidement avec l'augmentation de la teneur en eau après l'optimum pour les deux sédiments, ce qui nous conduise à dire que les sédiments P1 et P2 sont sensibles aux variations hydriques.

Sédiment	$W_{OPM}(\%)$	$P_d(g/cm^3)$	IPI à $W_{OPM}(\%)$
Prélèvement 1	20,8	1,53	17
Prélèvement 2	19,8	1,59	31

Tableau 10 : Résultats de l'essai Proctor et IPI pour les sédiments marins bruts P1 et P2

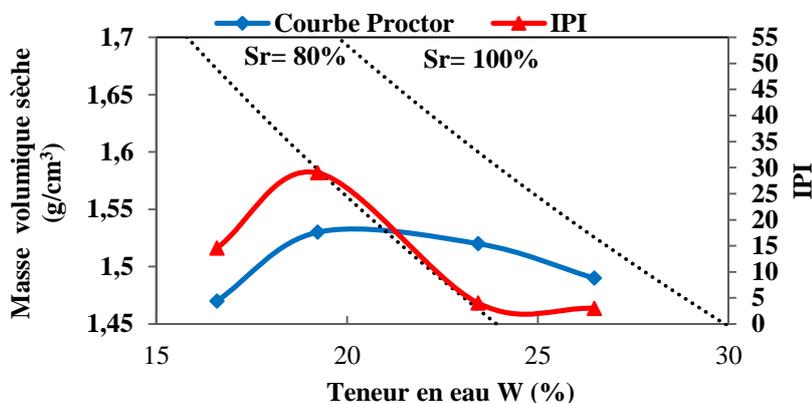


Figure 32: Evolution de la masse volumique sèche et de l'IPI en fonction de la teneur en eau du sédiment P1

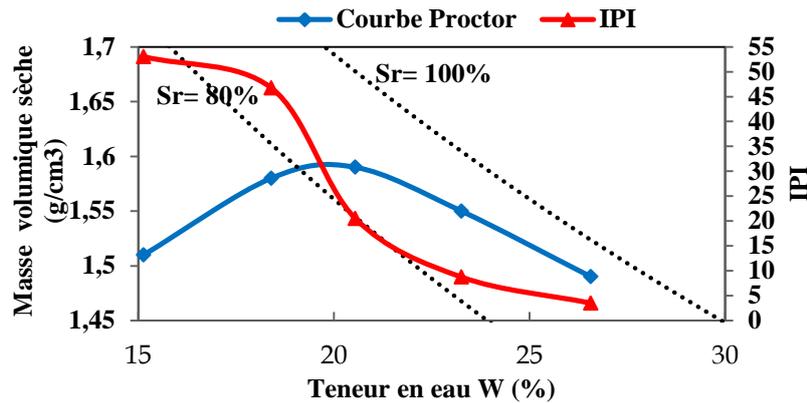


Figure 33: Evolution de la masse volumique sèche et de l'IPI en fonction de la teneur en eau du sédiment P2

D'après l'étude des deux sédiments, on constate que le sédiment marin P2 présente une meilleure performance au niveau de compactage que P1. L'amélioration de la capacité portante du sédiment P2 peut être due à l'effet de séchage naturel, mais les valeurs obtenues restent inférieures aux valeurs souhaitables pour une circulation des engins de terrassement définies par le GTR.

4. Analyse minéralogique

L'analyse minéralogique des sédiments est une étape importante, elle permet d'avoir une bonne connaissance du matériau par la détection des phases qui le constituent ainsi qu'une évaluation de l'influence de certains minéraux qui pourraient engendrer des problèmes pour la valorisation envisagée. L'analyse minéralogique a été étudiée à travers la détermination du carbone total dans les sédiments P1 et P2, l'analyse par fluorescence X permettant de déterminer la proportion des éléments chimiques présents dans ces sédiments et finalement l'analyse par diffraction aux rayons X « DRX » afin d'estimer les phases cristallines.

4.1. Teneur en carbone total

La teneur en carbone organique a été déterminée par le laboratoire Eurofins de Lille sur les deux sédiments, les teneurs sont respectivement de 3,4% et 2,6 % pour P1 et P2.

Pour le carbone minéral ou inorganique, les teneurs ont été estimées à travers des analyses thermogravimétriques consistant à la mesure de la variation de masse d'un

échantillon soumis à une variation de température de 100 à 1000°C dans une atmosphère contrôlée. Le pourcentage de carbone inorganique est obtenu donc par la relation suivante :

$$C_{in} (\%) = \frac{M_C}{M_{CO_2}} \times \frac{\text{Perte de masse}}{\text{Masse d'échantillon}} \times 100 \quad \text{Eq. 4}$$

Les analyses thermogravimétriques ont été réalisées sur 1000 mg de sédiment brut séché à 105°C. L'objectif est donc d'évaluer la perte de masse liée au carbone inorganique à une température élevée. La perte de masse, liée à la perte de carbone minéral, est mesurée entre 550°C et la phase de stabilisation. Après la réalisation des essais, nous avons eu les résultats suivants :

- ❖ pour le sédiment brut (P1) : $C_{inorganique} = \frac{12}{44} \cdot 12,80 = 3,49 \%$.
- ❖ pour le sédiment brut (P2) : $C_{inorganique} = \frac{12}{44} \cdot 11 = 3\%$.

En associant les résultats du carbone organique et l'analyse thermogravimétrique, on arrive à déterminer la teneur en carbone total présent dans les deux sédiments :

- ❖ teneur en carbone total pour le sédiment P1 : $C_{total} = 3,4 + 3,49 = 6,89 \%$.
- ❖ teneur en carbone total pour le sédiment P2 : $C_{total} = 2,6 + 3 = 5,6 \%$.

4.2. Analyse par fluorescence des rayons X

L'analyse par fluorescence X a permis de déterminer la quantité des éléments chimiques présents dans les deux sédiments. Les proportions des différents éléments sont obtenues en associant les proportions de carbone aux proportions des autres éléments mesurées par fluorescence X. Les résultats d'analyse sont présentés dans le Tableau 11. D'après l'analyse des sédiments P1 et P2, on remarque que le silicium, l'oxygène, l'aluminium, le fer et le calcium sont les principaux éléments présents dans la matrice des deux sédiments. Ces résultats montrent que les proportions sont quasiment égales dans les deux échantillons.

<i>Eléments</i>	<i>Sédiment P1 (%)</i>	<i>Sédiment P2 (%)</i>
<i>C</i>	6,86	5,60
<i>O</i>	47,67	47,57
<i>Na</i>	1,58	2,07
<i>Mg</i>	0,83	0,94
<i>Al</i>	3,72	3,77
<i>Si</i>	19,83	19,63
<i>P</i>	0,09	0,09
<i>S</i>	1,11	1,22
<i>Cl</i>	1,67	2,50
<i>K</i>	1,30	1,30
<i>Ca</i>	12,10	12,20
<i>Ti</i>	0,18	1,18
<i>Cr, Mn, Cu, Zn, Br, Zr, Ba Pb</i>	<i>Traces</i>	<i>Traces</i>
<i>Fe</i>	2,5	2,5

Tableau 11: Résultat de l'analyse par fluorescence X en pourcentages massiques des sédiments marins P1 et P2.

4.3. Détermination des phases cristallines par diffraction aux rayons X

La diffraction des rayons X a permis de déterminer les phases cristallines des sédiments P1 et P2. La reconnaissance des phases a été effectuée à l'aide d'un diffractomètre Siemens D8, quant à l'échantillon, il a été broyé à 40µm et passé au diffractomètre pendant 4 heures. La Figure 34 représente les diffractogramme des échantillons P1 et P2.

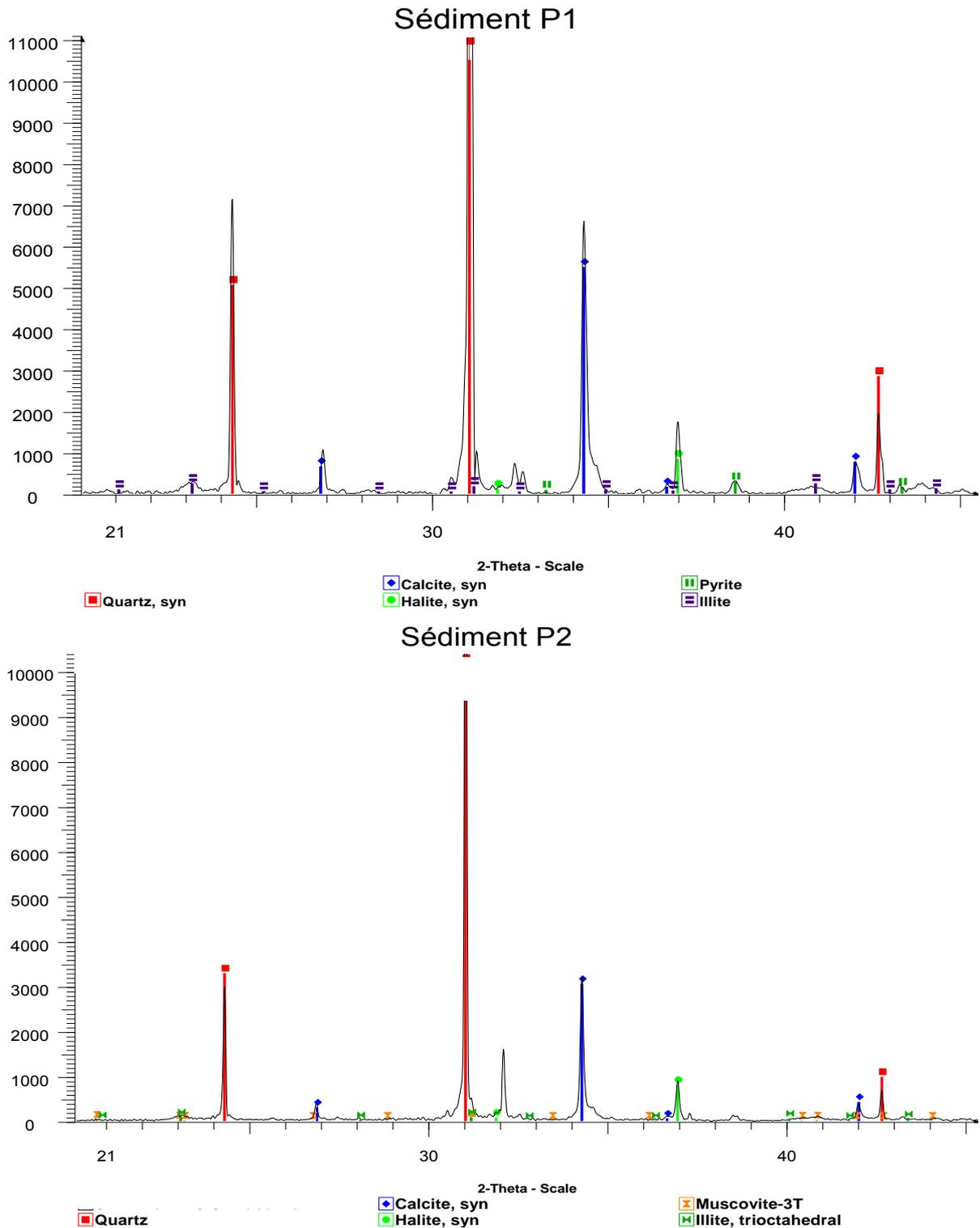


Figure 34: Phases cristallines des sédiments marins P1 et P2

L'analyse des diffractogramme obtenus pour les sédiments marins bruts P1 et P2, met en évidence la présence de quartz (SiO_2), calcite (CaCO_3) et halite (NaCl) comme des phases principales, ces phases cristallisées sont couramment présentes dans le sédiment marin.

L'analyse a également révélé l'identification de certaines phases minoritaires comme l'illite, la pyrite et muscovite qui sont des constituants habituels d'un sédiment marin [Dubois, V., 2006].

5.3. Observation MEB

L'analyse par microscopie électronique à balayage des sédiments marins bruts P1 et P2 permet d'avoir un aperçu des grains avec leur composition (Figure 35). Une hétérogénéité des sédiments étudiés est observée ainsi qu'une différence au niveau de la forme et de la taille. Sur les clichés, nous avons pu détecter les principaux composés déjà déterminés par les méthodes Fluorescence X et DRX, comme :

- les grains de calcite ;
- les grains de quartz ;
- la pyrite ;
- les débris organiques.

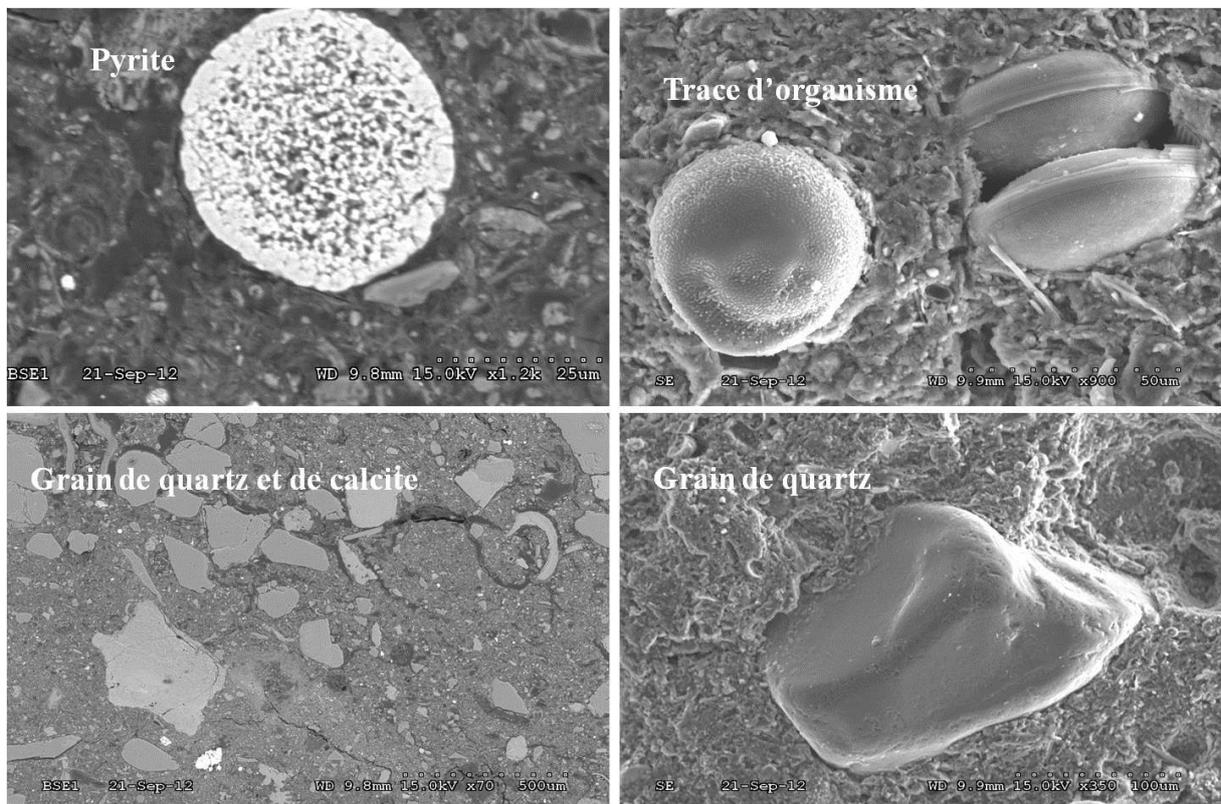


Figure 35: Observations microscopiques des sédiments marins P1 et P2

5. Classification des sédiments P1 et P2 selon le GTR

La caractérisation physique, l'étude de portance et l'analyse minéralogique des sédiments étudiés P1 et P2 du GPMD avant et après séchage naturel, nous ont permis de souligner plusieurs indices qui nous aideront à choisir la voie de valorisation. Le récapitulatif des résultats des deux campagnes d'essais est présenté dans le Tableau 12.

	<i>Sédiment marin du GPMD (P1, mars 2011)</i>	<i>Sédiment marin du GPMD (P2, juin 2011)</i>
<i>W (%) à 105°C</i>	95	23
<i>MO (%) à 450°C</i>	9,2	9,4
<i>ρ_s (t/m³)</i>	2,55	2,56
<i>VBS</i>	3,2	3,7
<i>W_P (%)</i>	51,8	40,1
<i>W_L (%)</i>	111	72
<i>I_P (%)</i>	59,3	32,5
<i>Grains < 2μm</i>	10	12
<i>2μm < Grains < 63μm</i>	55	53
<i>Grains > 63 μm</i>	35	35
<i>W_{OPM} (%)</i>	20,8	19,8
<i>$\rho_{d\ OPM}$ (t/m³)</i>	1,53	1,59
<i>IPI</i>	17	31
<i>Minéraux principaux</i>	<i>quartz, calcite, halite, illite, Pyrite</i>	<i>quartz, calcite, halite, illite, muscovite</i>

Tableau 12: Récapitulatif des résultats des caractéristiques des sédiments marins P1 et P2.

Après quatre mois de séchage naturel, nous avons constaté une diminution considérable de la teneur en eau (elle passe de 95% à 23%) suivie par une baisse de la plasticité du matériau. Le processus de séchage naturel des sédiments dans les bassins de décantation a permis de diminuer considérablement l'eau présente dans les sédiments sans passer par un processus industriel. D'après le GTR, pour une classification des matériaux routiers, lorsque la proportion en matière organique est supérieure à 3% et inférieure à 10% les prélèvements P1 et P2 étudiés seront classés en classe F qui correspond aux matériaux naturels renfermant de la matière organique, et plus précisément à la sous-classe F₁₁.

D'autre part, selon l'aspect granulométrique, le sédiment marin se positionne dans la classe A (sols fins) pour les matériaux dont le diamètre maximal est inférieur à 50 mm et le passant à 80 μ m est supérieur à 35 %. La sous-classe est déterminée selon la valeur du bleu et la limite d'Atterberg. Le prélèvement P1 se classe en A4 et en A3 pour le sédiment du

prélèvement P2 (Figure 36). Selon le GTR, les sédiments étudiés présentent une plasticité élevée et une sensibilité à l'eau. Pour une meilleure utilisation en technique routière, une amélioration des propriétés est nécessaire afin de répondre aux exigences du comportement demandé.

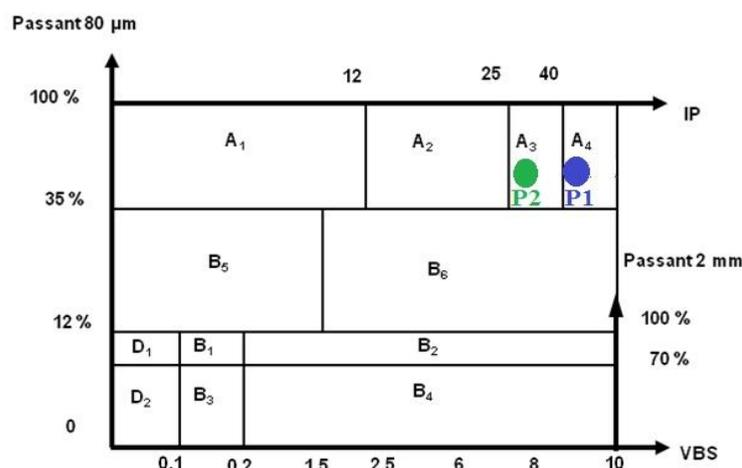


Figure 36: Classification des sédiments marins (P1 et P2) selon GTR, 1992

A titre de comparaison avec des résultats des précédentes études sur les sédiments marins du GPMD [Miraoui, M., 2010; Thran, N.T., 2009] (Tableau 13), on remarque que les sédiments se classent respectivement dans la catégorie des sols fins A4 et A3 pour Miraoui et Thran.

Paramètres	Sédiment (P1, mars 2011)	Sédiment (P2, juin 2011)	MIRAOU [2010]		TRAN [2009]
			2006	2008	
<i>W</i> (%) à 105°C	95	23	217,9	103	182
<i>MO</i> (%) à 450°C	9,2	9,4	16,36	10,12	13,5
ρ_s (t/m ³)	2,55	2,56			2,53
<i>VBS</i>	3,2	3,7	4,08	3,2	3,4
<i>W_P</i> (%)	51,8	40,1	49,2	27	35,4
<i>W_L</i> (%)	111	72	112,6	58,1	89,4
<i>I_P</i> (%)	59,3	32,5	64,3	31,1	53,9
<i>Grains < 2µm</i> (%)	10	12	8,5	7,6	7,3
<i>2µm < Grains < 63µm</i> (%)	55	53	90,2	90,2	73,5
<i>Grains > 63 µm</i> (%)	35	35	1,15	2,15	19,1
<i>W_{OPM}</i> (%)	20,8	19,8	-	-	17
$\rho_{d\ OPM}$ (t/m ³)	1,53	1,59	-	-	1,8
<i>IPI</i>	17	31	-	-	22

Tableau 13 : Etude comparative des caractéristiques physiques entre les sédiments du GPMD

6. Caractérisation environnementale : Évaluation de l'impact environnemental des sédiments brut P1 et P2

L'acceptabilité d'un sous-produit ou d'un déchet comme matériau alternatif en technique routière, dépend de ses caractéristiques physiques et ses performances mécaniques, mais essentiellement de son comportement environnemental.

L'évaluation chimique permet de déterminer la concentration totale en éléments traces par la méthode de minéralisation, ainsi que l'effet de relargage des polluants sur l'environnement par la méthode d'évaluation du comportement à travers des essais de lixiviation selon le guide d'acceptabilité des matériaux alternatifs en technique routières [AMATR, Sétra., 2012].

6.1. Concentration totale des éléments traces

Une caractérisation environnementale est essentielle afin d'évaluer le potentiel polluant des prélèvements P1 et P2. En effet, des mesures de concentrations totales ont été réalisées pour permettre d'identifier et de classer les prélèvements P1 et P2 selon les recommandations de l'arrêté du 23 décembre 2009. Les analyses des prélèvements P1 et P2 ont été effectuées après une solubilisation des métaux lourds obtenus lors d'une minéralisation des échantillons.

Cette opération est obtenue par la méthode de mise en solution totale par attaque acide dans un milieu fermé selon la recommandation pour analyse des métaux lourds (NF ISO 11466). Le Tableau 14 montre une comparaison entre les concentrations totales en éléments métalliques traces et les PCB des sédiments marins bruts P1 et P2 et les niveaux Géode appliqués en France.

<i>Eléments traces</i>	<i>Concentration totale en mg/kg de matériau sec</i>			
	<i>Sédiment P1</i>	<i>Sédiment P 2</i>	<i>Niveau N1</i>	<i>Niveau N2</i>
<i>As</i>	26	25	25	50
<i>Hg</i>	0,68	0,67	0,4	0,8
<i>Cd</i>	2,40	2,10	1,2	2,4
<i>Cr</i>	59	62	90	180
<i>Cu</i>	129	121	45	90
<i>Ni</i>	17	18	37	74
<i>Pb</i>	708	737	100	200
<i>Zn</i>	496	504	276	552
<i>PCB</i>	0,29	0,24	0,5	1

Tableau 14: Concentrations des sédiments P1&P2 et les niveaux N1&N2

Après l'identification des éléments traces des deux sédiments, nous pouvons voir sur la Figure 37 que le Zinc et le Cadmium dépassent N1, tandis que le Cuivre et le Plomb dépassent le niveau N2. Le dépassement des seuils N1 et N2 indique que les sédiments sont pollués et par conséquent non-immérgeables. La solution est donc la gestion à terre pour une valorisation en génie civil. Dans le cadre de notre étude dont l'objectif est de valoriser les sédiments en technique routière, une évaluation environnementale selon le nouveau guide est réalisée.

6.2. Evaluation environnementale pour une valorisation en technique routière selon le guide acceptabilité de matériaux alternatifs en technique routière

Pour que la valorisation des sédiments soit acceptée, il faut s'assurer que le matériau ne présente pas d'effet néfaste sur l'environnement. Pour cela et afin d'évaluer l'impact environnemental des sédiments de dragage du prélèvement P1 et P2 pour une utilisation en technique routière, une évaluation chimique a été réalisée selon les recommandations du nouveau guide méthodologique « Acceptabilité de matériaux alternatifs en technique routière » [AMATR, Sétra., 2012]. Dans le cas de valorisation des matériaux en technique routière, le relargage des éléments métalliques traces dans l'environnement se fait par le contact avec l'eau, pour cela, des simulations de relargage ont été faites via des essais de lixiviation. La lixiviation de P1 et P2 a été réalisée à l'état initial sur des échantillons avec un rapport $L/S = 10$ (la quantité d'eau initiale des sédiments P1 et P2 est retirée de la quantité d'eau nécessaire). L'essai consiste donc à évaluer la fraction mobilisable et la quantité de éléments traces relargués suivant la norme NF EN 12457-2. Les solutions récupérées des sédiments P1 et P2 sont analysées par ICP-AES (Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry) pour les éléments traces métalliques et par chromatographie ionique pour les chlorures et les sulfates.

Les résultats des essais de lixiviation sont présentés dans le Tableau 15. Les valeurs des éléments inorganiques dans la fraction extraite de l'éluât sont exprimées en mg/kg de matière sèche, ainsi que les paramètres organiques qui sont eux aussi exprimés en mg/kg par rapport à la matière sèche.

Les résultats des analyses nous ont permis de classer les sédiments selon le guide Sétra., 2012. D'après l'analyse de l'impact environnemental, on constate que les deux sédiments ne dépassent pas les seuils du niveau 1 définis par le guide. Vis-à-vis des valeurs limites

associées à la caractérisation environnementale de niveau 1 fixées par le guide méthodologique, le relargage de tous les éléments traces mesurés dans notre étude est inférieur aux valeurs seuils.

Par rapport aux limites à respecter pour tous les échantillons, l'écart est très important sauf pour les chlorures qui présentent une valeur supérieure au seuil. D'autre part, pour les limites à respecter pour une utilisation en technique routière, les résultats sont inférieurs aux seuils. Ceci ne bloquerait pas le processus pour pouvoir valider la valorisation.

Selon le guide Sétra, l'acceptabilité en technique routière des sédiments est validée pour l'ensemble de l'utilisation envisagée s'il s'agit d'un matériau alternatif, ou pour des usages routiers s'il s'agit d'un matériau routier. Les sédiments dragués P1 et P2 pourraient être candidats et autorisés pour une utilisation dans la construction des routes.

Quantité relarguée cumulée à L/S=10l/kg (Essai de lixiviation NF EN 12-457-2)						
Éléments	Valeur en mg/kg MS Sédiment P1	Valeur en mg/kg MS Sédiment P2	Valeur à respecter par au moins 95% des échantillons (mg/kg de MS)	Valeur à respecter par au moins 100% des échantillons (mg/kg de MS)	Valeurs limites à ne pas dépasser en lixiviation pour être candidat à une utilisation TR	Validation pour T.R
As	<0,40	<0,10	1	1,5	2	Oui
Ba	0,43	1,43	40	60	100	Oui
Cd	0,04	0,04	0,1	0,12	1	Oui
Cr	0,40	0,10	1	1,5	10	Oui
Cu	0,50	0,57	4	6	50	Oui
Hg	0,0022	0,002	0,02	0,03	0,2	Oui
Mo	0,92	0,76	1	1,5	10	Oui
Ni	0,30	<0,10	0,8	1,2	10	Oui
Pb	0,40	<0,10	1	1,5	10	Oui
Sb	0,18	0,16	0,12	0,18	0,7	Oui
Se	0,10	0,01	0,2	0,3	0,5	Oui
Zn	0,50	0,34	8	12	50	Oui
Fluorure	0,61	0,61	20	30	150	Oui
Chlorure (*)	56710	12040	1600	2400	15000	Oui/Non
Sulfate (*)	8710	9110	2000	3000	20000	Oui/Non
Fraction soluble	18210	38340	8000	12000	60000	Oui
pH	8,22	7,69				
Valeurs limites à ne pas dépasser en contenu total pour être candidat à une utilisation en T.R						
COT	16,69	20,54		6000		Oui
PCB	0,29	0,24		1		Oui
BTEX	<0,05	<0,05		6		Oui
HAP	6,34	5,34		50		Oui

Tableau 15: Valeurs limites en lixiviation niveau 1 permettant de justifier l'utilisation des sédiments en technique routière selon le guide Sétra, 2012

Remarque du guide:

Concernant les chlorures, les sulfates et la fraction soluble, il convient, pour être jugé conforme, de respecter soit les valeurs associées aux chlorures et aux sulfates, soit les valeurs associées à la fraction soluble (SETRA, 2012).

Conclusion

Dans cette partie, l'établissement d'une carte d'identité des prélèvements P1 et P2 avant et après séchage naturel, nous a permis de mettre en évidence les principales caractéristiques du matériau. A savoir : la teneur en eau, la teneur en matière organique, la valeur en bleu de méthylène, la granulométrie, la masse volumique absolue, les limites d'Atterberg, l'indice de portance immédiat, la composition minéralogique, l'analyse thermique, l'observation MEB et l'évaluation environnementale.

Selon les paramètres déterminés des sédiments P1 et P2, les essais ont montré que la teneur en eau du sédiment avant séchage est très élevée. Cette dernière a fortement baissé après quatre mois de séchage naturel. Ceci présente un avantage en terme de maniabilité et de transport ainsi qu'au niveau de la manutention des sédiments pour leur valorisation en technique routière. Les essais ont montré aussi un taux de fine relativement important, avec la présence de 10% de matière organique, ce qui peut influencer les performances mécaniques.

La caractérisation minéralogique a défini les principaux minéraux qui constituent les deux sédiments. En effet, les deux matériaux contiennent deux importantes phases soit la calcite et le quartz ainsi que des phases argileuses comme l'illite, l'halite et la muscovite. Cette information est très importante afin de bien comprendre la réaction de ces derniers dans un environnement bien déterminé, permettant par la suite de bien définir le comportement de notre matériau.

La caractérisation environnementale du sédiment marin a été étudiée selon le guide méthodologique d'acceptabilité des matériaux alternatifs en technique routière, c'est une étape primordiale servant à bien suivre le comportement du sédiment dans différents scénarios. Le sédiment marin a été analysé à travers l'essai de lixiviation NF EN 12457-2. Selon l'évaluation de l'impact sur l'environnement, le taux de relargage des deux sédiments était inférieur aux valeurs seuils du N1 selon le guide, cela donc autorise l'acceptabilité de la valorisation des sédiments en technique routière.

Sur le plan géotechnique, on a constaté que le sédiment de Dunkerque présente une teneur en eau élevée, avec la présence d'une fraction argileuse et d'une quantité considérable de matière organique. Pour faire face à ces anomalies, un traitement sera envisagé afin de réduire la teneur en eau et améliorer les caractéristiques de portance du matériau.

Chapitre 2

Valorisation des sédiments marins du GPMD en couche de fondation

1. Introduction :

La valorisation d'un matériau alternatif « sédiment marin » en matériau routier nécessite d'abord une connaissance de toutes ses propriétés, mais il faut aussi tenir compte de toutes les différentes caractéristiques des matériaux routiers dans lesquels il va être introduit. En effet, la valorisation des sédiments marins du GPMD ne peut être acceptée que s'il présente des propriétés mécaniques et environnementales adaptées à l'usage envisagé.

La caractérisation des sédiments dans le chapitre précédent a montré que le sédiment P1 présente une teneur en eau très élevée, une grande plasticité et une faible portance. Le séchage naturel durant les quatre mois a amélioré significativement les propriétés de notre sédiment, la teneur en eau est devenue acceptable pour une future valorisation avec une diminution de la plasticité munie d'une amélioration de ses propriétés mécaniques. L'évaluation de l'impact environnemental selon les seuils fixés par le guide Sétra a montré que les sédiments peuvent être candidats en technique routière. D'après l'identification des deux sédiments, nous avons privilégié de continuer l'étude de valorisation avec le sédiment P2, compte tenu de sa qualité, améliorée physiquement par la réduction de la teneur en eau et du point de vue environnemental par la réduction de la quantité du chlorures et de la concentration de certains éléments traces (As,Cr,Mo,Ni,Pb,Sb,Se, Zn).

Ce chapitre est consacré à la valorisation des sédiments marins en couche de fondation d'une route, nous proposons l'étude d'un mélange composé de 30% de sédiments marins et de 70% de sable de dragage, traité à la chaux vive et au liant hydraulique. Le comportement mécanique et environnemental du mélange sera suivi en vue de l'utilisation envisagée. Rappelons que le principal objectif de ce travail en laboratoire est de prévoir le comportement mécanique et l'aspect environnemental de la formulation proposée à base des sédiments non immergeables.

L'étude de validation de la formulation s'est déroulée en deux phases. La première phase s'est déroulée au laboratoire pour identifier en premier lieu le comportement des mélanges et d'évaluer leurs performances mécaniques et environnementales et pour prouver

en second lieu la possibilité d'une éventuelle valorisation en technique routière. La deuxième phase consiste à utiliser le mélange sur le terrain en réalisant une première route expérimentale à l'échelle 1 et à estimer sa durabilité par la réalisation des deux campagnes de carottage suivies des essais de déflexion à 60 et à 360 jours et d'une évaluation de l'impact environnemental.

2. Description de l'étude de formulation en laboratoire :

Le but de cette étude de formulation consiste à examiner la possibilité de remplacer une fraction de sable utilisé dans les matériaux routiers par des sédiments non immergeables dragués du GPMD. Le mélange est traité avec de la chaux vive et du liant hydraulique. En raison de sa disponibilité dans le port, l'utilisation du sable de dragage avec le sédiment fin présente une solution alternative pour la gestion des matériaux dragués [Abriak, N.E., et al., 2003].

Concernant la composition et les pourcentages utilisés dans cette formulation, nous nous sommes basées sur des études faites et des résultats obtenus au cours de ces dernières années [Dubois, V., 2006 ; Tran, N.T., 2008]. Dans notre étude, le mélange adopté est composé de 1/3 de sédiment fin (prélèvement P2) et 2/3 de sable de dragage. La quantité de liant hydraulique a été fixée à 6%, ce qui est typiquement utilisé pour un traitement en construction routière et la proportion de chaux à ajouter a été fixée à 1% de la masse sèche du mélange. Le pourcentage en chaux a été déterminé par le test de fixation limite [Tremblay, H., 1998].

3. Elaboration d'une formulation de couche de fondation à base des sédiments marins : Choix des dosages

3.1. Liant hydraulique

Le liant hydraulique est un élément important dans le traitement des matériaux pour une utilisation en technique routière. Sa capacité à agglomérer les granulats confère au matériau une cohésion permanente dont l'importance dépend de la nature du matériau traité, du type de liant, de la quantité introduite, de la compacité atteinte lors de la mise en œuvre, de la température du milieu et enfin de l'âge du mélange. La technique de traitement des sédiments au liant hydraulique était particulièrement adaptée, cette technique consiste à valoriser les

sédiments marins en place en incorporant le liant et en mélangeant, jusqu'à l'obtention d'un matériau homogène. Le liant hydraulique est un mélange comportant des proportions variables d'éléments hydrauliques comme le clinker, les laitiers de haut fourneau, des éléments pozzolaniques et des fillers calcaire. La composition chimique du liant utilisé est présentée dans le Tableau 16.

<i>Composition</i>	<i>% massique</i>	<i>Composition</i>	<i>%massique</i>
<i>SiO₂</i>	<i>13,2</i>	<i>K₂O</i>	<i>0,6</i>
<i>Al₂O₃</i>	<i>4,7</i>	<i>Na₂O</i>	<i>traces</i>
<i>Fe₂O₃</i>	<i>0,7</i>	<i>CaO</i>	<i>32,5</i>
<i>MgO</i>	<i>3</i>	<i>SO₃</i>	<i>1,6</i>
<i>Ti</i>	<i>0,4</i>	<i>Mn</i>	<i>0,5</i>

Tableau 16: Composition chimique du liant hydraulique

3.2. Chaux vive

La chaux vive est généralement utilisée dans les traitements de stabilisation, mais aussi elle peut être utilisée comme additif aux liants hydrauliques. Dans le cadre de traitement des sédiments fins, l'intérêt de la chaux consiste à diminuer la teneur en eau des produits traités mais aussi à produire de l'hydroxyde de chaux permettant l'activation des pouzzolanes éventuellement ajoutées ou pouvant être présentes dans le matériau à traiter. Pour ces raisons, la chaux vive fait partie des additifs retenus dans notre étude expérimentale. La teneur en chaux a été déterminée par le test de fixation limite, l'essai consiste à déterminer le pH d'une solution d'eau déminéralisée et de sédiment, à un rapport $L/S = 5$ où on rajoute un pourcentage croissant de chaux vive jusqu'à ce que le pH devienne constant. La Figure 37 montre que le pH se stabilise pour un dosage de chaux à 1 % pour le sédiment marin.

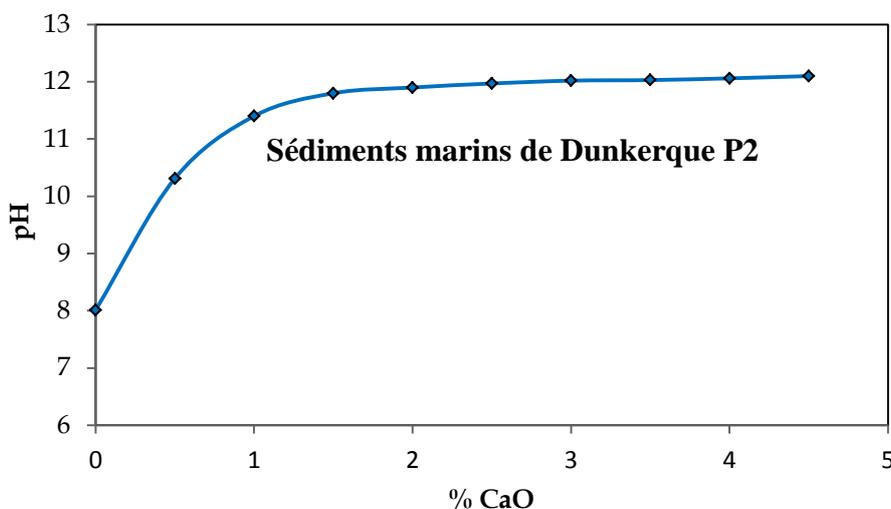


Figure 37 : Evolution du pH en fonction de l'ajout de chaux

3.3. Sédiment marin non-immmergeable P2

Le choix de l'introduction d'une proportion de 30% de sédiment non immergeable dans la formulation de couche de fondation est lié à plusieurs facteurs tels que la limitation de la matière organique et les éléments fins. La caractérisation physique des prélèvements P1 et P2 a indiqué une teneur en eau élevée (de l'ordre de 90 % pour les sédiments P1 et de l'ordre de 23 % pour P2). Ces valeurs présentent une teneur 6 fois plus élevée pour P1 et 2 fois pour P2 en comparaison avec la teneur en eau à l'optimum Proctor pour un matériau routier standard.

Dans le cadre de valorisation des sédiments en technique routière et après un premier traitement par décantation et séchage naturel, la teneur en eau a diminué de presque 65 % rendant le matériau plus pelletable. Cette méthodologie employée sur terrain représenterait une solution efficace. Pour la réalisation des essais, nous avons utilisé les sédiments du prélèvement 2. Et afin d'accélérer le processus de séchage, nous les avons placés en étuve à 40°C évitant ainsi toute dégradation de la matière organique et toute modification des caractéristiques physico-chimiques.

3.4. Sable de dragage

Le sable de dragage est un ajout granulaire issu du port de Dunkerque, il représente le composé principal du squelette granulaire de notre formulation. L'analyse par DRX de la minéralogie montre que le sable de dragage est riche en quartz(Q) et en calcite (C).

L'analyse par granulométrie laser indique que le sable est un sable moyen avec un diamètre maximal de 2 mm, il se compose de 1% d'éléments inférieurs à 0,08mm et 85 % d'éléments inférieurs à 0,5mm. D'autre part, l'évaluation environnementale réalisée dans le cadre d'autres études, montre que le sable de dragage du GPMD est inerte et propre et peut être valorisable en technique routière [Abriak N.E., et al., 2003].

4. Caractérisation environnementale du mélange sans traitement (sable et sédiment marins)

Afin de s'assurer de la qualité environnementale du mélange sans traitement (sédiment marin et sable de dragage), nous avons réalisé une campagne d'analyse à travers l'essai de lixiviation selon le guide acceptabilité des matériaux alternatifs en technique routières [Sétra, 2012]. L'évaluation environnementale du mélange montre que les quantités relarguées des éléments métalliques traces sont inférieures aux valeurs limites du niveau 1 du guide Sétra et

ne dépasse pas les seuils pour que le matériau soit candidat pour une valorisation en technique routière, permettant ainsi de justifier toute utilisation en construction routière (Tableau 17). A titre de comparaison, le mélange présente une nette diminution des concentrations des éléments métalliques traces par rapport à l'analyse du sédiment brut P2 (Chapitre 1). L'ajout du sable de dragage améliore donc la qualité environnementale du mélange.

Éléments	Valeur en mg/kg MS du mélange à base de sédiment	Valeur à respecter par au moins 95 % des échantillons (mg/kg de MS)	Valeur à respecter par au moins 100% des échantillons (mg/kg de MS)	Valeurs limites à ne pas dépasser en lixiviation pour être candidat à une utilisation TR	Validation en TR
As	<0,02	1	1,5	2	Oui
Ba	1,21	40	60	100	Oui
Cd	<0,004	0,1	0,12	1	Oui
Cr	<0,03	1	1,5	10	Oui
Cu	0,15	4	6	50	Oui
Hg	<0,002	0,02	0,03	0.2	Oui
Mo	0,1	1	1.5	10	Oui
Ni	0,033	0,8	1.2	10	Oui
Pb	<0,06	1	1.5	10	Oui
Sb	0,07	0,12	0.18	0.7	Oui
Se	<0,07	0,2	0.3	0.5	Oui
Zn	0,073	8	12	50	Oui
Chlorure (*)	1580	1600	2400	15000	Oui
Sulfate (*)	2610	2000	3000	20000	Oui
Fraction soluble	9140	8000	12000	60000	Oui
Valeurs limites à ne pas dépasser en contenu total pour être candidat à une utilisation en T.R					
COT	6,23		6000		Oui
PCB	0,23		1		Oui
BETX	<0,05		6		Oui
HCT	338		500		Oui
HAP	0,76		50		Oui

Tableau 17: Valeurs limites en lixiviation niveau 1 permettant de justifier l'utilisation des sédiments en technique routière selon le guide Sétra, 2012

5. Constitution du squelette de la formulation

La campagne de formulation a été effectuée en confectionnant un mélange de sédiment marin P2, de sable de dragage, de chaux vive et de liant hydraulique tout en respectant la norme NF EN 14227. Le taux d'introduction du sédiment P2 est estimé à 30%. La distribution granulométrique du mélange (1/3 de sédiments dragués, 2/3 de sable dragué, 6% de liant

hydraulique et 1% de chaux) est illustrée sur la Figure 38. En évaluant les coefficients [Holtz R.D., et Kovacs, W.D., 1991]:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad \text{Eq. 5}$$

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{(D_{60} \times D_{10})} \quad \text{Eq. 6}$$

Nous avons obtenu un C_u de 50 qui est largement supérieur à la valeur de référence de 6 et un C_c de 1,8. L'ajout granulaire de 2/3 de l'ensemble de la formulation permet d'avoir une distribution granulaire qui respecte les critères d'uniformité et de courbure.

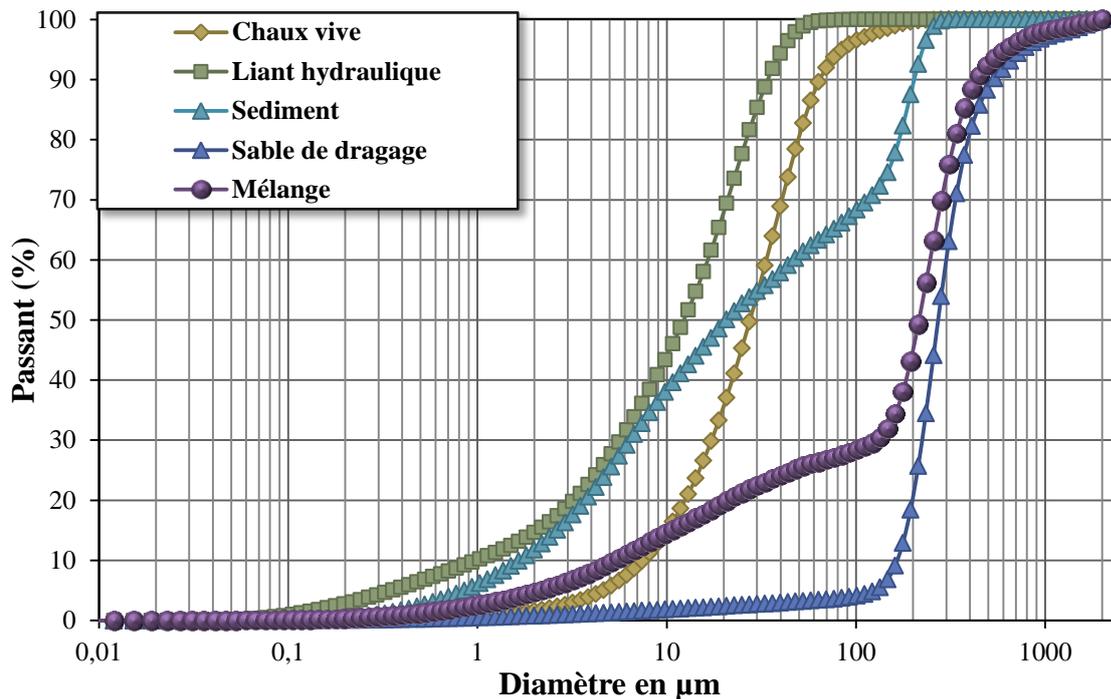


Figure 38: Distributions granulométriques de la formulation proposée

6. Étude des performances mécaniques du mélange

Dans le domaine routier, l'utilisation des matériaux à base de chaux et de liant hydraulique demande une étude spécifique et approfondie sur le plan mécanique. Pour pouvoir utiliser le prélèvement P2 traité à la chaux et au liant hydraulique en couche de fondation, le mélange proposé doit répondre à plusieurs critères mécaniques à court et à long terme.

La démarche de valorisation de nos sédiments consiste à identifier les caractéristiques optimales de la formulation étudiée (W_{OPM} et γd_{OPM}) par l'essai Proctor ainsi que l'aptitude du mélange à supporter la circulation des engins à travers l'IPI. Suite aux critères optimaux et de portance déterminés, la confection des éprouvettes peut être réalisée. Après différente

échéances de cure, une étude du comportement mécanique et environnemental est effectuée. Dans ce contexte, 3 types d'essais ont été mis en œuvre :

- l'essai Proctor afin de déterminer la teneur en eau optimale et la portance immédiate du mélange (IPI) selon les normes NF P 94-093 et NF P 98-078;
- l'essai de résistance à la compression uni-axiale suivant la norme NF EN 13 286-41 ;
- l'essai de résistance à la compression diamétrale pour évaluer la résistance à la traction et le module d'élasticité en traction (R_t et E) d'après la norme NF EN 13 286-42 et 43.

6.1. Paramètre de compactage et de portance du mélange

Pour une valorisation du mélange en couche de fondation, une campagne d'essai Proctor modifié a été réalisée afin d'évaluer la capacité de portance, la teneur en eau optimale et la densité. L'essai est réalisé sur un mélange représentatif préparé à cinq teneurs en eau différentes. La détermination de l'indice de portance immédiat IPI a été précédée par un essai Proctor permettant de déterminer la teneur en eau optimale de la matière " W_{OPM} " et la densité sèche maximale " $\gamma_{d_{OPM}}$ ". La courbe relative à l'indice de portance immédiat et aux densités sèches est présentée sur la Figure 39.

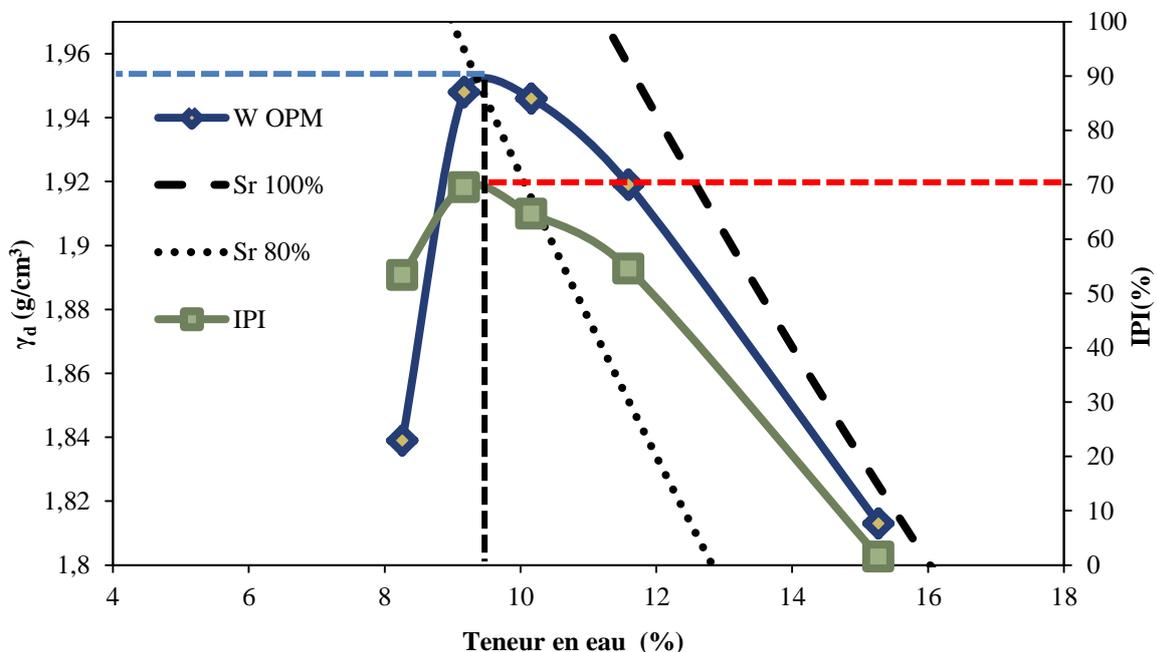


Figure 39: Courbe Proctor modifié & IPI du mélange

Les résultats expérimentaux montrent que la formulation étudiée présente une teneur en eau optimale de 9,5 % avec un IPI de l'ordre de 70% et une densité sèche de 1,95 ce qui

indique une bonne portance du mélange à base de sédiment P2. Le traitement à la chaux et au liant hydraulique combiné au sable de dragage a permis de diminuer la teneur en eau ; cette diminution est liée à la consommation par les ajouts (chaux et liant hydraulique). Ceci, va jouer un rôle important dans l'amélioration de la durabilité de la couche de fondation de la chaussée.

En comparaison avec les résultats de l'essai Proctor sur sédiment P2 (Chapitre 1), on constate une réduction de 12 % au niveau de la teneur en eau optimale. Le traitement réalisé a été bénéfique en terme de portance pour le mélange à base de sédiment P2, l'IPI obtenu après traitement était conforme à une utilisation en couche de fondation.

Après la détermination des paramètres optimaux ($W_{OPM}, IPI, \gamma_{d_{OPM}}$), l'étape de confection des éprouvettes de la formulation choisie peut être effectuée afin de déterminer les propriétés mécaniques (R_c, R_t et E) qui assurent la bonne tenue de la couche de fondation.

6.2. Etudes des performances mécaniques à long terme

Le comportement mécanique de la formulation étudiée a été évalué par des essais de compression simple, des essais de traction et par la détermination du module d'élasticité. La résistance R_c est évaluée par des essais d'écrasement des éprouvettes cylindriques en compression uni-axiale selon la norme NF EN 13286-41 et en compression diamétrale pour la résistance R_t , suivant la norme NF EN 13286-42. Les paramètres R_t et E sont reportés sur un abaque de détermination de la classe de résistance du matériau estimée à 360 jours, pour vérifier la viabilité d'utilisation du sédiment P2 traité en couche de fondation.

La préparation des éprouvettes a été effectuée selon les recommandations de la norme NF P 98 114-3 relative à l'étude en laboratoire des matériaux traités aux liants hydrauliques, avec une masse volumique sèche égale à $97\% \cdot \gamma_d$ à l'OPM. La confection des éprouvettes cylindriques de 5 cm de diamètre et 10 cm de hauteur a été réalisée selon la norme NF EN 13286-53 par compression statique après la détermination de la masse du matériau à confectionner. Celle-ci a été déterminée par la formule suivante :

$$M = (V \cdot \gamma_d \cdot 0,97 (100 + W))/100 \quad \text{Eq. 7}$$

Où:

M : Masse théorique de l'éprouvette à la confection en grammes ;

γ_d : Masse volumique apparente sèche du matériau en g/cm^3 ;

V : Volume de l'éprouvette en cm^3 ;

W : Teneur en eau du mélange, dans notre cas d'étude $W = W_{OPM}$ en (%).

Après la confection des éprouvettes, ces dernières ont été pesées et conservées dans des boîtes en plastique hermétique à 20°C. Les éprouvettes sont préparées pour les échéances 7, 14, 28, 90, 180 et 360 jours.

6.3. Essai de résistance à la compression

Les essais de résistance en compression de la formulation à base de sédiments traités sont essentiels pour déterminer et caractériser l'efficacité de la valorisation et identifier sa qualité générale. L'objectif de cet essai consistait à déterminer l'âge autorisant la mise de circulation des engins de chantier sur la couche traitée et vérifier la résistance de la couche au cours du temps. La résistance à la compression n'est jugée acceptable que si elle dépasse 1MPa à 7 jours.

Les essais de compression ont été réalisés sur 15 éprouvettes d'éclatement 2 (3 éprouvettes pour chaque échéance de cure) ayant les dimensions suivantes : $D = 50 \text{ mm}$; $H = 100 \text{ mm}$ confectionnés à W_{OMP} et $97\% \cdot \gamma d_{OPM}$. Les essais ont été effectués moyennant une presse mécanique type Instron[®] d'une capacité de 150 kN. Le dispositif de détermination de la résistance à la compression et du module élasticité en compression est illustré sur la Figure 40.



Figure 40: Dispositif d'essai de compression et mesure de module

Les résultats des essais de résistance en compression uni axiale à 7,14, 28, 90, 180 et 360 jours sont présentés sur la Figure 41. D'après les résultats obtenus sur l'ensemble des échantillons testés, on observe un gain en résistance à la compression au fil du temps et de bonnes performances atteintes à 90, 180 et 360 jours avec respectivement 11 MPa, 11,7 MPa et 15,6 MPa. Le critère d'âge autorisant la circulation des engins sur une formulation destinée à une utilisation en couche de fondation est déterminé suite à l'essai de compression simple à 7 jours.

Dans notre étude, nous avons obtenu une résistance de 4MPa à 7 jours > 1MPa. Ceci est expliqué par la bonne prise des sédiments traités au liant hydraulique et à la chaux vive. Concernant les mesures à 28 jours, la résistance en compression est environ 2 fois plus élevée que celles mesurées à 7 et 14 jours. En fonction des essais réalisés à 90 et à 180 jours, nous avons constaté une légère augmentation entre les deux échéances. À 360, nous remarquons une évolution significative de la résistance qui atteint 15,6 MPa. Les résultats obtenus confirment la bonne performance mécanique de la formulation étudiée. A titre comparatif, Dia [2013] qui avait étudié des formulations de sédiment traité par un processus industriel, a obtenu des performances mécaniques en compression 2 fois moins importantes à 90 jours pour des sédiments phosphatés et des résultats presque équivalents à nos résultats pour les sédiments traités après calcination [Dia, M., 2013].

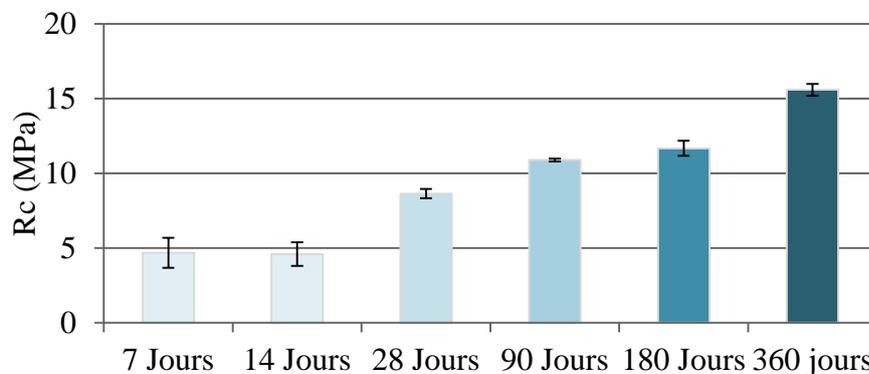


Figure 41: Evolution des résistances en compression de la formulation à base de sédiment

6.4. Mesure du module d'élasticité à la compression

Le module élastique E_c à la compression, a été évalué selon la norme NF EN 13286-43. Le dispositif de mesure est composé de deux anneaux fixés dans la partie centrale de l'éprouvette et distancés de 5 cm. Trois capteurs LVDT sont liés à l'anneau du haut décalés de 120° . Leurs extrémités touchent l'anneau inférieur permettant ainsi de mesurer la déformation longitudinale des éprouvettes. Les capteurs sont connectés par la suite à un logiciel d'acquisition des données. La contrainte axiale est appliquée à l'aide d'une presse mécanique type Instron[®] d'une capacité de 150 kN. La Figure 42 montre le dispositif de mesure composé des deux anneaux et les trois capteurs LVDT.

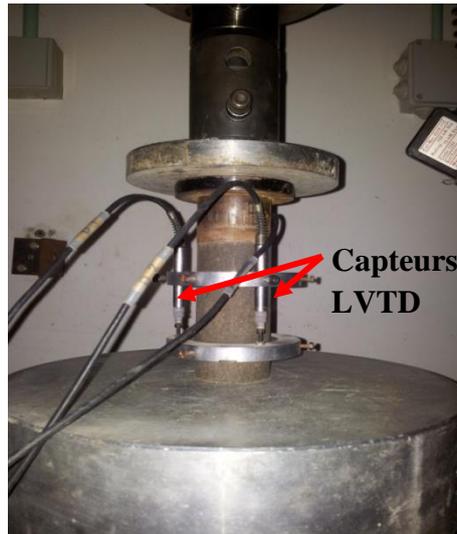


Figure 42: Dispositif de mesure de module d'élasticité E_c

Les déformations des éprouvettes du mélange étudié après 7, 14, 28, 90, 180 et 360 jours de maturation sont obtenues à partir de la moyenne des déplacements des trois capteurs sur une hauteur de mesure de 5cm. Les graphiques d'évolution des courbes contrainte/déformation sont donnés dans la Figure 43.

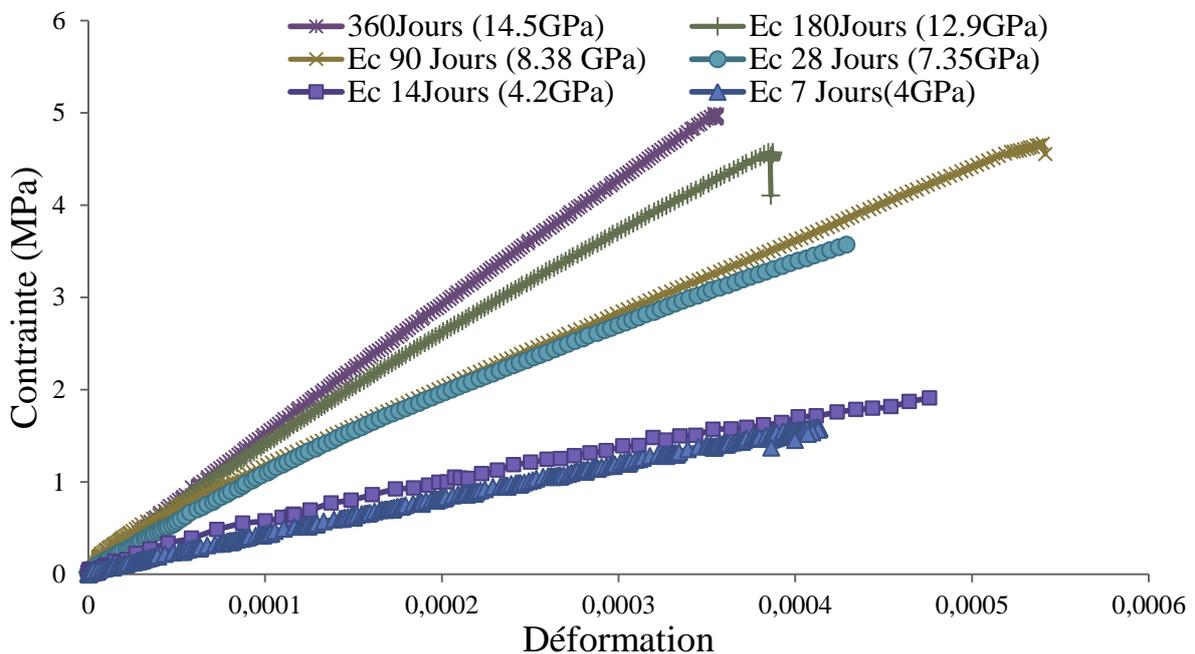


Figure 43: Evolution du module élasticité E

D'après les courbes des contrainte/déformation et en fonction des échéances, on observe une évolution très significative de la déformation entre 28 jours et 360 jours. Les résultats obtenus sont en accord avec les essais de compression et les essais de portance, ils prouvent l'amélioration nette du comportement mécanique de la formulation à base de sédiment.

6.5. Essai de compression diamétrale

Les caractéristiques mécaniques, résistance à la traction R_t et module de déformation E_t sont importants dans l'évaluation du matériau traité pour une valorisation en technique routière. L'essai est réalisé selon la norme NF EN 13286-42 en appliquant une charge linéaire constante sur deux génératrices diamétralement opposées, la première située perpendiculairement au plan de rupture et la deuxième faisant un angle de 60° par rapport à la première. La résistance à la traction R_t est calculée selon :

$$R_t = 0,8 \times R_{tb} \quad \text{Eq. 8}$$

$$R_{tb} = 2 \times 10^{-2} \frac{F_r}{\pi \varnothing h} \quad \text{Eq. 9}$$

Avec :

R_t : Résistance à la traction en MPa ;

R_{tb} : Résistance en compression diamétrale en MPa ;

F_r : Force de rupture en N ;

\varnothing : Diamètre en cm ;

h : Hauteur de l'éprouvette en cm.

Le module de déformation est estimé à 30% de la contrainte de rupture, plus précisément dans la zone élastique du matériau. Les mesures de déformation sont effectuées à l'aide d'un système d'extensométrique équipé de quatre capteurs LVDT, deux capteurs positionnés à 0° et deux autres à 60° par rapport à l'axe de l'échantillon. Le dispositif d'essai de détermination du R_t et E_t est représenté sur la Figure 44.

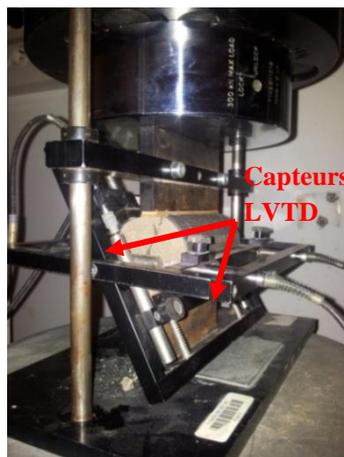


Figure 44: Dispositif de détermination de la résistance à la traction et module E_t

Nous avons déterminé R_t et E pour les échéances 7, 14, 28, 90, 180 et 360 jours afin de suivre le comportement mécanique du matériau dans le temps. L'évolution des résistances en traction pour les échéances testées est présentée sur la Figure 45. Les résultats sont calculés à

partir des trois mesures sur trois éprouvettes différentes. On constate une nette évolution de la résistance à la traction entre 14 jours et 28 jours ainsi qu'une amélioration de la résistance à 90 jours pour atteindre 1,2 MPa.

En revanche, on remarque qu'à partir de 90 jours et jusqu'aux 360 jours, la résistance à la traction diminue. Son évolution à travers le temps, présente une concordance avec les résultats obtenus en compression simple. Les résultats obtenus et l'évolution constatée présentent un effet bénéfique pour une valorisation en couche de fondation.

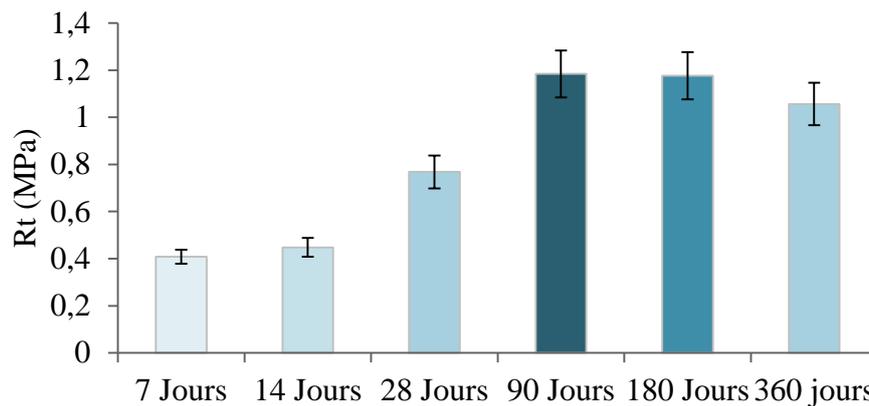


Figure 45: Evolution de la résistance à la traction

À partir des résultats obtenus R_t et E , nous avons déterminé la classe mécanique de la formulation étudiée à 7, 14, 28, 90, 180 et 360 jours en positionnant les données sur l'abaque de performances mécaniques à 360 jours (Figure 46). Dans le cadre de la classification des matériaux selon le guide GTS et à partir des résultats des différentes échéances, on distingue une bonne performance à jeune âge (28 jours) en se classant en classe S2 dans l'abaque de classification des matériaux traités au liant hydraulique. Une amélioration au niveau du classement a été enregistrée en se positionnant en classe S3 pour les échéances 90, 180 et 360 jours. D'après le résultat obtenu à 360 jours, la formulation étudiée présente des performances mécaniques acceptables pour une utilisation en couche de fondation.

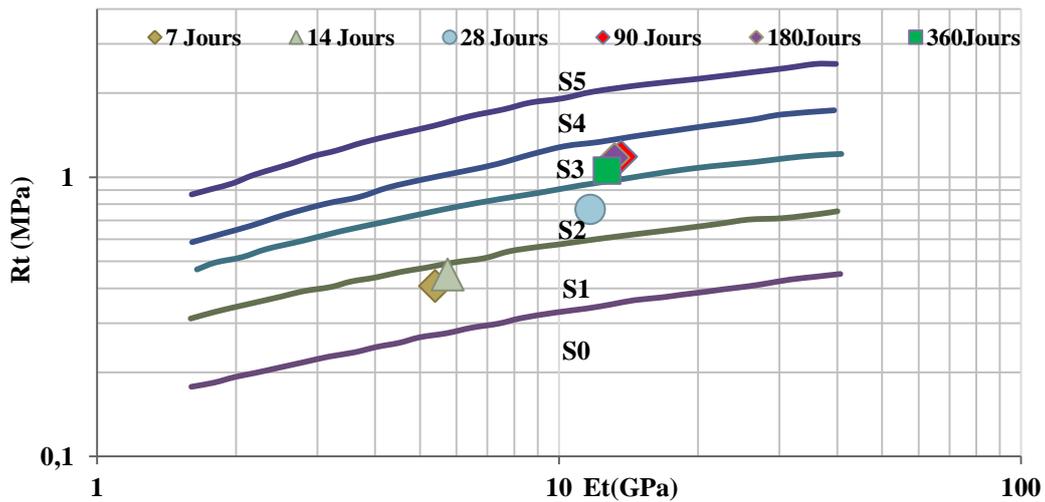


Figure 46: Classification de la formulation à base de sédiment

7. Évaluation environnementale de la formulation

Afin d'évaluer l'impact environnemental du mélange étudiée, les résultats de l'étude sur des échantillons testés après 28, 90 et 360 jours de maturation sont présentés. L'étude a été réalisée selon la norme NF EN 12-457-2 (essai de lixiviation sur des éprouvettes broyées) et NF EN12-457-4 (essai de lixiviation sur des monolithes). Les résultats de l'étude ont été comparés au guide méthodologique pour l'acceptabilité de matériaux alternatifs en technique routière comme indiqué sur le Tableau 18.

Quantité relarguée cumulée à L/S=10l/kg (Essai de lixiviation NF EN 12-457-2 & NF EN12 457-4)

Eléments	Sédiment traité broyés			Sédiment traité en monolithe			Valeur à respecter par au moins 100% des échantillons (mg/kg de MS)	Valeurs limites à ne pas dépasser en lixiviation pour être candidat à une utilisation TR	Validation
	Valeur en mg / kg M.S à 28 jours	Valeur en mg / kg M.S à 90 jours	Valeur en mg / kg M.S à 360 jours	Valeur en mg / kg M.S à 28 jours	Valeur en mg / kg M.S à 90 jours	Valeur en mg / kg M.S à 360 jours			
As	<0,1	0,2	<0,02	<0,1	0,1	<0,02	1,5	2	Oui
Ba	9,4	8,3	5,3	1,08	1,1	0,54	60	100	Oui
Cd	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	0,04	<0,04	0,12	1	Oui
Cr	0,1	<0,1	<0,03	<0,1	0,1	<0,03	1,5	10	Oui
Cu	1,6	0,9	0,48	<0,1	0,12	0,1	6	50	Oui
Hg	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	0,03	0,2	Oui
Mo	0,2	0,2	0,18	<0,1	<0,1	0,19	1,5	10	Oui
Ni	0,15	0,16	0,11	<0,1	<0,1	<0,032	1,2	10	Oui
Pb	0,1	<0,1	<0,06	<0,1	<0,1	<0,032	1,5	10	Oui
Sb	<0,06	<0,06	<0,058	<0,06	<0,06	<0,058	0,18	0,7	Oui
Se	0,1	<0,1	<0,07	<0,1	<0,1	<0,071	0,3	0,5	Oui
Zn	0,1	<0,1	<0,05	<0,1	<0,1	<0,052	12	50	Oui
Chlorure	1463	1430	1680	303	229	156,6	2400	15000	Oui
Sulfates	133	133	310	49	57	64,6	3000	20000	Oui
Soluble fraction	8830	29000	8810	n.d	1270	1530	12000	60000	Oui
pH	13	12,9	12,8	12,1	12	12	Min 5,5/ Max 13	-	Oui

Tableau 18: résultats des essais de lixiviation sur des échantillons broyés et des monolithes

Les résultats de lixiviation montrent que les échantillons, qu'ils soient broyés ou en monolithes, ne présentent aucun dépassement du seuil pour une utilisation en technique routière [Sétra, 2012], permettant ainsi de justifier une utilisation en couche de fondation. Pour ces échantillons, on observe aussi une diminution des quantités des éléments traces relarguées au fil du temps. Par ailleurs, les concentrations des éléments métalliques traces des échantillons en monolithes présentent des valeurs inférieures à celles des échantillons broyés.

Conclusion

L'étude du comportement mécanique et environnemental de la formulation proposée à base de sédiment marin présente une deuxième étape importante après la phase de caractérisation et avant toute utilisation en technique routière. Dans ce chapitre, une formulation à base de sédiment marin a été mise en place avec un traitement de 1% de chaux et 6% du liant hydraulique. L'étude mécanique de cette formulation a montré de bonnes performances au niveau de la résistance à la compression et à la traction ainsi qu'au niveau du module d'élasticité. Selon la classification GTS, la formulation se classe en S_3 qui est une bonne classe pour une valorisation en couche de fondation.

De point de vue environnemental, la formulation a dévoilé que les concentrations des éléments métalliques traces sont largement inférieures aux seuils pour une utilisation en technique routière définis par le guide. Conformément à ce guide, notre formulation est utilisable en construction routière.

Les résultats encourageants obtenus en laboratoire sur le plan mécanique et environnemental, autorisent donc une valorisation d'un matériau à base de sédiment marin. Sur la base de ces résultats, le chapitre 3 fera l'objet d'une application réelle à l'échelle 1 de cette formulation proposée en laboratoire.

Chapitre 3

Application in Situ : Construction d'une route à base de sédiment à Dunkerque avec suivi mécanique et environnemental

1. Introduction

Ce chapitre présente l'étape de valorisation réelle d'une formulation à base de sédiment traité aux liants hydrauliques in situ. En complément à l'étude en laboratoire, nous présenterons une démarche du programme expérimental et les résultats de caractérisation et d'identification de l'aspect mécanique et environnemental d'une route expérimentale à base de sédiment non-immmergeable à l'échelle 1.

Après la validation de l'étude en laboratoire, l'utilisation du sédiment marin traité nécessite une étude sur chantier afin de vérifier qu'il présente un comportement satisfaisant et proche de l'étude au laboratoire.

L'objectif spécifique vise à confirmer les résultats obtenus en laboratoire par un suivi du comportement mécanique à 60 jours et à 360 jours du mélange traité de la nouvelle route à base de sédiment. Les résultats de suivi vont permettre d'avoir un retour sur le comportement mécanique sous trafic et de recueillir des informations au niveau environnemental.

Après avoir réalisé une étude expérimentale en laboratoire, une route à Dunkerque en grandeur réelle a été lancée fin juin 2012 en utilisant la formulation développée en laboratoire (Chapitre 2). C'est la première route réalisée en France à base de sédiments marins. Les résultats obtenus en laboratoire nous ont permis de valider le passage de la phase laboratoire à la phase réalisation sur le terrain.

2. Description de la planche expérimentale : route expérimentale Freycinet 12 au GPMD

Les hypothèses de la conception de la structure routière sont présentées dans le Tableau 19.

<i>Classe de plateforme</i>	<i>PF 2</i>
<i>Trafic</i>	<i>100 Poids lourds /par jour</i>
<i>Durée</i>	<i>15 années</i>

Tableau 19: Hypothèses de conception de la route

Selon le trafic et les conditions du site, la structure de la route à base des sédiments marins a été constituée par (Figure 47) :

- une couche de roulement en BBME 0/10 P C3 de 5 cm d'épaisseur ;
- une couche de base en EME 0/10 CC 2 de 6 cm d'épaisseur ;
- une couche de fondation à base de sédiment marin traité de 30cm d'épaisseur ;
- un sol naturel constituant la PST (Partie supérieure des terrassements).

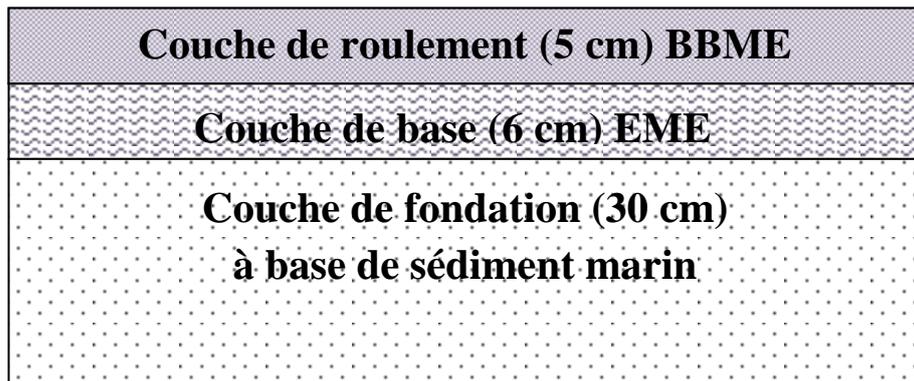


Figure 47: Structure de la chaussée à base de sédiment marin

La construction de la route expérimentale a été réalisée suivant les recommandations d'usage en France (Sétra /LCPC, 2000). La route est sur 550 mètres de longueur et 7 mètres de largeur (Figure 48), la réalisation a été effectuée par l'entreprise COLAS, qui a accepté de participer au projet.

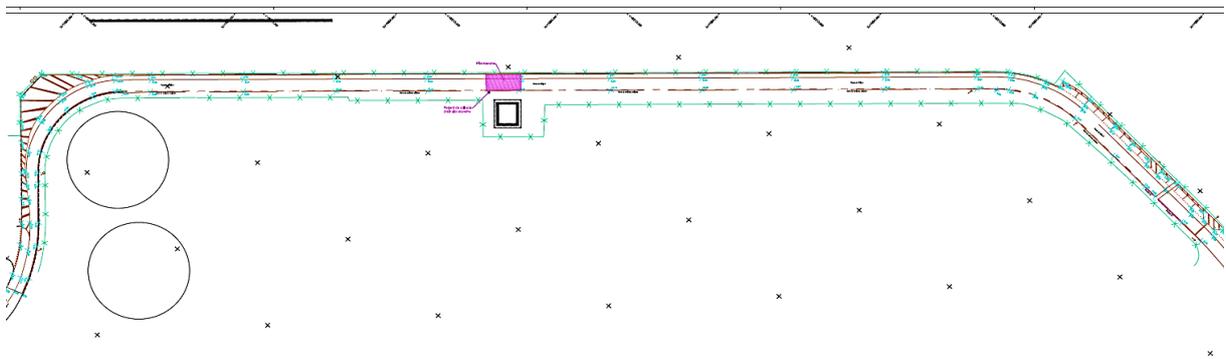


Figure 48: Profil de la route Freycinet 12 à base de sédiment marin

La construction a commencé avec le retrait de l'ancienne route existante. Une couche de sable de dragage de 20 cm d'épaisseur a d'abord été placée sur la plate-forme puis stabilisée avec une niveleuse. Une deuxième couche de sédiments fins de 10 cm d'épaisseur a ensuite été étalée. L'homogénéisation des deux matériaux a été réalisée à l'aide un malaxeur épandeur. Le lendemain, la chaux a été étendue à une proportion de 1% ($\approx 6 \text{ kg/m}^2$). A ce stade, la couche de fondation est composée de sable de dragage, sédiment marin non

immergeable et de chaux vive. La chaux a été utilisée afin de favoriser la floculation des particules fines de sédiments et de réduire la teneur en eau. Après une période de cure d'une durée de 24 h, l'étape d'épandage du liant hydraulique routier d'une proportion de 6% soit ($\approx 36 \text{ kg/m}^2$) a été réalisée. Une homogénéisation de l'ensemble des matériaux a ensuite été effectuée.

Dans l'étape finale du processus de réalisation, le mélange (sédiment marin, sable de dragage, chaux vive et liant hydraulique) a été compacté au vibro compacteur (vibrant classe dynamique V4). Une teneur en eau optimale est essentielle pendant le compactage pour atteindre une densité maximale. La teneur en eau et la densité ont été mesurées avec un gamma densimètre. La teneur en eau moyenne enregistrée était d'environ 10,4% et la densité sèche était de $1,98 \text{ t/m}^3$. Après le compactage de la couche de fondation, une période de repos de 7 jours a été imposée. Après les 7 jours de prise, une campagne de mesure de déflexion de la couche de fondation a été réalisée. La couche de base (type de mélange: EME 0/10 CC 2) de 5 cm d'épaisseur a ensuite été placée au sommet de la couche de fondation, suivie par une couche de roulement de type BBME 0/10 P C3 qui a été mis en place, conformément à la norme NF P 98 150-1. Les étapes de construction sont illustrées sur la Figure 49.

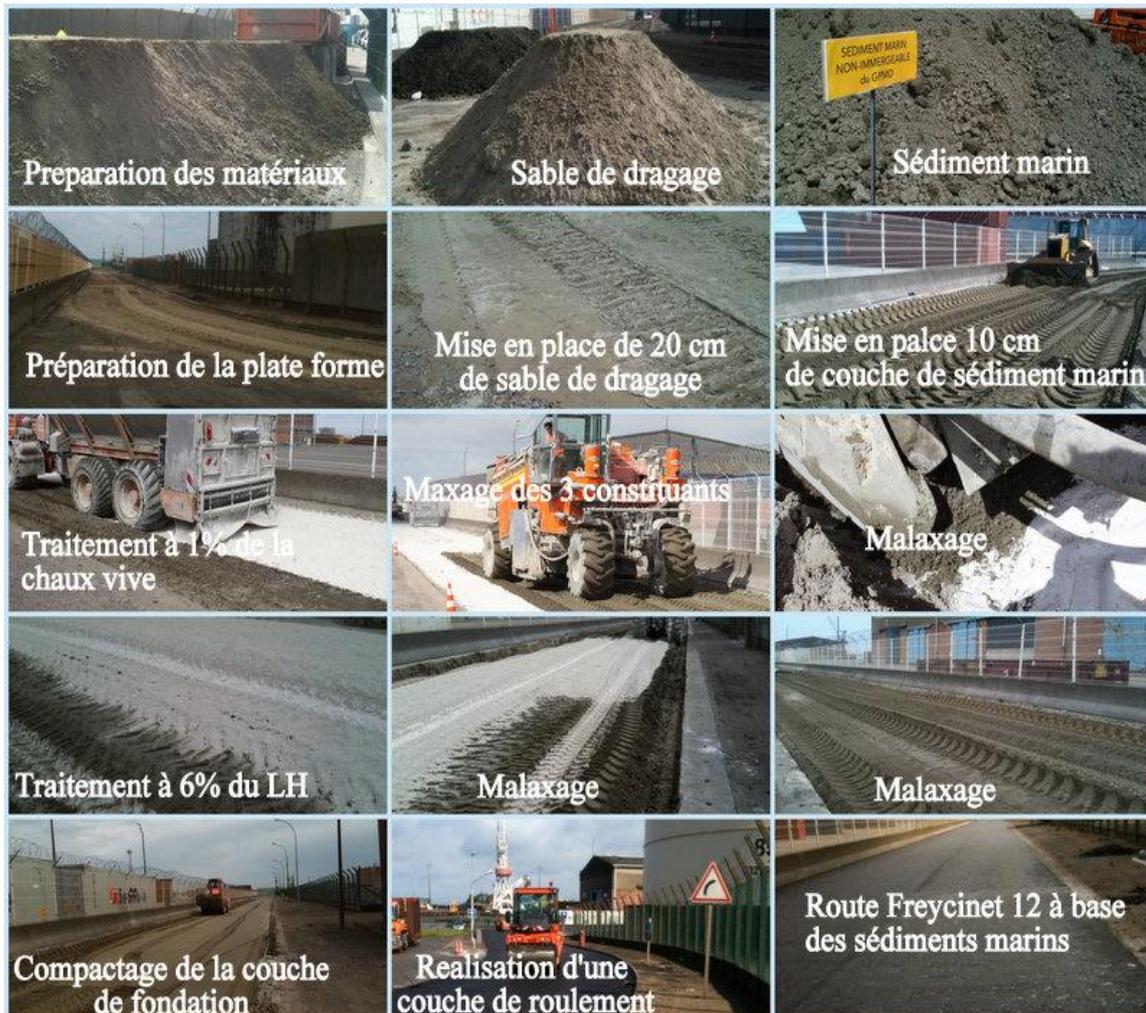


Figure 49: Etapes d'application de la formulation à base de sédiment en route expérimentale échelle1

3. Suivi mécanique de la route expérimentale

Le comportement mécanique de la formulation appliquée in situ a été évalué par la réalisation d'une campagne de carottage de la route expérimentale à 60 et à 360 jours. L'évaluation du comportement mécanique a été déterminée par l'essai de compression simple, l'essai de traction et le module élasticité.

3.1. Etude de comportement mécanique à 60 jours et 360 jours

La résistance à la compression du matériau prélevé de la couche de fondation à 60 jours et 360 jours a été évaluée selon la norme NF EN 13286-41. L'évaluation de la résistance à la compression à 60 jours était de l'ordre de 6,7 MPa, concernant l'échéance à 360 jours, la résistance a évolué pour atteindre une valeur de 7,5 MPa.

Quant à la résistance à la traction, l'étude a été réalisée selon la norme NF EN 13286-42. La résistance à la traction à 60 et 360 jours est respectivement de 0,75 MPa et 1,18 MPa. On constate qu'une nette évolution de la résistance a été enregistrée entre 60 et 360 jours. Les résultats de l'étude de la résistance à la traction sont en accord avec les résultats obtenus en laboratoire.

Afin de vérifier la classe du matériau à base de sédiment valorisé en couche de fondation, l'évaluation du module a été déterminée selon la norme NF EN 13286-43. Après 60 jours de cure, nous avons enregistré un module de 8,7 GPa et de 12 GPa à 360 jours.

D'après les résultats obtenus au niveau de la résistance à la traction et du module d'élasticité, la classification de la couche de fondation est présentée dans la Figure 50. L'estimation de la classification de la couche de fondation à 60 jours présente une classe S2 (classe minimale recommandée selon le guide GTS), concernant l'échéance à 360 jours, un gain de classe a été enregistré en se classant en S3. L'étude des performances mécaniques de la couche de fondation in situ montre un comportement comparable à celui obtenu en laboratoire (chapitre 2). Il s'agit d'un bon résultat qui permet de confirmer l'étude en laboratoire et de valider la formulation à base de sédiments. La valorisation d'un matériau routier à base de sédiment marin a été validée selon les performances mécaniques présentées sur une durée d'un an.

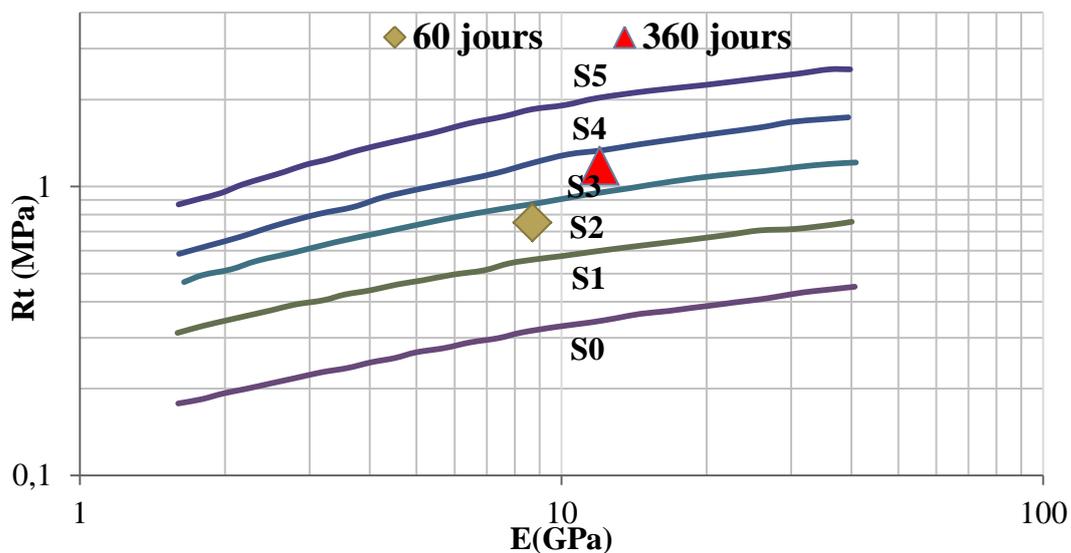


Figure 50: Classification des carottes à base de sédiment marin à 60 et 360 jours

3.2. Mesure de la déflexion de la route expérimentale à 7, 60 et 360 jours

Un autre aspect du comportement mécanique a été vérifié in situ par l'étude de la portance de la structure routière à base de sédiment vis-à-vis des sollicitations dues au trafic. La portance a été évaluée par la mesure de la déflexion. L'évaluation de la déflexion a été réalisée par la mesure ponctuelle de la déformation verticale de la route, sous la charge d'un essieu de véhicule de 13 tonnes, suivi par un système balancier telle que la poutre de BENKELMAN. La campagne de mesure de déflexion a été réalisée à 7, 60 et 360 jours.

Les résultats de mesure de la déflexion sont présentés dans le Tableau 20 ainsi que sur la Figure 51. D'après ces résultats, on enregistre une déflexion de la couche de fondation à 7 jours de l'ordre de 33,4/100 mm, cette valeur est inférieure à la valeur seuil en technique routière (<50/100mm). Concernant les mesures à 60 et à 360 jours, une amélioration au niveau de la déflexion sur l'ensemble de la structure routière a été enregistrée pour atteindre respectivement 17,9/100 mm et 18,7/100 mm. Ces résultats confirment la bonne prise de la structure routière à base de sédiment sur une durée de 360 jours.

Les résultats de l'étude de déflexion sont en accord avec les essais mécaniques réalisés sur les carottes prélevées de la route et avec les résultats obtenus en laboratoire. Ceci confirme la bonne performance de la route et la possibilité de valorisation du sédiment marin en structure routière.

<i>Date</i>	<i>Mesure de déflexion</i>		
	<i>Support</i>	<i>Déflexion</i>	<i>Recommandations</i>
7 jours	<i>Couche de fondation : 30 cm à base de sédiment</i>	<i>33,4/100 mm</i>	<i>< 50/100 mm</i>
60 jours	<i>Couche de roulement: 5cm Couche de Base : 10 cm Couche de fondation: 30cm à base de sédiment</i>	<i>17,9/100 mm</i>	<i>< 50/100 mm</i>
360 jours	<i>Couche de roulement: 5cm Couche de Base : 10 cm Couche de fondation: 30cm à base de sédiment</i>	<i>18,7/100 mm</i>	<i>< 50/100 mm</i>

Tableau 20: Résultat de mesure de déflexion à 7,60 et 360 jours

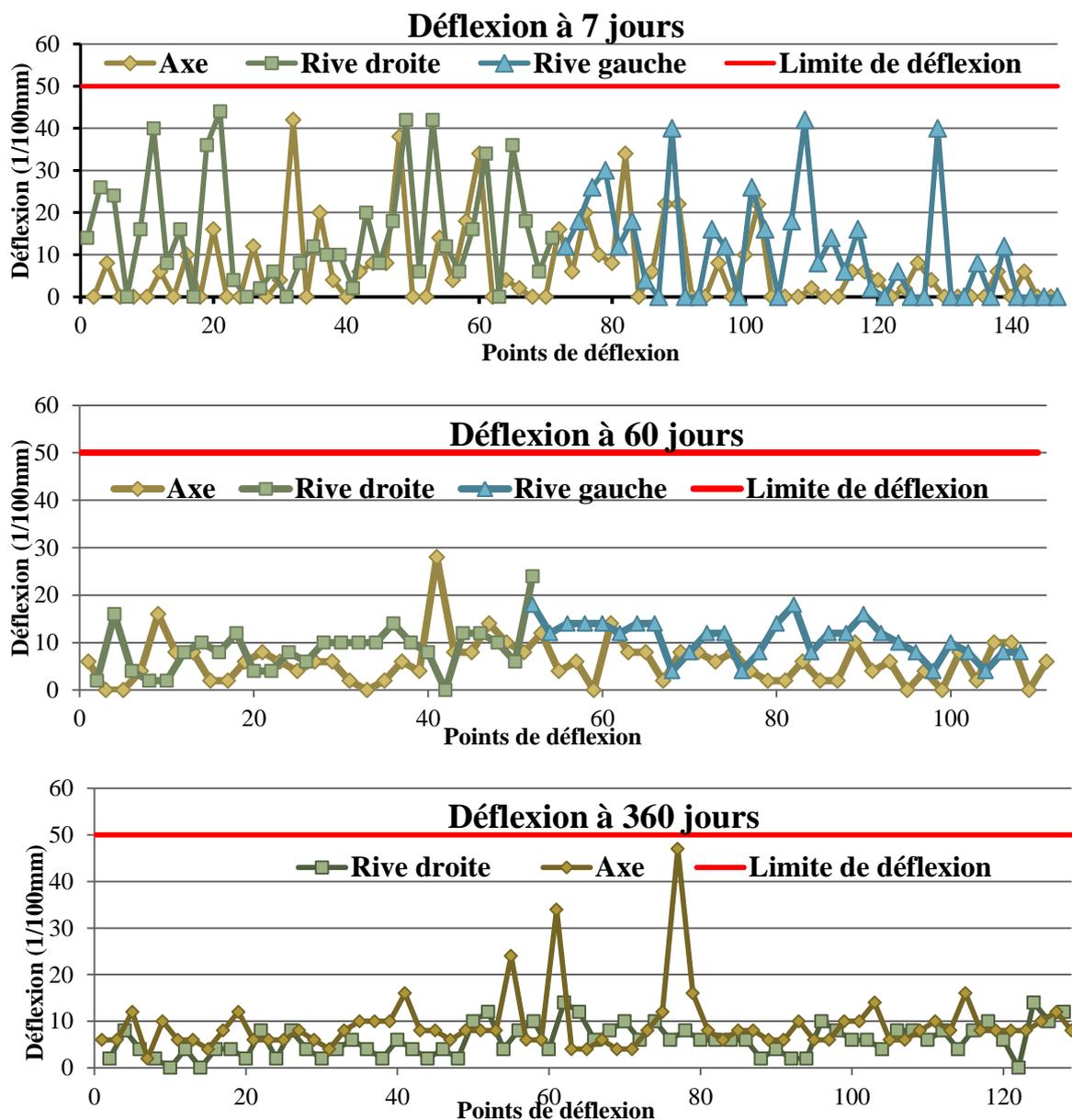


Figure 51: Diagramme de déflexion de la route expérimentale à 7, 60 et 360 jours

4. Suivi environnemental de la route : caractérisation environnementale du matériau à base de sédiment de la route expérimentale à 60 jours et 360 jours

L'implantation d'une nouvelle route expérimentale à base de sédiment marin peut avoir des incidences sur l'environnement. Le suivi environnemental de la route consiste à caractériser, identifier et quantifier l'impact sur l'environnement suite à la valorisation d'un matériau routier à base de sédiment marin. L'étude de suivi environnemental consiste à une caractérisation du matériau prélevé de la couche de fondation de la route à 60 et à 360 jours.

En effet, la couche de fondation à base de sédiment marin peut relarguer dans l'environnement un certain nombre de composés plus ou moins toxiques pour l'environnement et l'homme. Ce relargage dépend beaucoup des conditions météorologiques (lessivage, ruissellement...) auxquelles est soumise la route, mais aussi de la nature des sols et de la présence ou non de zones sensibles (réseau hydrogéologique, présence de zones naturelles écologiques protégées...). Des essais de lixiviation sur des matériaux prélevés de la couche de fondation à base de sédiments ont été réalisés à 60 et à 360 jours selon la norme EN 12 457-2. Le Tableau 21 présente les résultats d'analyse sur les éluats des matériaux prélevés.

D'après les résultats obtenus, les mesures des éléments traces métalliques réalisées sur les éluats, présentent des concentrations très inférieures aux valeurs limites de lixiviation pour une utilisation en technique routière selon les recommandations du guide acceptabilité de matériaux alternatifs en technique routière « Sétra, 2012 ». Les concentrations obtenues à 60 jours et à 360 jours sont en accord avec les résultats obtenus en laboratoire. D'après cette investigation, le matériau à base de sédiment marin valorisé en couche de fondation ne présente pas de risque sur l'environnement.

<i>Quantité relarguée cumulée à L/S=10l/kg (Essai de lixiviation NF EN 12-457-2)</i>					
<i>Éléments</i>	<i>Valeur en mg/kg MS Sédiment traité en 60jours</i>	<i>Valeur en mg/kg MS Sédiment traité en 360 jours</i>	<i>Valeur à respecter par au moins 100% des échantillons (mg/kg de MS)</i>	<i>Valeurs limites à ne pas dépasser en contenu total pour être candidat à une utilisation en T.R (mg/kg de MS)</i>	<i>Validation</i>
<i>As</i>	<i><0,10</i>	<i><0,02</i>	<i>1,5</i>	<i>2</i>	<i>Oui</i>
<i>Ba</i>	<i>5,70</i>	<i>11,90</i>	<i>60</i>	<i>100</i>	<i>Oui</i>
<i>Cd</i>	<i><0,04</i>	<i><0,004</i>	<i>0,12</i>	<i>1</i>	<i>Oui</i>
<i>Cr</i>	<i><0,12</i>	<i><0,030</i>	<i>1,5</i>	<i>10</i>	<i>Oui</i>
<i>Cu</i>	<i>1,82</i>	<i>2,86</i>	<i>6</i>	<i>50</i>	<i>Oui</i>
<i>Hg</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>0,03</i>	<i>0.2</i>	<i>Oui</i>
<i>Mo</i>	<i>0,18</i>	<i>0,28</i>	<i>1.5</i>	<i>10</i>	<i>Oui</i>
<i>Ni</i>	<i>0,13</i>	<i>0,16</i>	<i>1.2</i>	<i>10</i>	<i>Oui</i>
<i>Pb</i>	<i>0,10</i>	<i>0,13</i>	<i>1.5</i>	<i>10</i>	<i>Oui</i>
<i>Sb</i>	<i><0,06</i>	<i><0,06</i>	<i>0.18</i>	<i>0.7</i>	<i>Oui</i>
<i>Se</i>	<i><0,10</i>	<i><0,07</i>	<i>0.3</i>	<i>0.5</i>	<i>Oui</i>
<i>Zn</i>	<i><0,10</i>	<i><0,052</i>	<i>12</i>	<i>50</i>	<i>Oui</i>
<i>Chlorure</i>	<i>1213</i>	<i>1820</i>	<i>2400</i>	<i>15000</i>	<i>Oui</i>
<i>Sulfate</i>	<i>220</i>	<i>300</i>	<i>3000</i>	<i>20000</i>	<i>Oui</i>
<i>Fraction soluble</i>	<i>6660</i>	<i>13000</i>	<i>12000</i>	<i>60000</i>	<i>Oui</i>
<i>pH</i>	<i>12,94</i>	<i>12,5</i>			

Tableau 21: Résultats des analyses sur les carottes à 60 et 360 jours

Conclusion

L'application de la formulation étudiée en laboratoire en grand échelle par la réalisation de 550 m de route réelle à base de sédiment non-immmergeable à Dunkerque est une première à l'échelle industrielle et en France.

La campagne de suivi mécanique de la route a montré des bonnes performances et a permis de placer en classe S3 à l'échéance 360 jours. La classification en S3 du matériau routier à base de sédiment confirme bien les résultats obtenus en laboratoire. L'évaluation environnementale de la route sur une durée de 360 jours a montré des seuils inférieurs aux seuils définis par le guide Sétra, 2012. D'après l'investigation réalisée sur la formulation de la route réalisée à base de sédiments marins nous avons montré la compatibilité entre les résultats in situ et en laboratoire.

La méthodologie employée dans notre étude a montré la possibilité de valorisation d'un matériau considéré comme déchet, cette méthodologie a défini une démarche expérimentale par un prétraitement dans des bassins de décantation, traitement du sédiment par ajout granulaire et liant hydraulique, valorisation in situ par la réalisation d'un ouvrage routier à base d'un matériau alternatif. Avec l'application de cette méthodologie, la valorisation du sédiment dans le génie civil est rendue possible suite aux différentes études et investigations mécaniques et environnementales afin de trouver des solutions durables.

Partie 3

**Etude de durabilité du béton
à base du sédiment marin**

Chapitre 4

Démarche expérimentale et objectifs

Il est essentiel que chaque structure en béton puisse conserver ses propriétés mécaniques d'origine et continuer de remplir sa fonction tout au long de sa vie utile. Il en résulte que le béton doit être en mesure de résister aux mécanismes de détérioration auxquels il peut être exposé. On dit d'un tel béton qu'il a une bonne durabilité [Neuville, A.M., 2000]. Pour évaluer la durabilité « potentielle » du béton, il est nécessaire de connaître les mécanismes qui peuvent conduire à sa dégradation, et d'évaluer la résistance du matériau vis-à-vis de ces dégradations. Si l'on exclut, d'une part les actions accidentelles, et d'autre part les effets à long terme des sollicitations mécaniques, tels que la fatigue due aux sollicitations répétées ou le fluage pouvant engendrer des pertes de précontrainte ou encore l'abrasion, la durée de vie des ouvrages en béton armé ou précontraint peut être limitée par [AFGC, 2004] :

- Les réactions chimiques internes, telles que l'alcali-réaction ou les attaques sulfatiques, mettant en jeu des espèces issues du milieu environnant ou déjà présentes dans le matériau. Ces réactions sont les sources de gonflement et de fissuration du béton ;
- Les cycles de gel-dégel qui entraînent les gonflements et fissuration du béton par gel interne et un écaillage des surfaces exposés aux sels.

L'étude menée dans cette partie de thèse porte sur la caractérisation et l'identification par des essais non destructifs et destructifs de deux types de béton à base de sédiment marin, suivie d'une étude spécifique de durabilité. Nous nous sommes concentrés à identifier et évaluer certains paramètres pouvant servir d'indicateurs de durabilité (impact gel-dégel, attaque sulfatique externe, réaction alcali-granulat) et d'observer le comportement d'un nouveau béton à base de sédiment marin. Les essais ont été choisis selon la voie de valorisation envisagée par le GPMD.

L'intégration des sédiments marins fins dans un béton a été réalisée sur du béton à deux taux d'incorporation :

- le premier béton intègre 12,5% de sédiment marin nommé B1;

- le deuxième béton à base de 20% de sédiment marin nommé B2.

Les bétons étudiés ont été développés pour la fabrication des blocs pour la protection d'ouvrages marins. Les ouvrages en site maritime sont spécifiques pour plusieurs raisons. Leur spécificité est d'abord liée à la variété des types de structure. Ensuite, la réalisation de ces ouvrages est soumise à des contraintes de mise en œuvre particulières. Enfin, ces ouvrages sont exposés à un environnement agressif qui cumule souvent des facteurs favorisant la détérioration précoce du béton. En premier lieu l'agression spécifique de l'eau de mer est multiple : chimique par la composition minérale du milieu et mécanique du fait de ses déplacements. On peut également citer les effets climatiques tels que les variations de la température, l'ensoleillement et le vent qui peuvent inhiber et catalyser les réactions entre l'eau de mer et les constituants du béton.

Les blocs béton à base de sédiment marin qui font l'objet de cette étude seront exposés à un environnement maritime et seront de même soumis à plusieurs types d'agression :

- agressions mécaniques dues aux sollicitations d'exploitations des ouvrages ;
- agressions chimiques dues à la pénétration des sels ;
- agressions biologiques dues au développement d'organismes vivants ;
- attaques internes au béton dues aux réactions alcali-granulats et sulfatique externe ;
- attaques d'origine climatique associée au phénomène de gel/dégel.

Dans notre cas d'étude où les blocs béton à base de sédiment marin seront soumis sollicitations cités ci-dessus, nous avons mis une démarche d'étude de durabilité en s'appuyant sur une approche performantielle.

L'approche performantielle consiste à appréhender la durabilité des bétons en considérant non pas les seules données liées à la formulation mais certaines caractéristiques ou propriétés du matériau dont on sait qu'elles présentent un intérêt pour prévoir l'évolution de celui-ci lorsqu'il est exposé à des conditions environnementales données. Différents concepts sont aujourd'hui développés afin de pouvoir mettre en œuvre une approche performantielle de durabilité. Les deux principaux concepts correspondent, d'une part, à la méthode basée sur des indicateurs de durabilités et, d'une part, au système reposant sur l'utilisation des essais de performance [Barghel-Bouny, V., 2008].

Les indicateurs de durabilité présentent des paramètres qui apparaissent comme fondamentaux dans l'évaluation et la prédiction de la durabilité du matériau et de la structure vis-à-vis du processus de dégradation [Barghel-Bouny, V., 2006]. Ces paramètres doivent être aisément quantifiables à partir des essais de laboratoires pratiqués sur des éprouvettes ou sur des prélèvements, de façon reproductible et selon des modes opératoires bien définis. Deux catégories d'indicateurs de durabilité sont distinguées dans le guide AFGC conception des bétons pour une durée de vie donnée d'ouvrage [Barghel-Bouny, V., 2004]:

- indicateurs de durabilité généraux (valables pour la plupart des dégradations);
- indicateurs de durabilité spécifiques à un processus de dégradation donné (par exemple l'alcali-réaction).

Des essais de performance permettent donc d'évaluer le comportement du béton soumis à des sollicitations physico-chimiques du même type que celle auxquelles l'ouvrage sera exposé, mais souvent amplifiées. Ces essais ont pour but premier de permettre un classement approprié des bétons vis-à-vis de leur résistance à une agression particulière. Les essais sont conçus pour accroître l'intensité de la sollicitation, qu'elle soit physique ou chimique. Ces essais reposent sur la répétition de cycles pour lesquels les conditions varient de manière importante : cycles gel/dégel, cycles d'humidification/séchage, [Barghel-Bouny, V., 2008].

Barghel-Bouny, V., 2008 explique aussi qu'une telle approche offre la possibilité de prendre en compte non seulement des paramètres techniques pertinents ainsi que la durée de vie, mais également des paramètres socio-économiques (importance économique de l'ouvrage, impact sur l'environnement, insertion dans le tissu urbain, risques d'agression divers, durée de vie, esthétique...).

Dans ce cadre nous nous intéressons à évaluer l'impact de l'intégration de sédiment marin dans le béton par la contribution à la caractérisation par des méthodes destructives et non destructives et en terme de durabilité selon l'approche performantielle.

1. Implantation des futurs blocs de béton à base de sédiment marin

Les blocs de béton qui font l'objet de cette étude ont été développés dans le but de protéger les ouvrages portuaires du GPMD. Ces blocs seront implantés à proximité de l'avant-port ouest pour le maintien et le renforcement des digues de Ruytingen, la jetée du Clipon ou encore la jetée du Dyck et la jetée des Huttes (Figure 52). Le projet consiste à

fabriquer près de 200 blocs de béton à base de sédiment marins pour protéger ces jetées. La zone du projet comporte de 200 m de long, 50 m de large et 20 m de profondeur. Les blocs seront positionnés dans la zone de marnage et subiront donc plusieurs phases d'immersion et d'émersion.

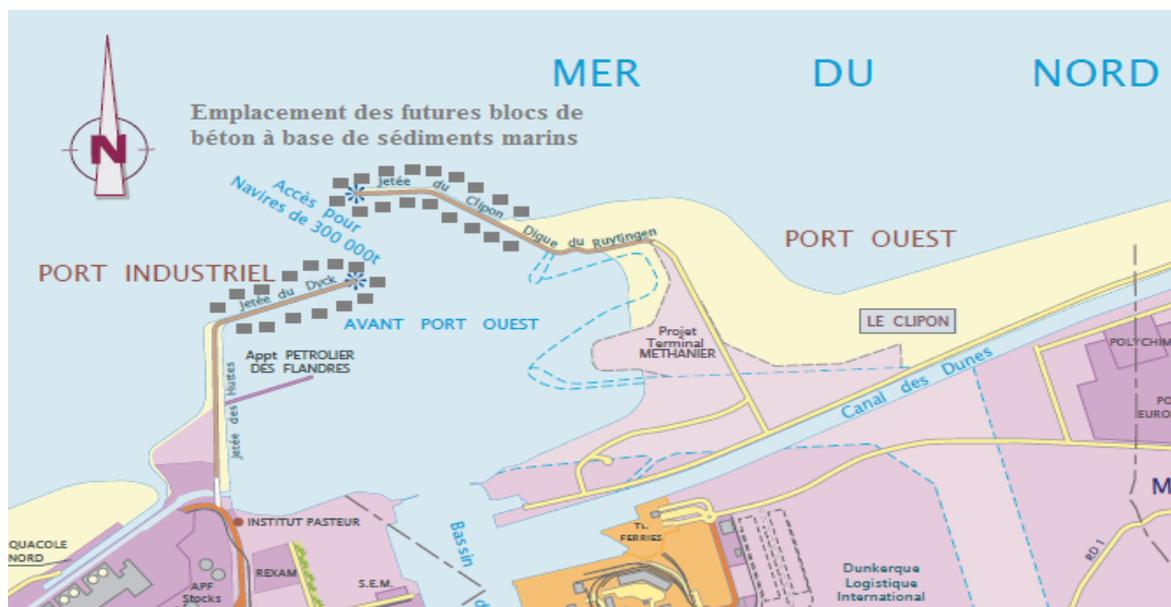


Figure 52: Position des futurs blocs de béton à base de sédiment marin

2.Contexte

Préalablement à la construction des 200 blocs de béton à base de sédiment marin, en 2010, le GPMD, à travers une entreprise de BTP, a fabriqué six blocs témoins intégrant les sédiments marins : trois blocs à 12,5% et trois blocs à 20% (la formulation est tenue confidentielle). Sur les six blocs, deux sont utilisés pour mener cette étude (un bloc intégrant 12,5% et un intégrant 20% de sédiment). En 2012 une campagne de carottage des deux blocs a été réalisée conformément à la norme NF EN 12 504-1. Après la campagne de carottage, les éprouvettes de 110mm de diamètre et de 220 mm ont été sciées et préparées. Les échantillons de chaque bloc ont été ensuite mis dans des sacs en plastique fermés afin de les protéger contre la dessiccation. La description de la campagne de carottage est illustrée par la Figure 53.



Figure 53: Campagne de carottage sur deux blocs de béton intégrant 12,5% et 20% du sédiment marin

3.Objectifs

Cette partie s'inscrit dans le cadre de la mise en œuvre d'une politique de développement durable par la valorisation des sédiments marins en béton. Les travaux de recherche portent sur l'étude de béton à base de sédiment marin fin prélevés dans des blocs (Figure 54).

Les objectifs de cette étude consistent en :

- une caractérisation à l'aide de méthodes non destructives innovantes des deux bétons à base de sédiment marin. Dans cette partie la démarche méthodologique, le programme expérimental et les techniques d'analyses seront discutées ;
- une évaluation de durabilité sur les deux bétons par des essais de performance (gel/dégel, attaques sulfatique externe et réaction alcali-granulats);

- une évaluation de l'impact environnemental ;
- une comparaison des résultats afin de comprendre l'influence de l'ajout des sédiments en termes de durabilité dû à l'endommagement par des cycles gel-dégel, attaque sulfatique externe ainsi que la RAG.

L'évolution des paramètres et des indicateurs de durabilité permettent de faire progresser les connaissances et même de promouvoir la valorisation de ces sédiments.

4. Méthodologies d'étude de caractérisation et de durabilité des bétons à base de sédiment

Cette partie présente l'approche expérimentale adoptée, les différentes campagnes expérimentales réalisées et les techniques de mesure et d'analyse utilisées.

Afin d'évaluer les indicateurs de durabilité des deux bétons à base de sédiment marin, la méthodologie employée se divise en trois phases principales. La première phase porte sur une caractérisation avec des moyens non destructifs par l'emploi des méthodes dites linéaires et non linéaire, une caractérisation avec des moyens destructifs et enfin une caractérisation microstructurale (chapitres 5). La seconde phase porte sur l'étude de durabilité des deux bétons après des cycles gel/dégel, mis en condition pour une attaque sulfatique externe et des essais en solution alcaline afin d'évaluer le potentiel de réactivité du sédiment marin (chapitre 6). Enfin, la troisième phase traite le volet impacts environnementaux par des essais de lixiviation sur les deux types de bétons (chapitre 7).

5. Programme expérimental

Le programme expérimental entrepris pour répondre aux objectifs fixés est défini dans le diagramme de la Figure 54. Pour chaque type d'essai et chaque niveau de sollicitation les paramètres et les indicateurs mesurés sont indiqués :

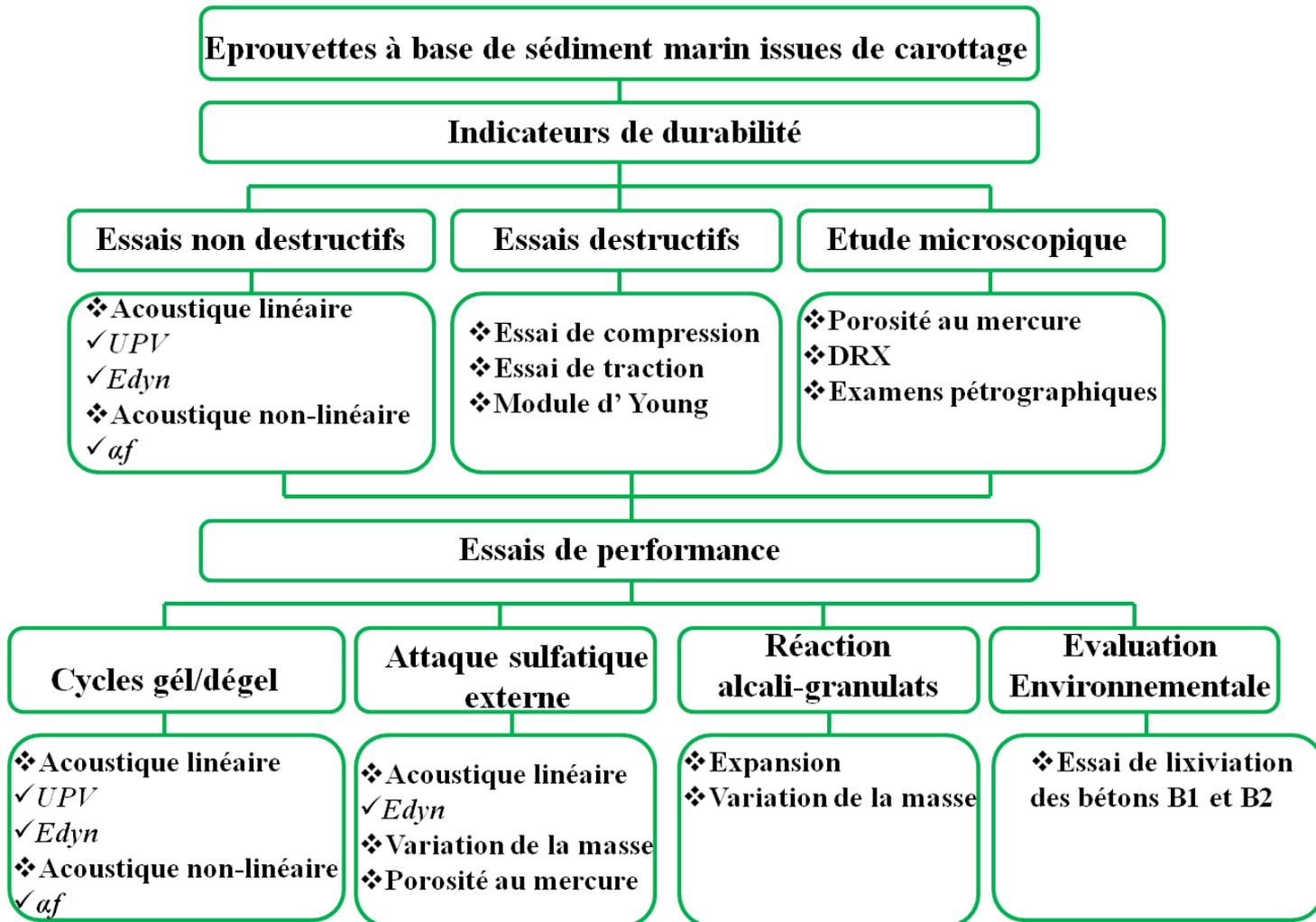


Figure 54: Diagramme du programme expérimental d'étude de durabilité des bétons B1 et B2

UPV : ultrasonic pulse velocity

Edyn : module d'élasticité dynamique

DRX : diffraction rayon X

af : décalage fréquentiel

Chapitre 5

Caractérisation des bétons B1 et B2 à base de sédiment marin

1. Caractérisation non destructive des bétons B1 et B2.

1.1. Introduction

La caractérisation par essai non destructif (END) est une voie usuelle pour évaluer et identifier la résistance potentielle d'un ouvrage. L'objectif principal de ces essais appliqués sur le béton est de fournir une évaluation de la qualité du matériau, quel que soit son âge et son état de dégradation. Dans le domaine du génie civil, l'utilisation des essais non destructifs permet d'estimer les propriétés du béton in situ et apporte une aide au diagnostic de l'état d'un ouvrage de béton. Dans une stratégie privilégiant le suivi dans le temps, l'entretien et la maintenance des ouvrages à la reconstruction, le suivi non destructif présente un intérêt majeur sur le plan fonctionnel et économique [Soltani, F., 2011].

Afin de caractériser un béton sans atteinte à l'intégrité de la structure, plusieurs travaux ont été menés à l'Université de Sherbrooke, notamment sur les ondes dispersives de Rayleigh et de Lamb [Al Wardany, R., et al., 2009], en acoustique non linéaire (dynamique rapide ou technique de saut temporel [Kodjo, S., 2008]), sur les méthodes électromagnétiques [Sbartai, Z.M., 2005] ou en thermographie infrarouge [Ostrowski, C., 2005 ; Naar, S., 2006].

Parmi les essais non destructifs les plus utilisés dans la caractérisation et la détection des fissures, on compte les techniques acoustiques linéaires comme la technique de résonance linéaire (norme ASTM C 215-02) et la technique de vitesses d'ondes ultrasoniques (norme ASTM C 597-97). Ces méthodes sont relativement peu sensibles pour de faibles niveaux d'endommagement, alors qu'une détection rapide des modifications du béton améliore l'efficacité de l'entretien ainsi que la vie de l'ouvrage [Moradi-Marani et Rivard, P., 2013].

En raison de l'interaction entre la propagation des ondes élastiques et les propriétés des ultrasons, des techniques moyennes, telles que celles fondées sur la mesure de l'atténuation ou de la vitesse d'impulsion, ont été largement utilisées dans les dernières décennies pour évaluer les propriétés mécaniques des matériaux cimentaires [Qasrawi, H.Y., 2000; Kim, B.C., et Kim J.Y., 2009]. On note aussi les techniques acoustiques non linéaires en dynamique rapide qui

ont montré une bonne efficacité dans la caractérisation des bétons et le degré de dégradation des bétons [Kodjo, S., 2008].

L'investigation à l'aide d'END d'un nouveau béton à base de sédiment marin est une première.

1.2. Mesures par acoustique linéaire des bétons B1 et B2

1.2.1. Evaluation de la vitesse des ondes ultrasonores UPV

La caractérisation non destructive des structures en béton par propagation d'ondes ultrasonores permet d'accéder aux vitesses voire aux atténuations et aux spectres fréquentiels pour diagnostiquer une pathologie ou un état du matériau [Garnier, V., 2009].

La vitesse de propagation des ondes ultrasonores de compression (*ultrasonic pulse velocity* noté UPV) représente le paramètre non destructif le plus répandu pour l'auscultation du béton. Elle constitue un moyen rapide et facile pour la détermination des propriétés élastiques d'un béton, qu'on peut ensuite relier à sa résistance. Cet essai est basé sur la mesure du temps de propagation des ondes de volume en transmission directe.

La classification de la qualité du béton, en fonction de l'UPV est présentée dans le Tableau 22.

<i>UPV, m/s</i>	<i>Qualité du béton</i>
<i>Plus de 4570</i>	<i>Excellente</i>
<i>3660 à 4570</i>	<i>Globalement bonne</i>
<i>3050 à 3660</i>	<i>Discutable</i>
<i>2130 à 3050</i>	<i>Globalement mauvaise</i>
<i>Moins de 2130</i>	<i>Très mauvaise</i>

Tableau 22: *Qualité du béton selon la vitesse des ondes ultrasonores de compression [Carino, N.J. 2003].*

La méthode de détermination d'UPV a fait ses preuves dans l'évaluation des bétons dégradés, plusieurs travaux ont été réalisés afin d'évaluer le comportement d'une onde ultrasonore se propageant d'un milieu ayant subi un traitement thermique (choc thermique ou cycles gel/dégel) [Boukari, Y., 2011], ou encore mécanique [Antonaci, P., et al., 2010]. La plupart des travaux ont montré la sensibilité du paramètre de propagation par la diminution de vitesse à différentes étapes de changements des propriétés du matériau ou de composition. La vitesse de propagation est le paramètre qui permet d'obtenir une information qualitative sur le matériau.

Les mesures de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores ont été déterminées sur six échantillons (3 échantillons pour chaque type de béton) conformément aux standards américains ASTM C 597-97 (Figure 55). Les échantillons sont conservés dans des conditions de température et d'humidité ambiantes.



Figure 55: AndeScope de mesure d'UPV

La Figure 56 représente les résultats obtenus après une série d'essais sur les deux types de bétons.

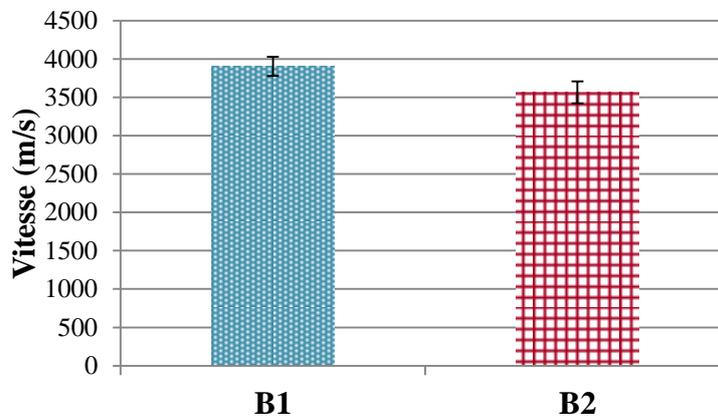


Figure 56: UPV des bétons à 12,5% et 20% du sédiment marin

D'après les résultats obtenus, on observe que le béton B1 présente de bonnes performances et d'après le tableau de classification (Tableau 22) ce dernier se classe comme un béton de bonne qualité. L'ajout de 7,5% de sédiment marin en plus dans le deuxième béton a provoqué une baisse de l'ordre de 300m/s d'UPV, ce qui induit à une qualité discutable du béton. D'après l'investigation par END, l'étude a montré la sensibilité du paramètre UPV suite à l'incorporation d'une quantité plus importante de sédiment marin dans le béton B2.

Cette sensibilité peut être expliquée par l'augmentation de la porosité et l'hétérogénéité du béton suite à l'ajout du sédiment marin.

1.2.2. Evaluation du module d'élasticité dynamique

L'essai d'évaluation du module dynamique est décrit dans la norme ASTM C 215-02, l'essai consiste à mesurer la fréquence de résonance d'un échantillon de béton cylindrique soumis à un impact d'une bille à la surface de l'éprouvette. Cette méthode est appelée aussi méthode impact-éco, le principe de cette méthode consiste à calculer le module d'élasticité dynamique du béton testé à partir des fréquences de résonance selon le mode longitudinal, transversal et de torsion.

Les tests de résonance ont été réalisés à l'aide de l'appareil AndeScope en mode impact-éco. La fréquence d'échantillonnage de l'appareil de mesure est de 50 kHz. Le principe consiste à enregistrer la réponse à un impact-éco mécanique à l'aide d'un capteur positionné en surface de l'éprouvette pour les fréquences de résonance transversale. Pour les fréquences de résonance longitudinale, le récepteur est placé au milieu de l'échantillon (Figure 57). L'interprétation des résultats est basée sur l'analyse du temps de propagation d'onde réfléchie.

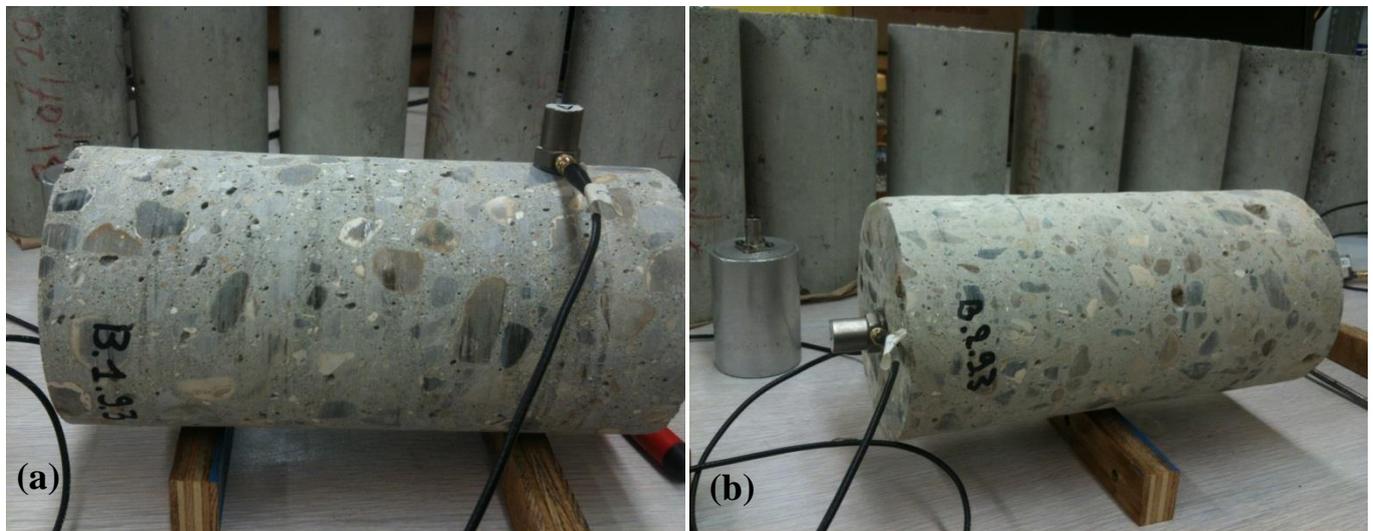


Figure 57: a) Montage pour mesurer la fréquence transversale ; (b) Fréquence longitudinale à l'aide d'AndeScope

Le module d'élasticité dynamique pour les deux bétons B1 et B2 a été calculé à partir des fréquences de résonance en mode transversal et longitudinal.

Les résultats des essais en termes de module dynamique sont présentés sur la Figure 58.

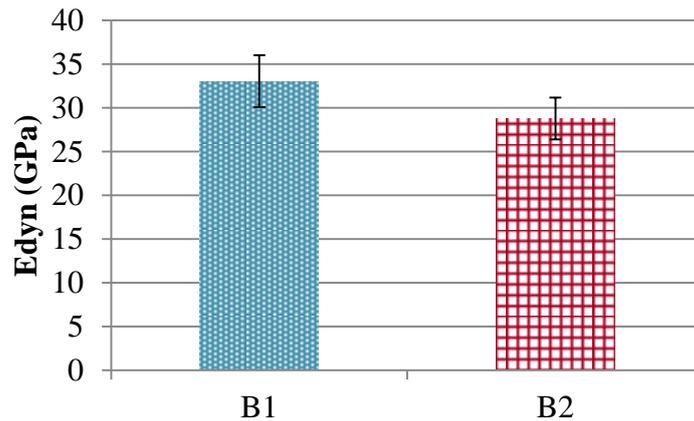


Figure 58: Variation du module d'élasticité dynamique

Comme nous l'avons constaté dans les mesures de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores de compression d'UPV, le béton B1 présente un module plus important que le béton B2. Une perte au niveau du module d'élasticité dynamique, liée à l'ajout du sédiment marin, a été observée. On constate que le sédiment marin a affecté le module d'élasticité, plus le béton contient du sédiment, plus la perte de rigidité est importante (perte estimée à 5 GPa).

D'après les mesures réalisées, nous avons constaté que le module dynamique a présenté une sensibilité à l'ajout du sédiment, le module dynamique E_{dyn} est un paramètre adapté dans notre investigation.

1.3. Acoustique non linéaire : Résonance en dynamique rapide

1.3.1. Introduction

L'acoustique non linéaire de par sa très grande sensibilité à l'endommagement diffus ou localisé des matériaux, semble être une nouvelle voie très prometteuse pour le contrôle et l'évaluation non destructive. En opposition à l'acoustique linéaire, l'acoustique non linéaire met en jeu des ondes de fortes amplitudes capables d'introduire localement des déformations importantes du milieu lors de sa propagation, ces déformations vont provoquer la modification des propriétés mécaniques du milieu entraînant des comportements non linéaires [Kodjo, S., 2008].

L'hétérogénéité du béton induit naturellement de la non-linéarité [Guyer, R.A., et Johnson, P.A., 1999]. La grande sensibilité de l'acoustique non-linéaire en dynamique rapide permet de distinguer la qualité de chaque échantillon de béton, même lorsqu'ils sont issus d'une même gâchée et conservés dans des conditions similaires. Ces essais d'acoustique non-linéaire permettent d'obtenir des paramètres sensibles aux microfissures.

Le banc d'essais utilisé dans la caractérisation des carottes à base de sédiment marin a été développé à l'université de Sherbrooke. La description détaillée de la mise en place du banc d'essais est disponible dans la mémoire de thèse de Kodjo, S., 2008. Le dispositif expérimental utilisé est illustré dans la Figure 59.

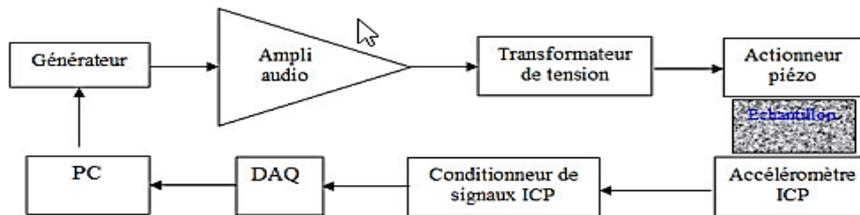


Figure 59 : Montage expérimental d'acquisition de résonance non linéaire [Kodjo, S., 2008].

Le dispositif est composé de :

- d'un générateur de basse fréquence de tension d'impédance de sortie 50Ω connecté à l'ordinateur pour générer la tension souhaitée ;
- d'un amplificateur audio ;
- pour atteindre les hautes tensions, la tension fournie par l'amplificateur audio est élevée par un transformateur élévateur de tension de transformation $m=0,03$, afin de permettre d'atteindre une tension de 885 V pour un courant très faible (inférieur à 60mA) lorsque le générateur délivre une tension de 2V.
- un actionneur piézoélectrique reçoit la tension amplifiée par cette première partie de chaîne et transmet une énergie mécanique à l'échantillon testé. L'échantillon est donc excité par une onde continue sinusoïdale variable en fréquence.
- un accéléromètre est collé sur l'autre surface de l'échantillon et mesure l'accélération de vibration reçue et détecte le signal après la propagation.
- le signal détecté par l'accéléromètre est amplifié puis numérisé par une carte d'acquisition de National Instruments de fréquence d'échantillonnage 250 kHz.
- un programme développé sous NI LabView permet de piloter l'acquisition, le traitement et l'extraction des données et déterminer les paramètres non linéaires du matériau. [Boukari, Y., 2011].

Le principal paramètre déterminé selon cette méthode est :

- le décalage fréquentiel :

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \alpha f \cdot \Delta \varepsilon \quad \text{Eq. 10}$$

Avec :

Δf : $f - f_0$: le décalage entre une fréquence f est la fréquence de résonance naturelle linéaire f_0 ;

αf : décalage fréquentiel ;

$\Delta \varepsilon$: l'amplitude de déformation moyenne à la fréquence f .

Le paramètre de variation αf d'acoustique non-linéaire permet donc de représenter l'augmentation progressive de l'hétérogénéité entre les différents échantillons [Boukari, Y., 2011].

1.3.2. Caractérisation des bétons B1 et B2 par la méthode de résonance en dynamique rapide

La campagne d'essais a été réalisée sur six éprouvettes de béton (3 éprouvettes B1 et 3 éprouvettes B2). La tension d'excitation des actionneurs piézoélectriques a été variée de façon linéaire de 40V ce qui correspond à un premier balayage fréquentiel effectué à une amplitude de déplacement de $1,7 \cdot 10^{-5}$ mm, des séries de balayage fréquentiel de 1000Hz sont appliquées successivement par la suite avec une amplitude de sollicitation croissante jusqu'à $40 \cdot 10^{-5}$ ce qui correspond à 885V (Figure 60).

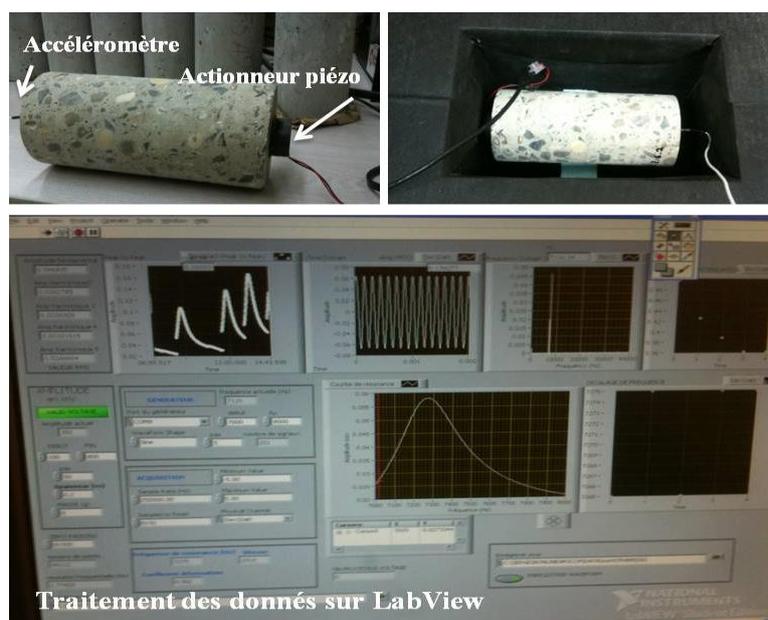


Figure 60: Montage et traitement des données d'essai acoustique en dynamique rapide

Dans cette étude, nous avons mesuré le paramètre αf . Les résultats présentés dans la Figure 61 comparent le paramètre de décalage fréquentiel αf entre les deux bétons. D'après ces résultats, on observe que le béton B2 possède un décalage de fréquence αf plus important que celui du béton B1 (10338 contre 8272). Ceci comme observé lors de l'investigation acoustique linéaire, l'incorporation d'un taux élevé de 7,5% de plus dans le béton B2 a diminué les performances du béton. La variation du décalage fréquentiel entre le béton B1 et B2 confirme la présence d'une forte hétérogénéité entre les deux bétons causée par l'ajout du sédiment. La forte hétérogénéité du béton B2 a conduit à des phénomènes de diffusion et de non linéarité acoustique.

La méthode de résonance en dynamique rapide semble efficace, cette dernière nous a permis de déterminer le comportement non linéaire et de montrer une sensibilité dans la caractérisation des deux bétons, ainsi nous a permis d'apporter une nouvelle preuve .

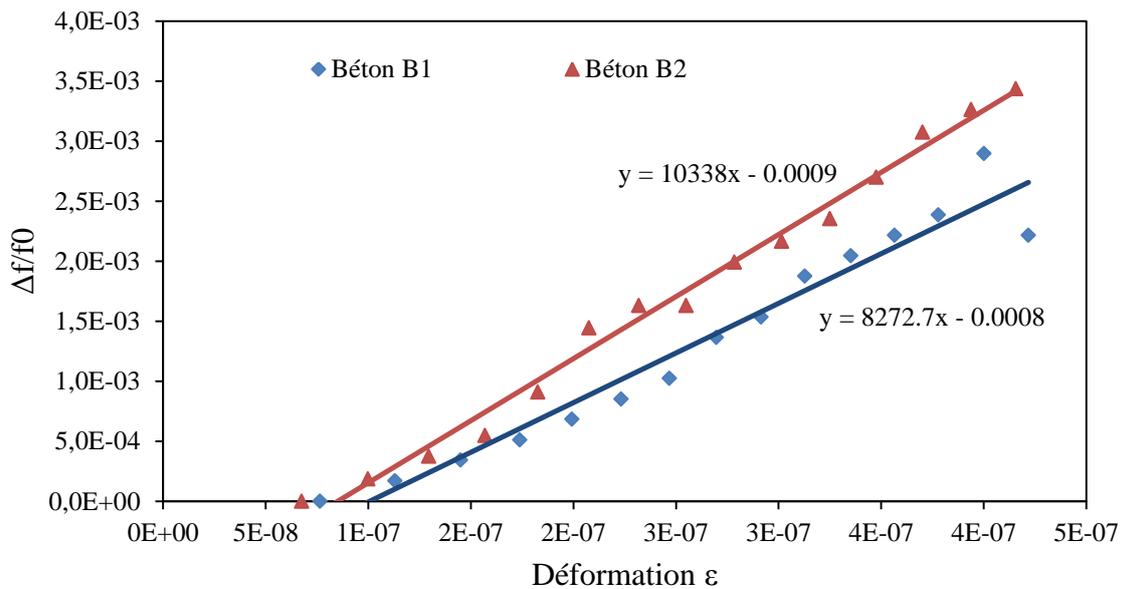


Figure 61: Variation du paramètre de résonance αf du béton B1 et B2

2. Propriétés mécaniques des bétons à base de sédiments marins B1 et B2

2.1. Introduction

Les blocs de béton à base de sédiment marins seront fortement sollicités mécaniquement, pour cela ils doivent subir des efforts d'amarrage et des efforts générés par la houle. Ces sollicitations peuvent donc être de très courte durée et de grande intensité. Une étude des propriétés mécaniques représentent donc des paramètres essentiels pour caractériser la réussite de valorisation et définir les quantités possibles du sédiment à valoriser dans un béton.

2.2. Résistance à la compression

Parmi les essais réalisés sur béton durci, la mesure de la résistance à la compression est le plus courant. Ceci est dû d'une part, à la facilité d'exécution de l'essai et d'autre part, aux nombreuses caractéristiques du béton qui peuvent être qualitativement reliées à cette mesure. Les essais de résistance à la compression sont faits parce que c'est le principal paramètre de conception. Le béton travaille peu en traction car il est peu résistant. Toutefois, la raison principale de cet essai est l'importance intrinsèque de la résistance à la compression lors de la conception structurelle [Neuville, A.M., 2000].

Pour évaluer cette caractéristique, l'étude des essais de compression uni-axiale (Figure 62) a été effectuée selon la norme EN 12390-3 et la norme ASTM C 39-02, afin de mesurer la résistance à la compression et comparer les résultats obtenus. La Figure 63 illustre les résultats de l'essai selon les deux méthodes. Les bétons B1 et B2 ont des résistances respectives de 40MPa et 31 MPa selon la norme ASTM C 39-02 et de 42 MPa et de 30MPa selon la norme EN 12390-3.



Figure 62: Essai de compression des éprouvettes à base de sédiment marin

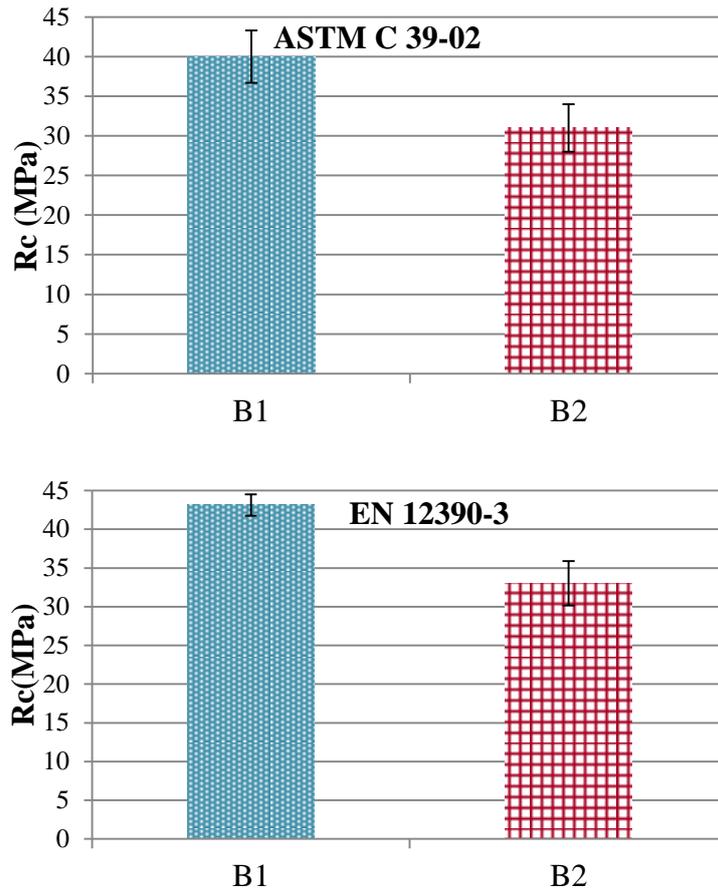


Figure 63: Variation de la résistance à la compression R_c selon ASTM C39-02 et EN12390-03

Les carottes du béton B1 présentent des performances plus élevées par rapport au béton B2. Nous remarquons que l'effet de l'ajout d'une proportion plus élevée du sédiment marin dans le mélange du béton B2 a induit une chute de la résistance de l'ordre de 10MPa selon les deux méthodes. L'ajout du sédiment marin dans la composition du béton a changé la qualité du béton B2 par rapport à celui de B1 ; d'après les résultats obtenus, le béton B2 présente plus de défauts et d'hétérogénéité. La détermination de la résistance à la compression a mis en évidence que la substitution des granulats naturels par un pourcentage élevé de sédiment marin engendrait des différences importantes entre les caractéristiques des deux bétons, cette différence peut avoir des conséquences en terme de durabilité. Une corrélation entre la porosité et la résistance est souvent vérifiée, même si certaines études montrent qu'une augmentation de porosité n'est pas forcément indicatrice d'une baisse de résistance [Zakaria, M., 1996], mais dépend dans une certaine mesure de paramètres tels que la distribution de taille des pores ou la masse absolue [Agostini, F., 2006].

2.3. Résistance à la traction

Pour mesurer la résistance à la traction, l'essai est réalisé selon la norme ASTM C 496 sur les deux types de béton (Figure 64).



Figure 64: Essai de résistance à la traction

Sur la Figure 65, les résultats de l'essai sont illustrés. Les résistances R_t de 3,6 et 3,3MPa sont respectivement mesurées sur B1 et B2. Comme déjà observé au niveau de la résistance à la compression, une chute de R_t est enregistrée.

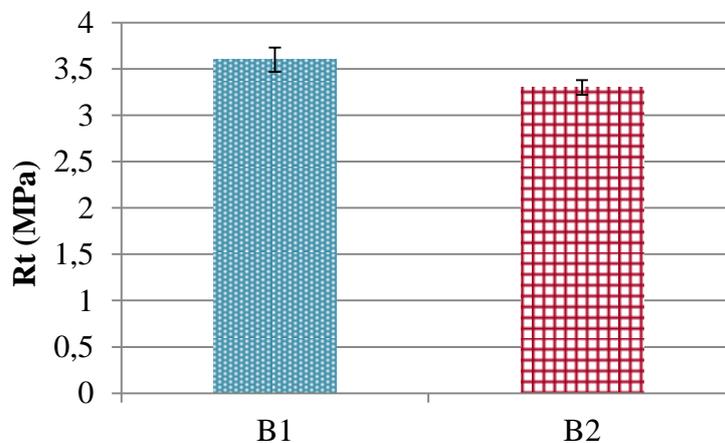


Figure 65 : Variation de la résistance à la traction R_t

2.4. Détermination du module d'élasticité statique

Le module élastique est défini comme étant le rapport de l'effort sur la déformation, dans la partie linéaire de cette relation. La pente de la relation effort déformation du béton dépend, entre autres, de la microfissuration [Neuville, A.M., 2000]. Le module élastique dépend fortement du module des granulats qui le compose, de la forme de ces derniers et de leur texture [Neuville, A.M., et Books., 1987]. Le module d'élasticité est directement

proportionnel à la résistance en compression. Trois méthodes de détermination du module d'élasticité E ont été testées afin d'évaluer les caractéristiques des deux bétons :

2.4.1. Détermination de E et ν par la méthode des jauges de déformation

L'évaluation du module élastique a été réalisée lors des tests de résistance à la compression. Afin de déterminer le module d'élasticité « E » et le coefficient de poisson « ν », nous avons instrumenté les éprouvettes issues de carottage par quatre jauges de déformation « 2 jauges verticales pour déterminer le module d'élasticité E » et « 2 jauges horizontales pour estimer le coefficient de poisson ν ». Les jauges ont été collées sur la surface des échantillons à mi-hauteur (Figure 66). L'essai a été réalisé selon la norme NF EN 12390-13.

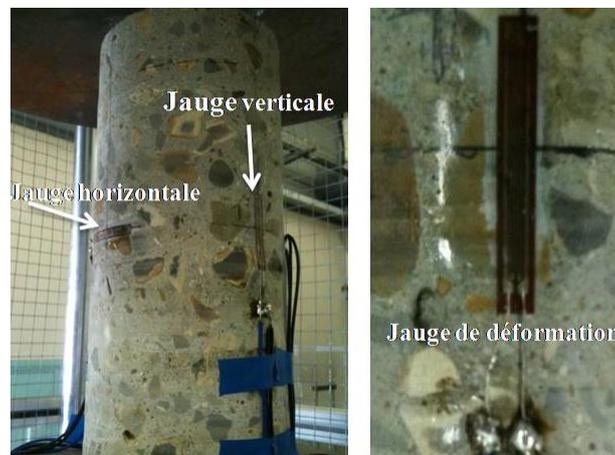


Figure 66: Montage des jauges de déformation

2.4.2. Méthodes capteurs de déplacement LVDT

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 (Figure 67). La mesure a été réalisée en exerçant trois cycles chargement/déchargement. Le module d'élasticité a été déterminé selon la pente de recharge de la courbe contrainte/déformation. L'essai a été réalisé selon la norme NF EN 12390-13.



Figure 67: Dispositif de mesure du module d'élasticité à l'aide des capteurs LVDT

2.4.3. Module d'élasticité selon la norme ASTM C 469-02

L'évaluation du module d'élasticité est effectuée selon la norme ASTM C 469-02. Selon cette norme, la limite de la linéarité est à 40% de l'effort ultime en compression. La dimension des éprouvettes est de 100 sur 200 mm (Figure 68).

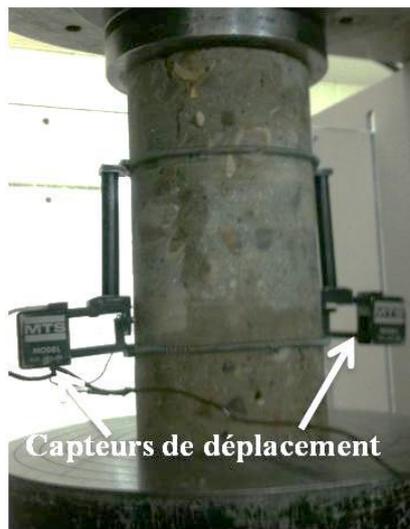


Figure 68: Dispositif de mesure du module d'Young selon ASTM 469-02

2.5. Résultats des trois méthodes

Les courbes contrainte/déformation des deux bétons pour les trois méthodes d'essai sont présentées sur la Figure 69. D'après ces résultats, un écart entre les deux bétons est systématiquement identifié (décroissance du module liée à l'augmentation du taux du sédiment). Avec l'augmentation du pourcentage d'incorporation du sédiment dans le béton B2, les carottes sont devenues plus déformables. Cette diminution peut s'expliquer par le changement de la microstructure du béton B2 par rapport à celui de B1. La mesure du

coefficient de poisson ν a été calculée à l'aide de jauges en combinant la déformation latérale et la déformation longitudinale.

D'après les résultats obtenus, ν mesuré est de 0,30 pour le béton B1 et de 0,37 pour le béton B2. Une comparaison des mesures du module d'Young obtenues par les trois méthodes révèle une différence entre la méthode des jauges de déformation et les deux méthodes à base de capteurs LVDT (Figure 70). Cette différence peut être due à la plus grande sensibilité de la méthode à base de jauges qui nécessite une préparation importante des carottes (qualité de la surface, colle..).

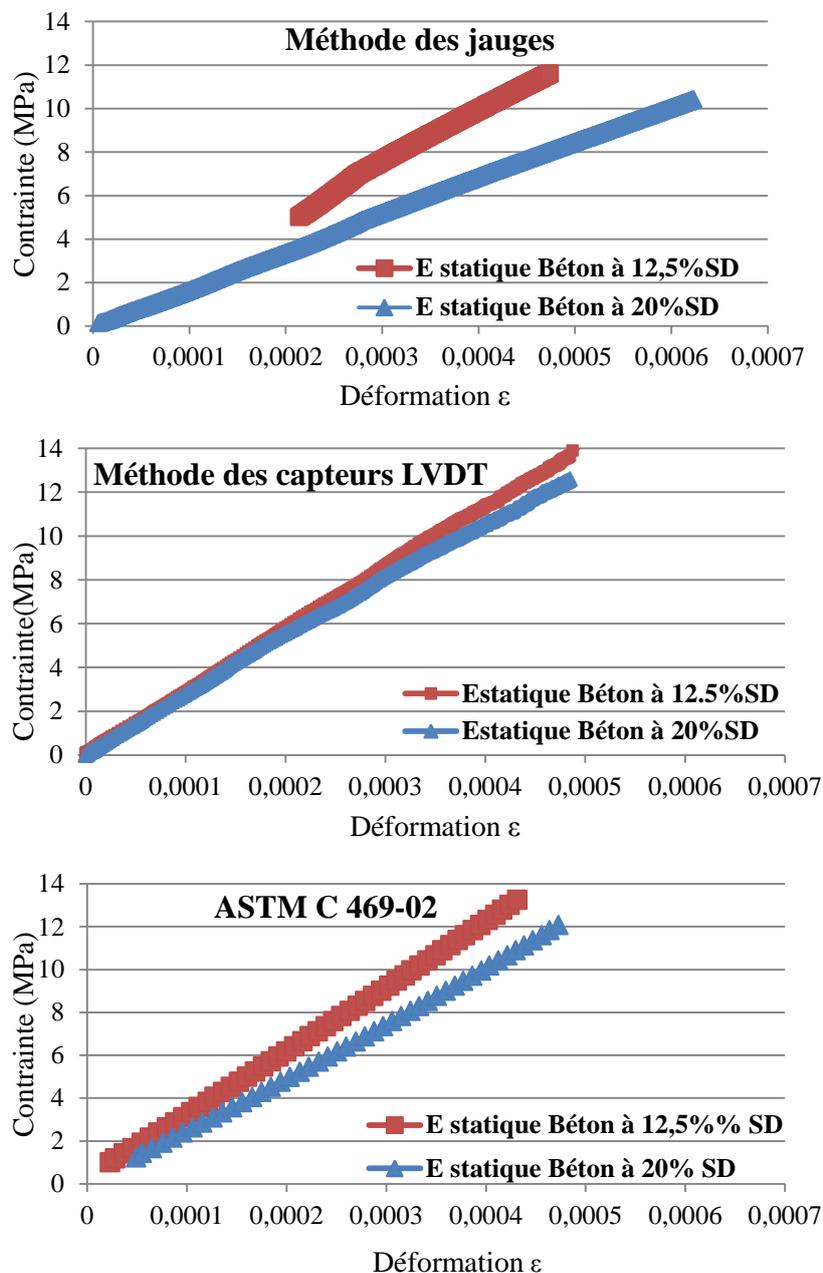


Figure 69: Courbes contrainte/déformation des deux bétons selon les trois méthodes

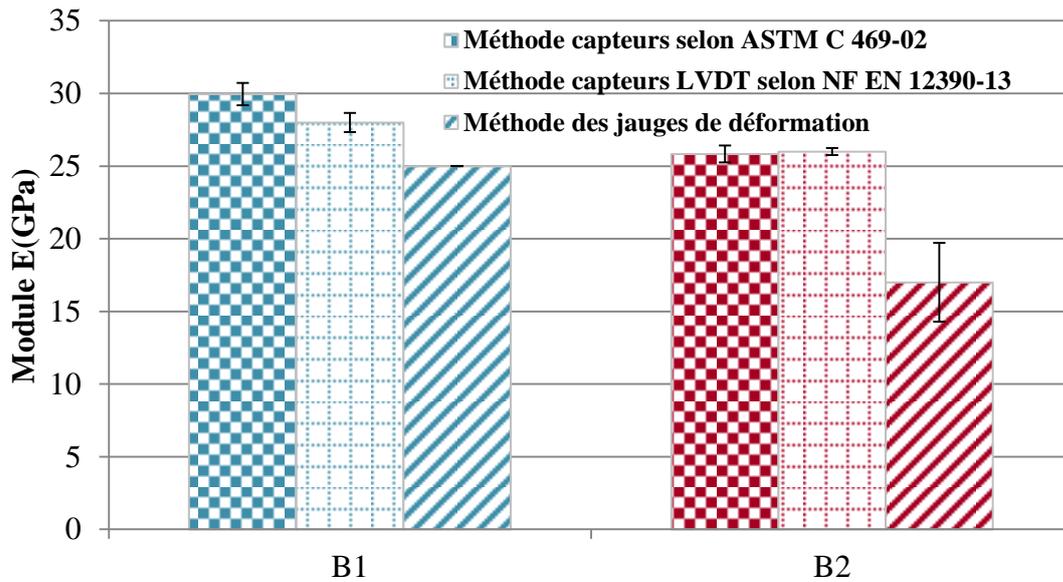


Figure 70: Variation du module d'élasticité selon des deux bétons selon trois méthodes

L'évaluation des modules d'élasticité des deux bétons à base de sédiment en utilisant trois méthodes de mesure montre que le module d'élasticité a tendance à diminuer avec l'augmentation des taux du sédiment.

Deux raisons peuvent expliquer les chutes de propriétés mécaniques. La première raison peut être la grande porosité des sédiments marins qui engendre une augmentation de la porosité des bétons. La deuxième raison peut être la faible résistance des sédiments en comparaison à un granulats naturels.

3. Etude microscopique de B1 et B2

3.1. Etude de porosité au mercure de B1 et B2

L'étude de la porosité sur les bétons B1 et B2 a été réalisée afin de déterminer l'influence de la quantité du sédiment ajoutée sur les propriétés du réseau poreux.

La porosité est un paramètre essentiel qui caractérise la texture d'un béton. Ce paramètre conditionne les propriétés mécaniques et physico-chimiques d'un béton. La caractérisation par la méthode de porosimètre par intrusion du mercure constitue l'un des principaux outils d'investigation de la structure des bétons. Cette structure est caractérisée à l'aide de plusieurs paramètres tels que la porosité totale, rayon moyen des pores et la distribution des tailles de pores. L'ensemble de ces paramètres évoqués conditionne non seulement les propriétés mécaniques, mais également celles liées à la durabilité du béton [Baroghel bouny, V., et Gawsewitch, 2000].

Afin de confirmer et d'expliquer les résultats des essais non destructifs et destructifs, des mesures par intrusion de mercure ont été réalisées sur des fragments prélevés des bétons B1 et B2. La porosité par intrusion des échantillons testés a été déterminée à l'aide d'un porosimètre au mercure *AutoPore IV de Micromeritics*, en appliquant des pressions de mercure croissantes de façon incrémentale.

L'analyse de l'essai nous a permis d'obtenir des courbes de distribution poreuses, des résultats quantitatifs du volume poreux et des rayons moyens et médians des pores. La Figure 71 illustre la variation de la porosité totale mesurée en fonction du taux d'incorporation des sédiments dans le béton. Les résultats montrent clairement un accroissement de la porosité totale dans le béton en fonction du taux d'ajout des sédiments. Le béton B1 présente une porosité totale de 11,6%, alors que le béton B2 présente une porosité de 16,9%.

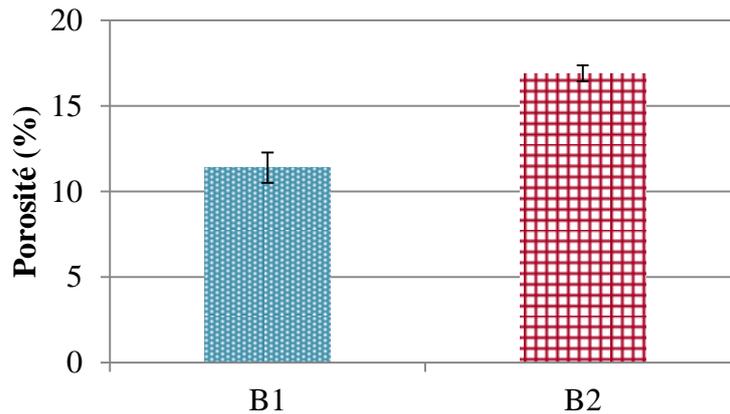


Figure 71: Porosité totale des bétons B1 et B2

La comparaison de la porosité des bétons B1 et B2 avec un béton ordinaire BO (porosité : 12,2 %) [Baroghel-Bouny, V., et Ammouche, A., 2006] montre que le béton B1 est très proche et comparable avec un béton ordinaire. Dans le cas du béton B2, la différence est plus significative.

Les Figures 72 et 73 présentent les résultats des porosités cumulées et différentielles pour les deux bétons, soit l'effet de la variation du taux d'incorporation des sédiments sur la distribution des pores dans le béton. L'analyse des deux spectres porosométriques montre une structure poreuse plus fine pour le béton B1 que pour B2.

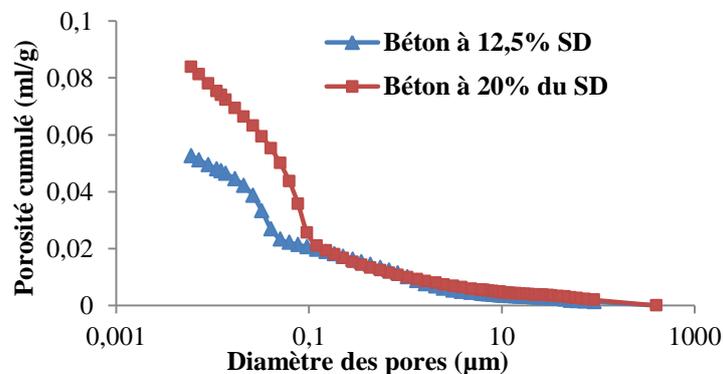


Figure 72: Courbe moyenne de la porosité cumulée des bétons B1 et B2.

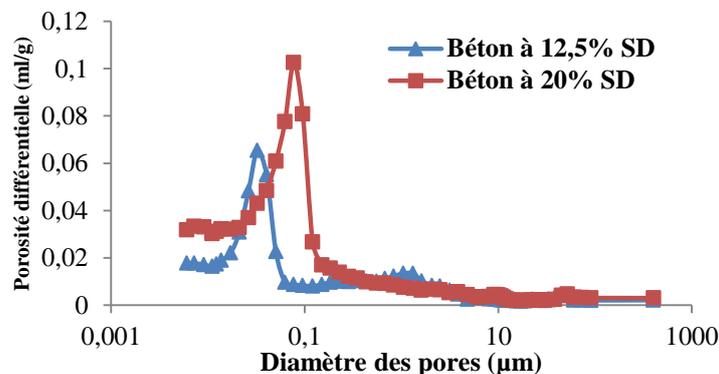


Figure 73: Courbe moyenne de Porosité différentielle des bétons B1 et B2

La Figure 74 montre l'évolution du diamètre moyen d'accès des pores, on note que le diamètre moyen d'accès est de l'ordre de 42 nm pour B1, et autour de 66 nm pour B2. A titre de comparaison, le béton ordinaire présente un diamètre moyen d'accès des pores de 52,95 nm. Les résultats de la porosité totale montrent que B1 est comparable avec un béton ordinaire et présente un réseau poreux plus fin que le BO [Baroghel-Bouny, V., et Ammouche, A., 2006]]. L'incorporation des sédiments marins avec un taux de 12,5% dans la formulation du béton a permis d'avoir des caractéristiques microstructurales comparables avec un béton ordinaire.

D'après les résultats obtenus pour le béton B2, la taille des pores augmente quand le taux de sédiment croît. Cette augmentation du diamètre pour B2 confirme les résultats de la porosité totale en comparaison avec B1 et BO.

L'ajout d'une proportion de sédiment marin supérieure à celle de B1 dans le béton B2 a modifié la microstructure avec une augmentation de la porosité et a augmenté la zone d'interface globale du béton.

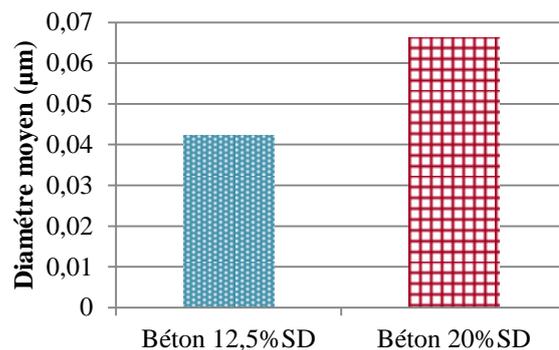


Figure 74: Evolution du diamètre moyen des pores du B1 et B2.

D'après les résultats de la porosité totale et le diamètre moyen des pores du béton B1 et B2, on constate que la microstructure est différente. Cette différence entre les deux bétons peut être expliquée par l'augmentation de la zone d'interface entre le ciment, les granulats et le sédiment marin. La nature et la porosité des sédiments marins peuvent aussi influencer la zone d'interface, cette interface joue un rôle majeur dans le comportement des bétons à base de sédiment marin. Ces caractéristiques texturales influencent directement les propriétés du transfert de ces deux bétons et en particulier le béton B2, et donc leur durabilité.

3.2. DRX

Une analyse par diffraction des rayons X (DRX) a été réalisée sur les bétons B1 et B2 ainsi que sur les sédiments marins incorporés dans les deux bétons. Les Figures 75 et 76 montrent les spectres respectifs des bétons B1 et B2. Ces derniers sont principalement composés de :

- quartz SiO_2 ;
- calcite CaCO_3 ;
- portlandite Ca(OH)_2 .

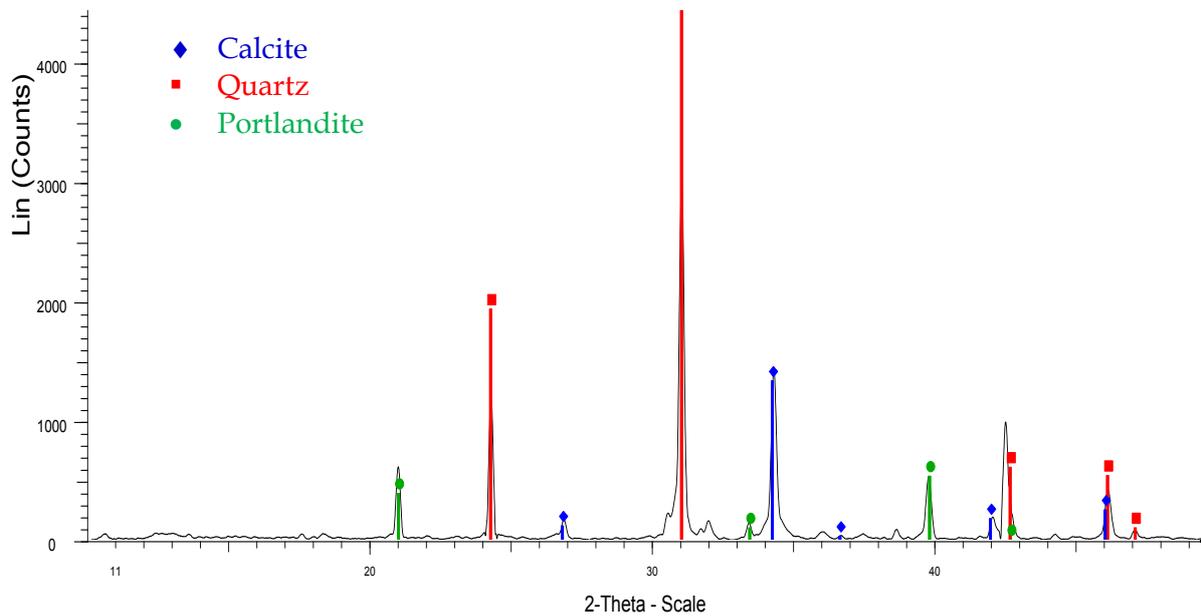


Figure 75: Spectre de diffraction des rayons X du B1

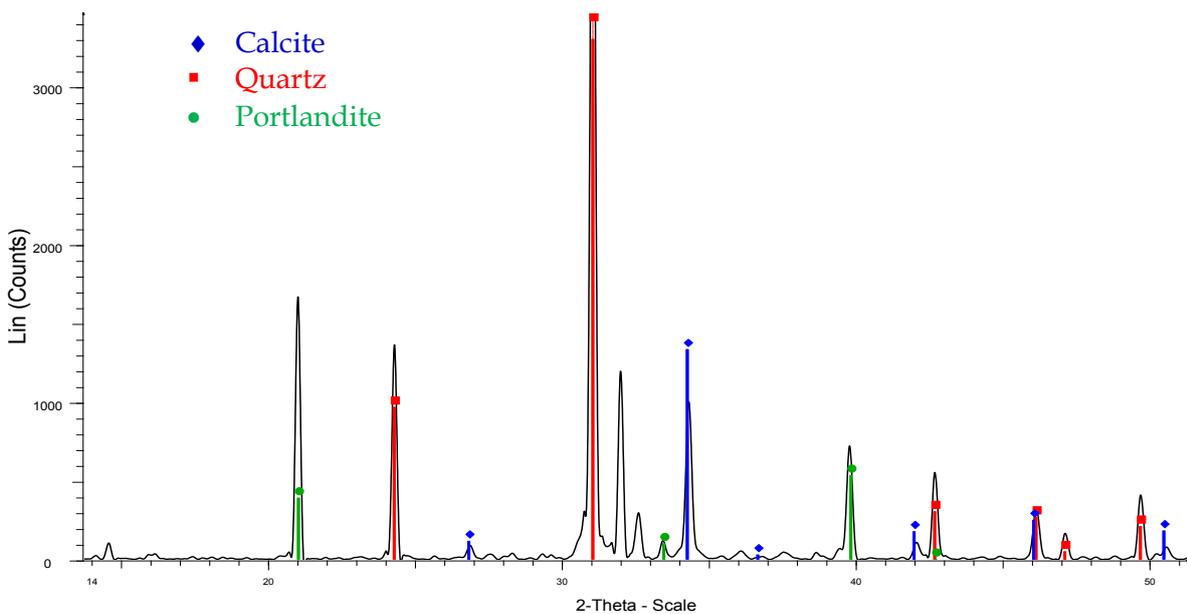


Figure 76: Spectre de diffraction des rayons X du B2

Afin d'identifier les phases constituant les boulettes du sédiment incorporé dans le béton, nous avons extrait par grattage quelques morceaux pour les caractériser. La caractérisation DRX (Figure 77 et 78) révèle que les deux sédiments incorporés dans les bétons B1 et B2 sont similaires par la présence des principales phases comme la calcite, le quartz et la pyrite. La caractérisation a aussi révélé la présence d'ettringite dans la matrice des deux sédiments. En comparaison avec une DRX sur un sédiment marin brut (Figure 79), nous avons remarqué la disparition de l'halite. L'apparition de la phase ettringite par rapport à un sédiment brut nous laisse penser que le sédiment a été légèrement traité avec un liant. Pour confirmer la présence d'ettringite et du traitement, nous avons réalisé des analyses par microscopie optique et microscopie par balayage électronique (MEB).

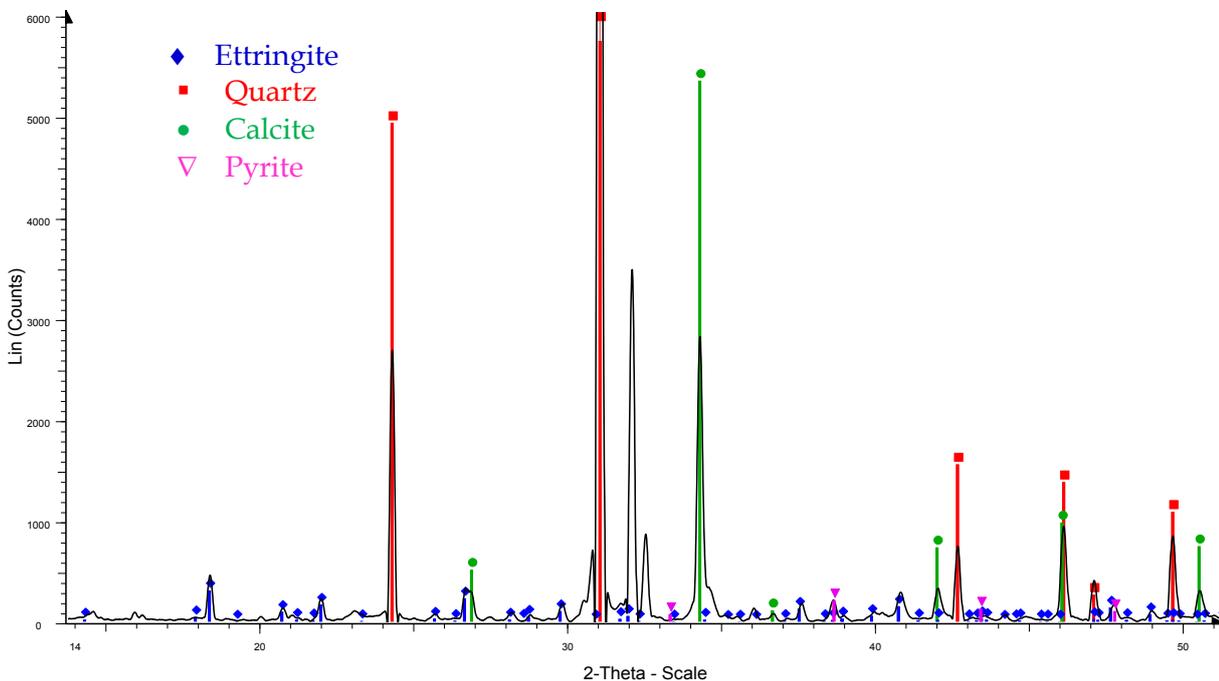


Figure 77: Spectre de diffraction des rayons X sur le sédiment incorporé dans le béton B1

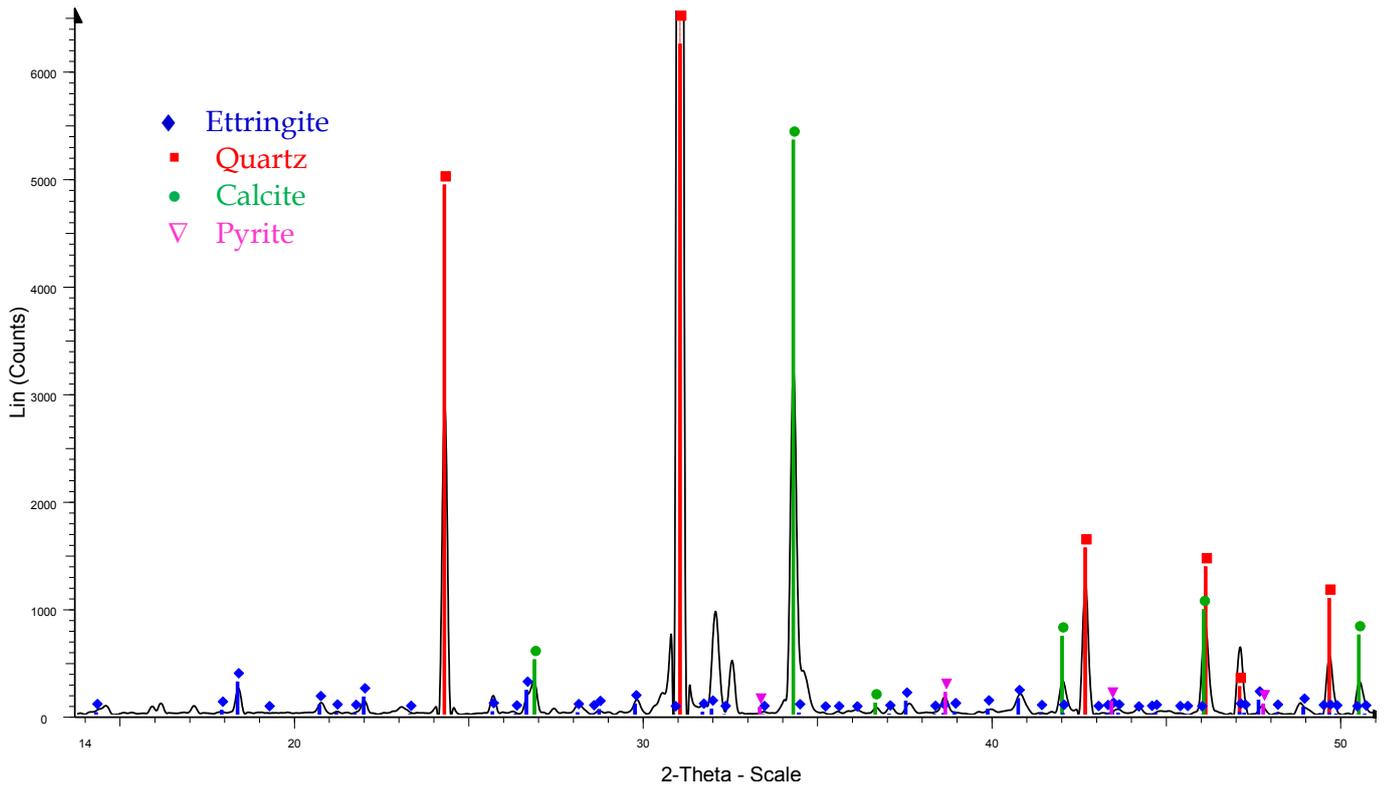


Figure 78: Spectre de diffraction des rayons X sur le sédiment incorporé dans B2

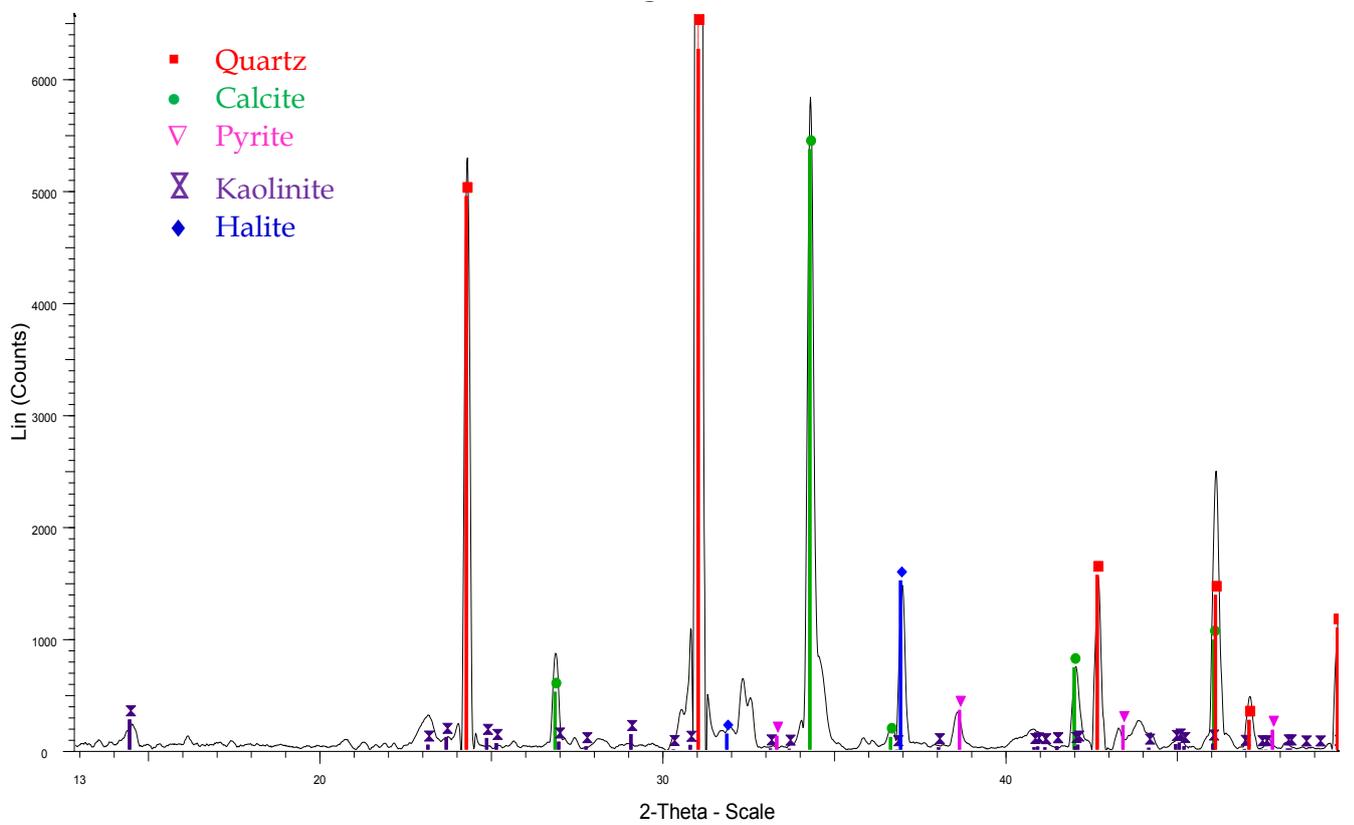


Figure 79: Spectre de diffraction des rayons X sur un sédiment marin brut

3.3. Examen pétrographique du B1 et B2

Afin de compléter et confirmer les investigations obtenues par DRX, nous avons réalisé des observations microscopiques par microscope optique et MEB sur les deux types de béton à base de sédiment marin. Il s'agit de déterminer les différentes phases observées en DRX, de commenter l'origine de l'ettringite observée lors de l'analyse de sédiment incorporé dans les deux bétons et la nature du ciment utilisé dans les deux bétons.

3.3.1. Analyse du béton B1

- **Observation au microscope optique**

La Figure 80 montre une section polie du béton B1. Dans cette section, on observe des C-S-H et des grains de clinker Portland partiellement hydraté avec la présence d'une phase interstitielle. Cela confirme que le ciment utilisé dans le béton est un ciment Portland.



Figure 80: Grain de clinker Portland partiellement hydraté

La Figure 81 révèle la présence de granulats de nature calcaire et silex dans le béton.

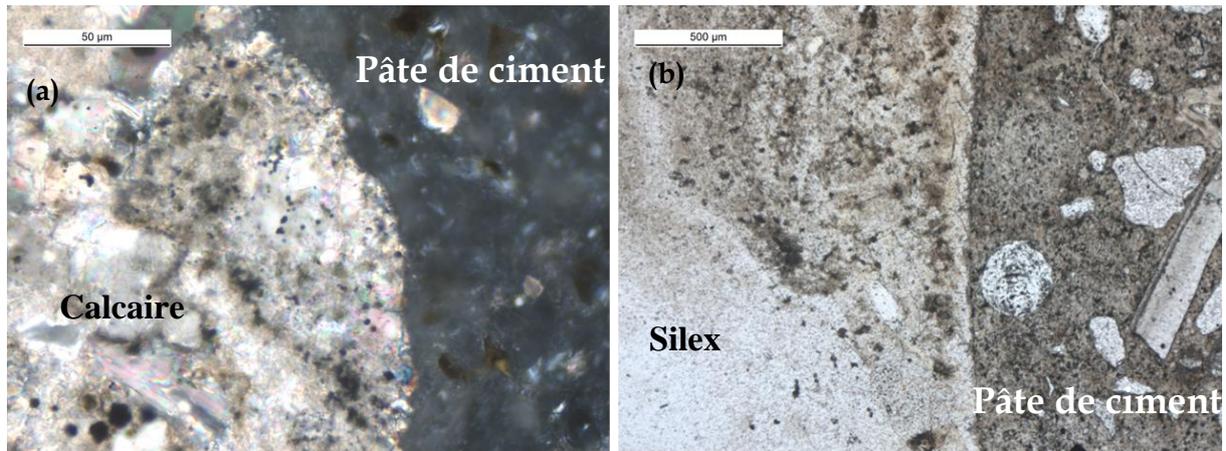


Figure 81: Photo microscope optique de l'interface granulat calcaire contenant de la calcite et de la pyrite/pâte de ciment(a) & granulat de silex/pâte de ciment

La Figure 82 illustre la présence du sédiment marin dans le béton B1. Une interface entre la pâte du ciment portland et le sédiment marin est bien visible.

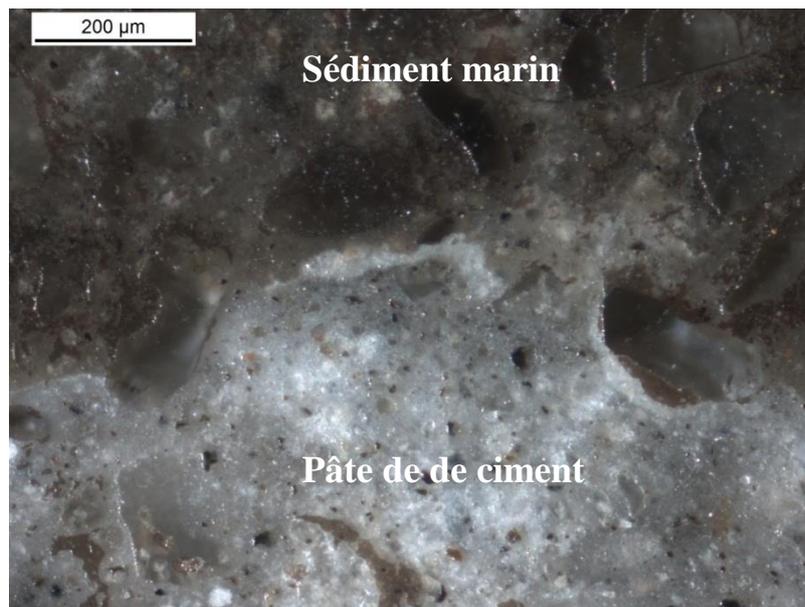


Figure 82: Photo microscope optique de l'interface granulat sédiment marin/pâte de ciment

▪ Observation de la microstructure du béton

Des observations de la microstructure ont été réalisées sur une section polie d'un morceau du béton B1 par microscopie électronique à balayage MEB.

La Figure 83 montre bien une interface entre le sédiment marin et la pâte de ciment. Des cartographies élémentaires réalisées sur le morceau de béton montrent que la zone droite de Figure 84 est une pâte de ciment riche en calcium et du fer et que la zone de gauche

représente un sédiment très riche en aluminium et du soufre par rapport à la pâte de ciment, ce qui suggère que le sédiment marin a été traité par un liant spécial proche de la famille des ciments alumineux.

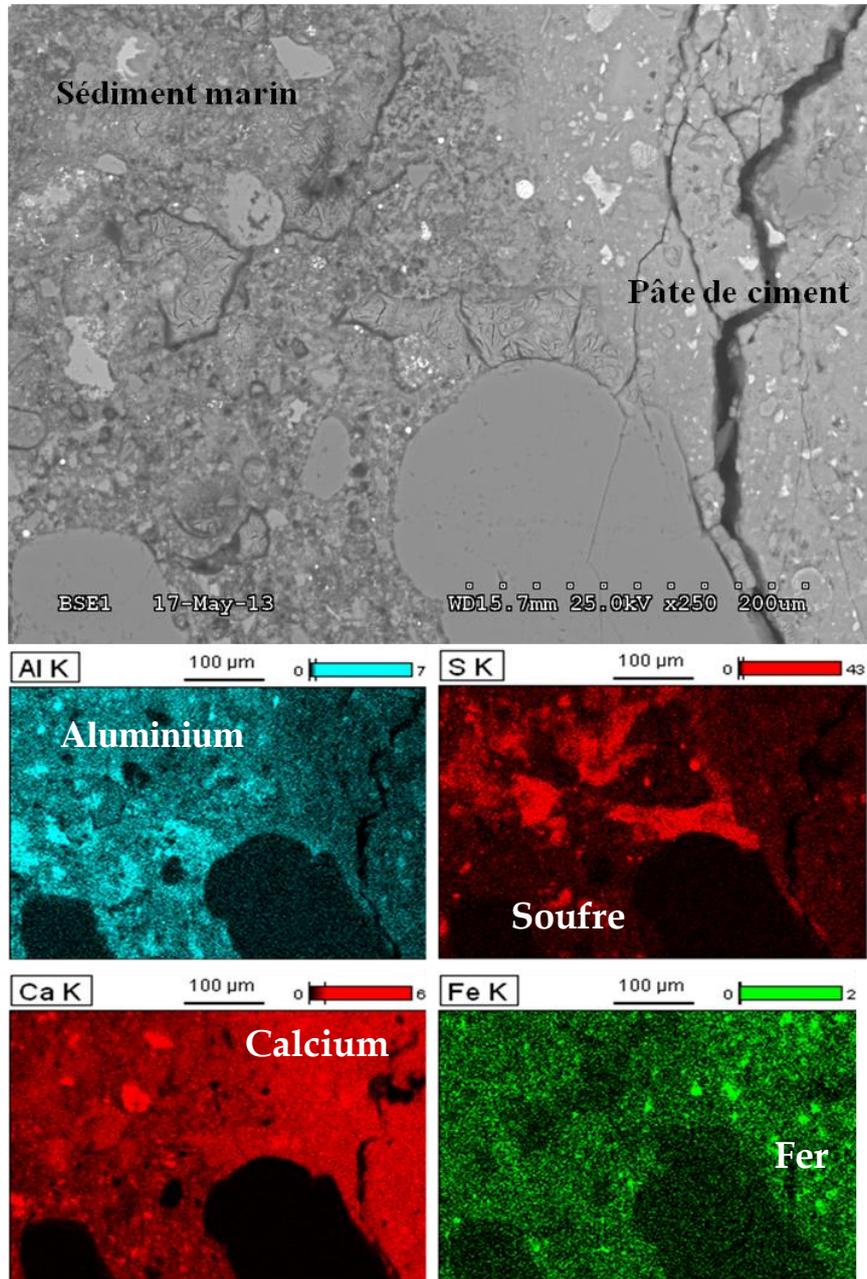


Figure 83: Observation MEB de la microstructure et de l'interface sédiment/pâte de ciment du B1 et des cartographies élémentaires

▪ **Observation de la microstructure du sédiment incorporé dans le béton**

L'observation MEB du sédiment incorporé dans le béton montre une microstructure typique de ciment sulfo-alumineux non hydraté composé de ye'elinite (gris foncé) de l'ordre de 1 à 5 microns, de belite (gris clair) sous forme des cristaux de l'ordre de 1-10 microns et de

la ferrite (blanc) qui se représente sous forme d'une matrice entre les autres phases (Figure 84).

Cette information confirme que le sédiment a été traité par un ciment type sulfo-alumineux. Une microanalyse élémentaire par spectrométrie X à dispersion d'énergie a été réalisée. Cette dernière confirme la présence des phases principales d'un ciment sulfo-alumineux riche en calcium et aluminium.

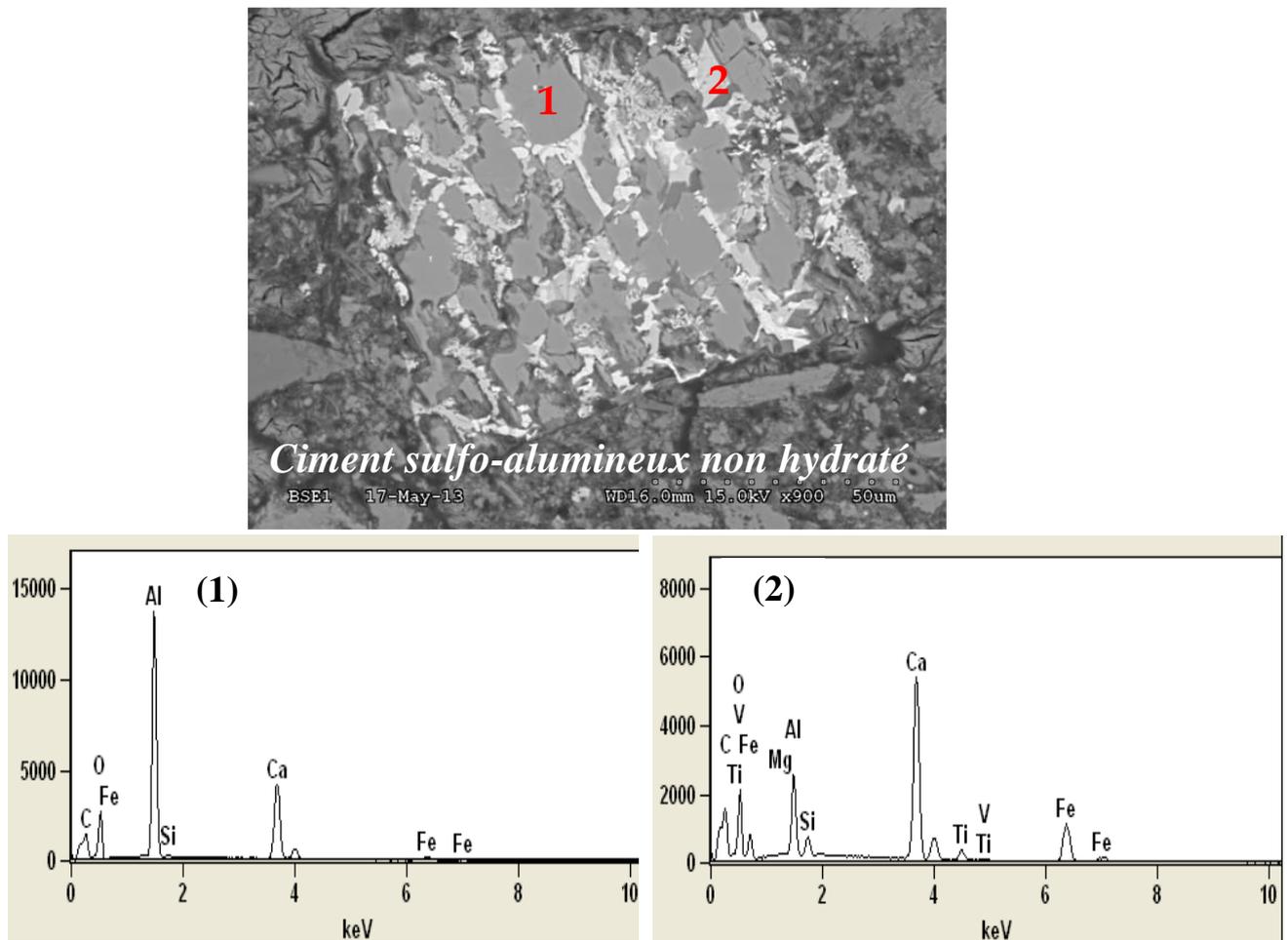


Figure 84: Observation MEB et microanalyse élémentaire par spectrométrie x à dispersion d'énergie d'une microstructure du ciment sulfo-alumineux non hydraté

Toujours dans la partie de sédiment, l'observation MEB, a confirmé la présence d'ettringite (Figure 85), l'identification de cette phase confirme et complète les résultats obtenus par analyse en DRX pour les sédiments incorporés dans le béton. La littérature scientifique indique que l'hydratation du ciment sulfo-alumineux forme de l'ettringite, responsable de la résistance initiale et les C-S-H qui donnent la résistance à long terme. En effet, l'hydratation de ye'elimeite (C_4A_3S) donne de l'ettringite ($AFt : C_6AS_3H_{32}$) et de l'hydroxyde d'aluminium (AH_3) [Michel, M., 2009].

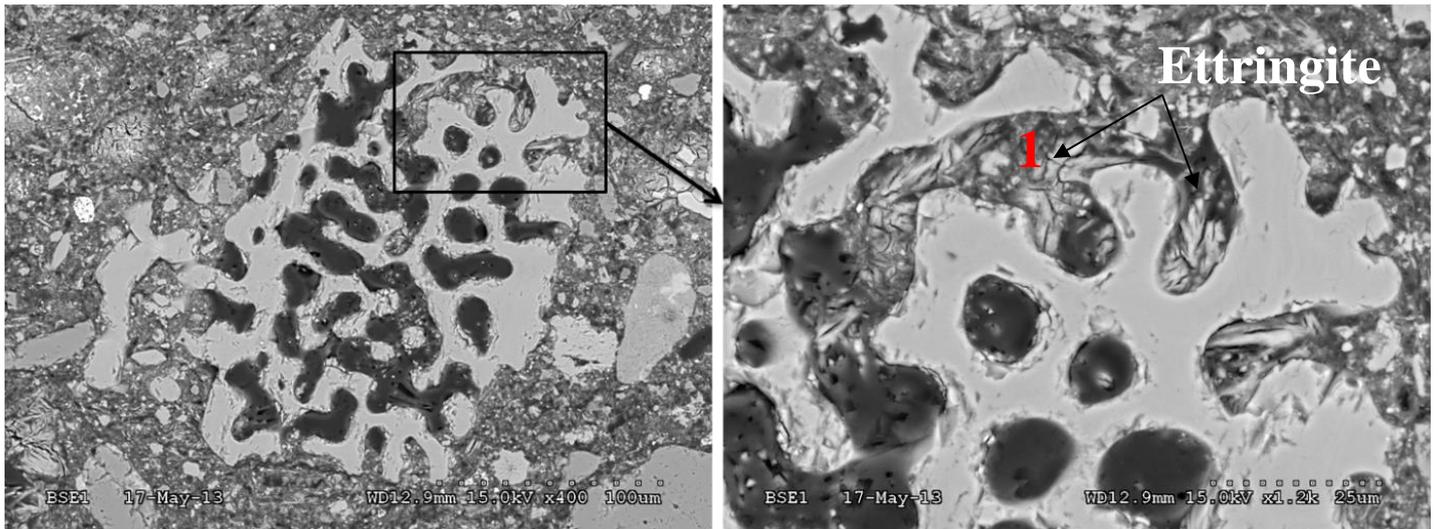


Figure 85: Formation de l'ettringite dans le sédiment marin

Une microanalyse élémentaire par spectrométrie X à dispersion d'énergie (point 1) montre bien la présence d'ettringite formée par l'hydratation du ciment sulfo-alumineux (Figure 86).

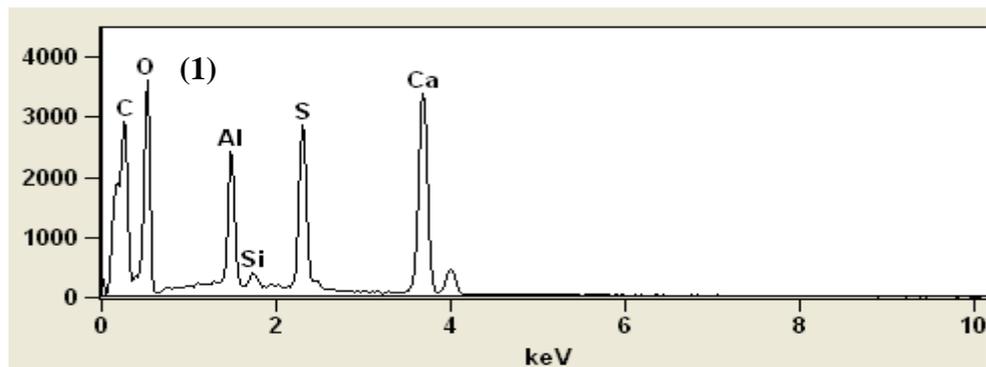


Figure 86: Observation MEB et microanalyse élémentaire par spectrométrie x à dispersion d'énergie de l'ettringite

La Figure 87 illustre l'ettringite formée dans les boulettes de sédiment incorporé dans B1. La Figure 88 montre aussi la présence de la pyrite framboïdale présente dans les sédiments marins.



Figure 87: Identification d'ettringite dans les boulettes de sédiment du béton B1



Figure 88: Présence de Pyrite framboïdale les boulettes de sédiment du béton B1

3.3.2. Analyse du béton B2

- *Observation au microscope optique*

La Figure 90 montre une section polie du béton B2. L'observation au microscope optique montre la présence de C-S-H autour d'un grain de clinker Portland partiellement hydraté et la présence d'une phase interstitielle. Comme pour B1, le ciment utilisé dans le béton B2 est confectionné avec du ciment Portland.



Figure 89: Grain de clinker Portland partiellement hydraté dans le béton B2

L'observation de la Figure 90 montre une interface entre le sédiment marin et la pâte de ciment (formation de C-S-H) dans le béton B2.

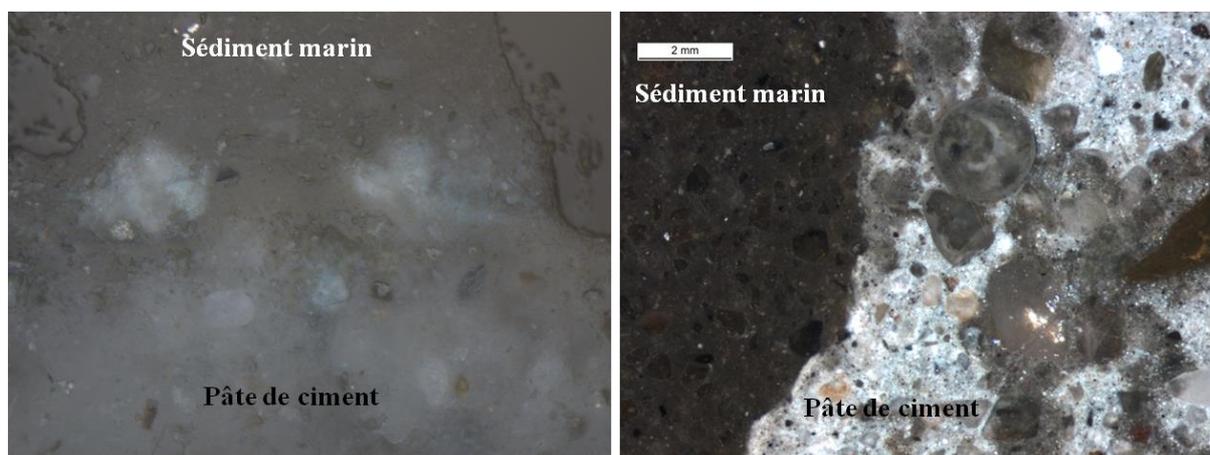


Figure 90 : Photo microscope optique de l'interface sédiment marin/pâte de ciment

La Figure 91 montre la présence de l'ettringite formée dans les boulettes de sédiment incorporé dans le béton B2. L'hydratation de la ye'elinite a favorisé la formation de l'ettringite. Cette formation d'ettringite confirme les résultats d'analyse de DRX. Cette forme constitue le principal hydrate à l'origine de la prise et du durcissement des sédiments incorporés dans le béton.



Figure 91: Identification de la formation d'ettringite dans le sédiment marin incorporé dans le béton B2

- **Observation de microstructure**

Afin de compléter les investigations sur le béton B2, des observations au MEB de la microstructure ont été réalisées sur des sections polies. La Figure 92 montre bien une interface entre la pâte de ciment et le sédiment marin.

Les cartographies élémentaires réalisées sur le morceau de béton B2 montrent sur zone droite où la pâte de ciment est riche en calcium et du fer et sur la zone de gauche un sédiment riche en aluminium et en soufre. Ceci confirme la présence d'un traitement de sédiment marin avant son incorporation dans les deux bétons.

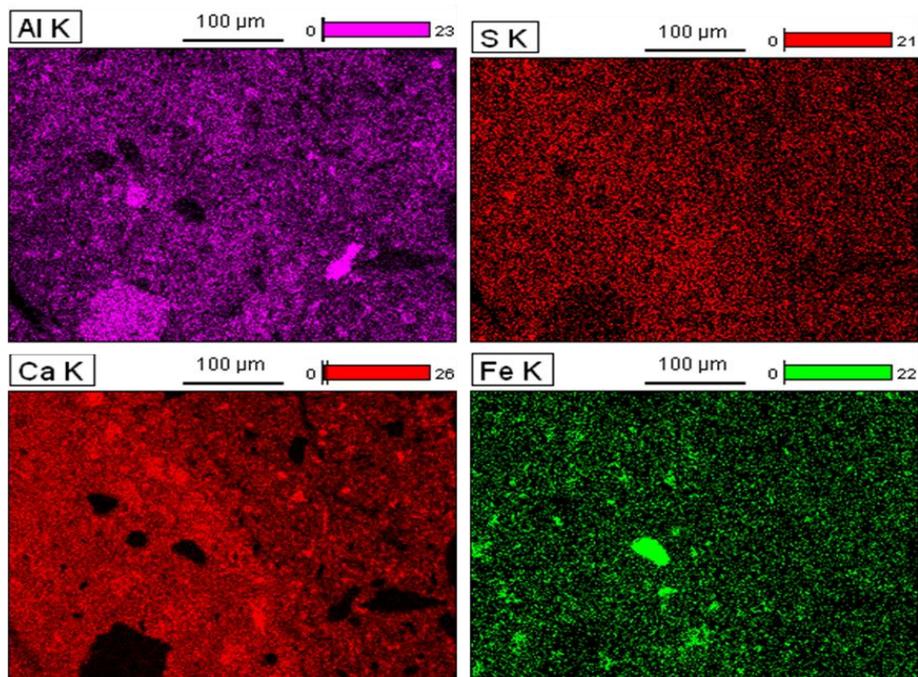
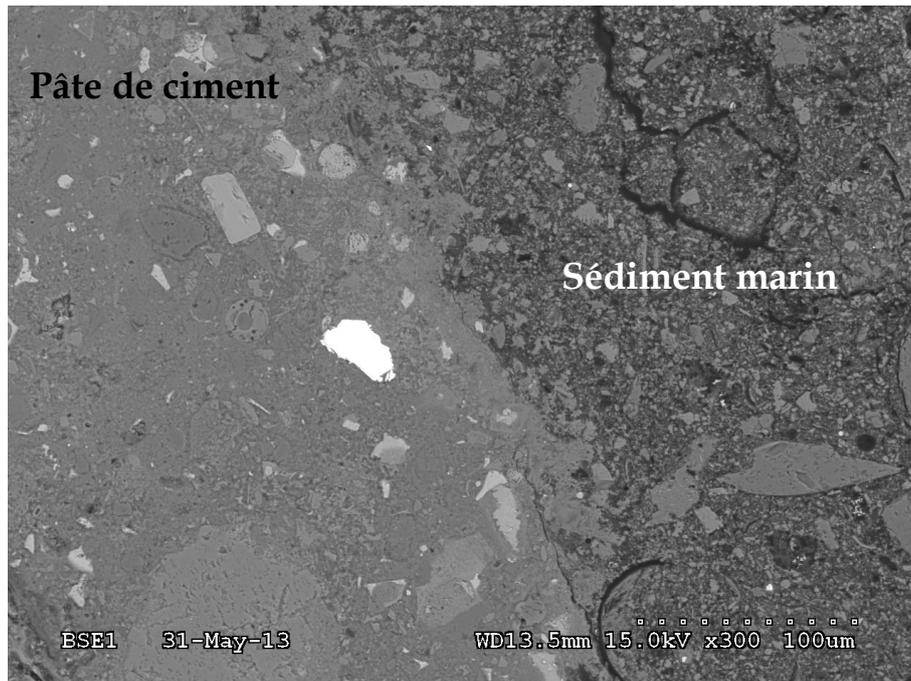


Figure 92: Observation MEB et cartographies élémentaires de la microstructure du béton à 20% du sédiment marin

La Figure 93 montre une observation de la microstructure du béton B2. Tel que constaté lors de l'observation de la microstructure du béton B1, l'observation de la microstructure et la microanalyse de pointés de la section polie du béton B2 révèle la présence du ciment sulfo-alumineux non hydraté et d'ettringite formée par l'hydratation de ye'elinite.

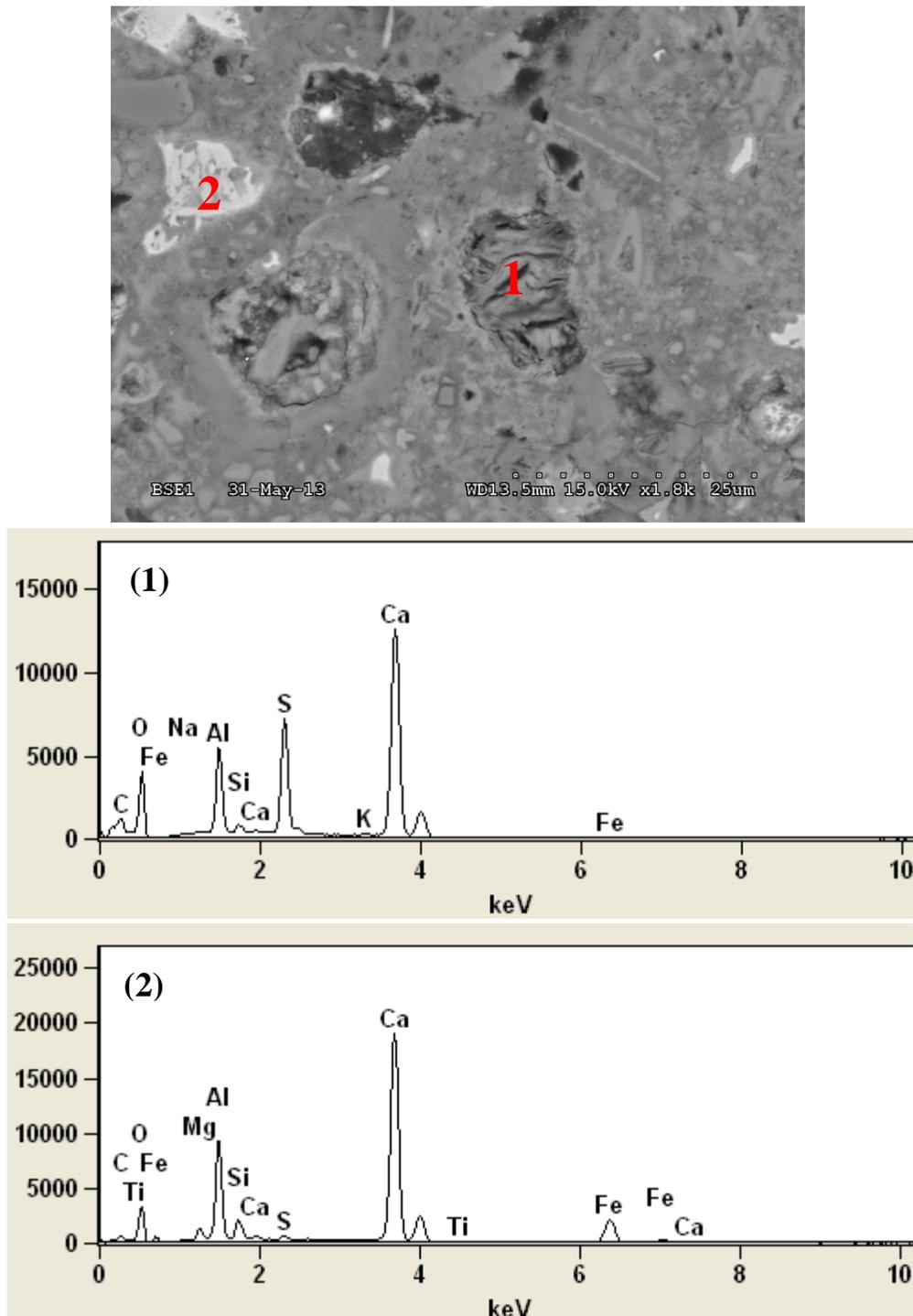


Figure 93: Microstructure du béton à 20% du sédiment marin, observation MEB et pointés

D'après les investigations DRX, microscope optique et MEB réalisées sur les deux bétons B1 et B2, nous avons déterminé que les sédiments marins incorporés ont été traités par un ciment sulfo-alumineux. Les sédiments des deux bétons présentent les mêmes phases. Ce traitement réalisé a pour but d'améliorer les caractéristiques du sédiment marin par l'augmentation de sa résistance due à la formation d'ettringite.

La justification de l'utilisation d'une proportion de ciment sulfo-alumineux dans le sédiment peut s'expliquer aussi par : sa caractéristique de solidification/stabilisation ce qui permet d'améliorer les caractéristiques physiques des déchets, réduire leur capacité à la lixiviation et leur solubilité par l'effet de l'ettringite qui peut aussi incorporer et fixer certains métaux lourds dans sa structure [Peysson, S., 2005]. Tel que mentionné dans la section 6.1 de la partie 1, les sédiments marins contiennent des métaux lourds dans leur matrice, ce qui explique le choix du ciment sulfo-alumineux.

Chapitre 6

Etude de durabilité des bétons B1 et B2

La durabilité des ouvrages dans les travaux publics ainsi que dans le bâtiment est un élément majeur. La qualité des bétons mis en jeu est ainsi essentielle et les propriétés des matériaux dans le temps doivent être assurément bien définies. Au cours du temps, les bétons subissent de multiples attaques d'ordre physico-chimique. Leur durabilité est mise à rude épreuve. Il est ainsi impératif de pouvoir prédire comment les matériaux réagiront dans tel ou tel milieu afin d'assurer et de justifier la conformité du matériau dans le temps.

Dans notre étude sur la durabilité des bétons à base de sédiment marin, nous allons nous intéresser à trois essais performantiels :

- cycles gel/dégel de B1 et B2;
- attaque sulfatique externe du B1 et B2;
- réaction alcali-granulats du B1 et B2.

1. Suivi non destructif des bétons B1 et B2 soumis à des cycles de gel/dégel

Lorsque les conditions en service font que la température d'un béton saturé passe sous le point de congélation, l'eau contenue dans les pores capillaires de la pâte durcie gèle progressivement d'une façon identique à celle des pores d'une roche et donne lieu à une expansion du béton. Le gonflement induit par le gel est un phénomène cumulatif, c'est-à-dire qu'il augmente au fur et à mesure que le béton est soumis à des cycles répétés de gel-dégel [Neuvville, A.M., 2000].

L'endommagement dépend de la vitesse de refroidissement, le nombre de cycles, la température minimale atteinte et la durée du gel. Carles-Gibergues et Pigeon, M. 1992 expliquent que le déséquilibre thermodynamique résultant de la progression d'un front de gel-dégel dans le béton, va créer dans ce dernier des phénomènes très divers qui relèvent des transports de nature diffusion, perméabilité, de la modification du rapport phase anhydre/phase hydratée et de la dessiccation d'une pâte poreuse par la migration de l'eau des plus petits pores vers les plus grands.

L'action des cycles gel-dégel peut produire deux types de détérioration du béton : la fissuration interne et l'écaillage des surfaces en présence des sels fondants. Parmi les deux

principaux types d'attaque par gel, la fissuration interne est relativement peu fréquente en raison des mécanismes particuliers d'attaque qui ne produisent des dommages significatifs que dans les bétons les plus sensibles aux effets des cycles de gel-dégel [Gagné, R., et Linger, L., 2008]. L'essai gel-dégel correspondant à la norme ASTM C666 consiste à geler et dégeler des éprouvettes de béton selon deux méthodes : le gel dans l'air ou le gel dans l'eau.

1.1. Echantillonnage et programme d'essai

Les échantillons de deux types de béton (2 carottes B1 et 2 carottes B2) de dimension 100x200mm ont été préparés pour être mis dans une enceinte à température contrôlée simulant durant 24 h, un cycle de gel-dégel entre (-18°C et 4°C) selon la méthode normalisée ASTM C666 (Figure 94). L'essai consiste à soumettre les éprouvettes à des cycles de gel dans l'eau et dégel dans l'eau (gel sévère). Un suivi non destructif d'acoustique linéaire et non linéaire a été réalisé après respectivement 58 et 85 cycles.

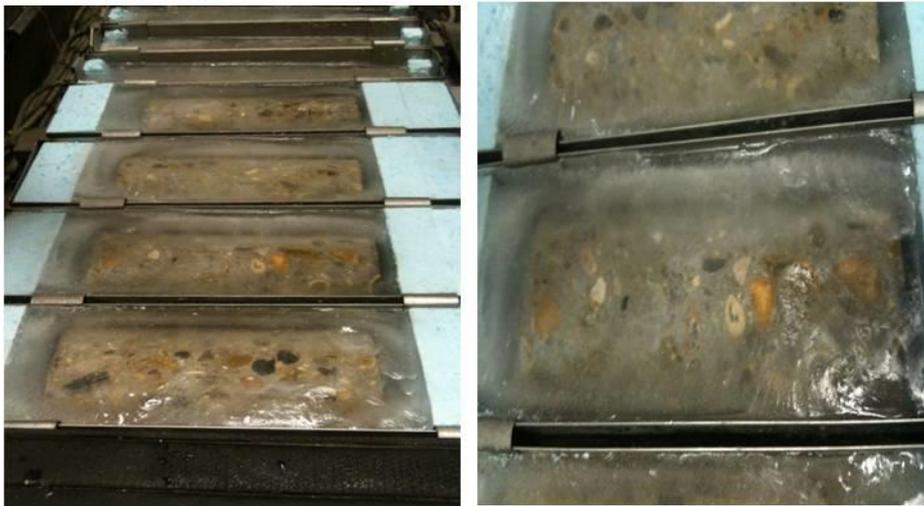


Figure 94: Echantillon soumis à des cycles de gel-dégel

1.2. Caractérisation de l'endommagement des bétons B1 et B2 par méthodes acoustiques linéaire

La Figure 95 montre les variations moyennes des vitesses ultrasonores et du module d'élasticité dynamique mesurées sur les éprouvettes B1 et B2, entre l'état 0 (béton sain extrait du bloc), l'état après 58 cycles et l'état après 85 cycles.

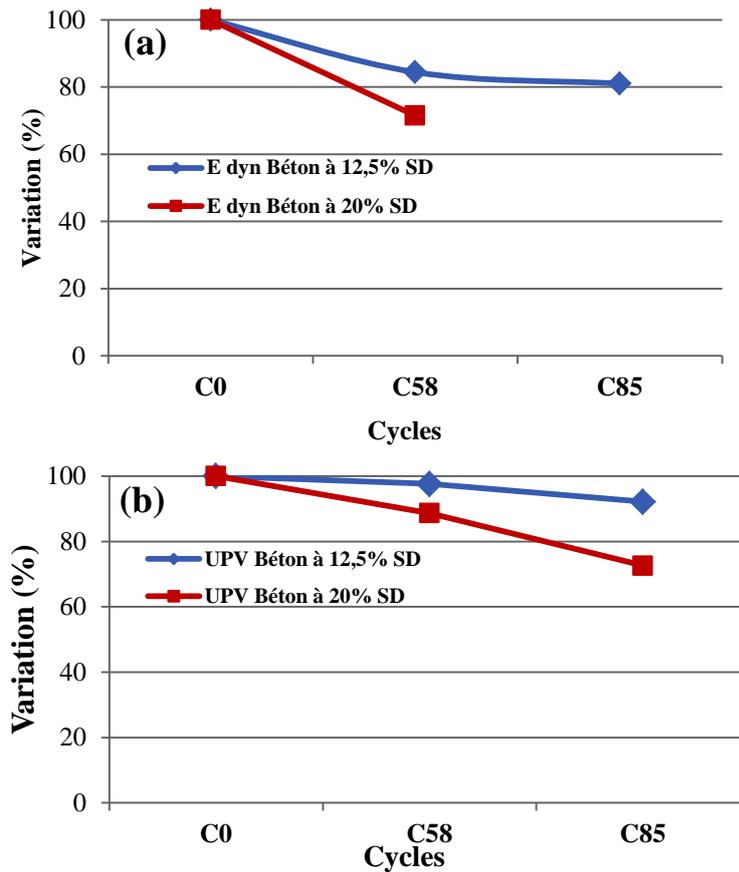


Figure 95: Variation des paramètres acoustique linéaires du module d'élasticité dynamique (a) et d'UPV (b) et après 58 et 85 cycles gel-dégel

Après 58 cycles de gel-dégel pour le béton B1, une diminution de 15,5% du module dynamique et de 2,3 % d'UPV est observée. Après 85 cycles, une baisse de 20% d' E_{dyn} et 8% d'UPV est observée. En revanche, le béton B2 a subi une dégradation plus sévère provoquant une diminution respective de 28,5% d' E_{dyn} et 11% et d'UPV après 58 cycles, et de 27% d'UPV après 85 cycles (nous n'avons pas pu déterminer le module d'élasticité dynamique à 85 cycles car les éprouvettes ont été fortement dégradées).

Par cet essai, nous avons montré que le béton le plus chargé en sédiment résiste moins aux cycles gel-dégel. La porosité et la fissuration des bétons ont aussi un effet sur la variation de la vitesse des ondes ultrasonores (variation pouvant atteindre 38%) [Garnier, V., et al., 2002]. En effet, ces résultats peuvent servir à une référence non destructive à l'étude de dégradation des nouveaux bétons à base de sédiment marin. L'observation du béton B1 et B2 montre une corrélation directe entre le taux d'incorporation et la résistance au gel-dégel. L'augmentation du volume des granulats fins et poreux (sédiment marin) a participé à la diminution du module dynamique et d'UPV. Les résultats obtenus confirment aussi que le

module dynamique est plus sensible à la dégradation des bétons que l'UPV. On peut donc déduire que la fissuration interne du béton B2 est plus importante que celle du béton B1.

Malgré sa sensibilité aux fissures, le module dynamique est fortement influencé par les propriétés physiques du béton (granulat, ciment, boulettes de sédiment) et n'identifie pas directement la dégradation. Afin de répondre à cette limitation nous avons utilisé la méthode d'acoustique non-linéaire dynamique rapide pour bien caractériser l'endommagement et les fissurations engendrées par les cycles gel-dégel.

1.3. Caractérisation de l'endommagement des bétons B1 et B2 par méthode acoustique non-linéaire dynamique rapide

La Figure 96 montre la variation du paramètre non-linéaire de résonance en dynamique rapide αf en fonction des cycles gel/dégel. En effet, la grande sensibilité à la fissuration de ce paramètre permet de bien identifier le comportement du matériau. Une augmentation de αf de 397 % après 58 cycles et de 1265 % après 85 cycles pour le béton B1 a été enregistrée, le béton B2 a subi une augmentation très significative de 5500 % après 58 cycles par rapport à l'état sain. L'augmentation substantielle du non linéarité peut être expliquée par l'apparition des fissures après 58 cycles et 85 cycles.

On déduit que le béton B2 présente plus de microfissurations. Les mesures à 85 cycles du béton B2 n'ont pas été réalisées vu l'état très dégradé des éprouvettes. A partir de 85 cycles de gel/dégel, l'augmentation de la non linéarité atteint un « point de saturation » lorsque les microfissures finissent par former des fissures visibles en surface [Van den Abeele, K.E.A., et al., 2000]. L'augmentation de αf indique que la microfissuration est apparue dans le matériau et a modifié son comportement élastique [Boukari, Y., 2011]. Suite à cette investigation, on peut donc déduire que la microfissuration a contribué à un affaiblissement des liens entre sédiment, pâte et granulats. Dans ce cas-ci, plus le taux de sédiment est élevé plus la microfissuration associée aux cycles gel/dégel est importante.

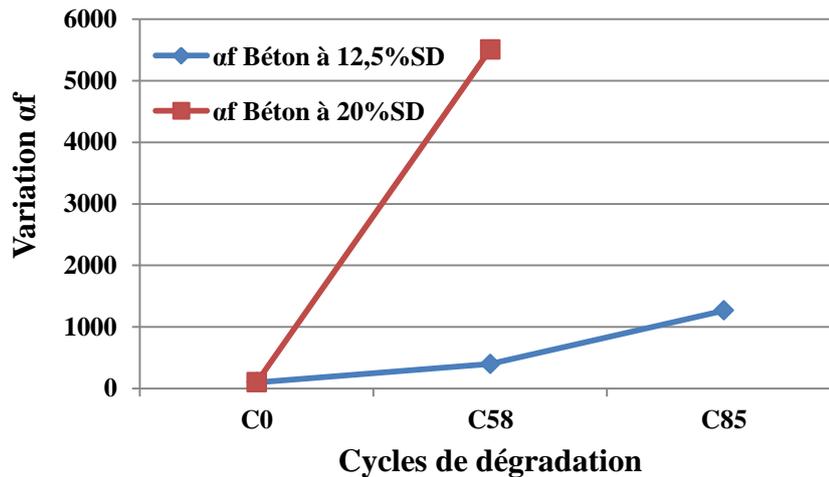


Figure 96: Variation du paramètre acoustique non-linéaire « αf » après 58 et 85 cycles gel-dégel (à 85 cycles le béton B2 est trop dégradé)

D'après les résultats des deux modes d'investigation, acoustique linéaire par la détermination de E_{dyn} et UPV et l'acoustique non-linéaire par la détermination du paramètre de décalage fréquentiel αf , il semblerait que les trois paramètres n'ont pas les mêmes origines physiques. Le paramètre αf a permis d'observer des variations importantes entre les deux types de béton et à chaque phase de dégradation. En effet, le décalage fréquentiel permet de suivre quantitativement une dégradation progressive du béton pour les faibles états d'endommagement [Boukari, Y., 2011]. La présente investigation suggère que les méthodes non destructives utilisées sont efficaces pour détecter l'endommagement à l'intérieur des carottes de béton.

Il y a principalement deux types de dégradations dues au gel observable dans les bétons : la formation de microfissures et l'écaillage [Pigeon, M., et Marchand., J., 1993]. Les observations visuelles des éprouvettes B1 et B2 permettent de visualiser la nature des dégradations et la différence entre les deux bétons (Figure 97 et 98). Le béton B1 semble un peu dégradé par l'apparition des écailles sur la surface après 58 cycles et d'importantes fissures à la surface et au voisinage des arêtes après 85 cycles. En revanche, le béton B2 apparaît très dégradé et un écaillage de la surface est visible avec une détérioration des arêtes après 58 cycles, cette dégradation est aggravée après 85 cycles par la disparition de morceaux de béton et aussi des sédiments laissant la place à des creux, ce qui peut s'expliquer par le caractère gélif du sédiment marin.

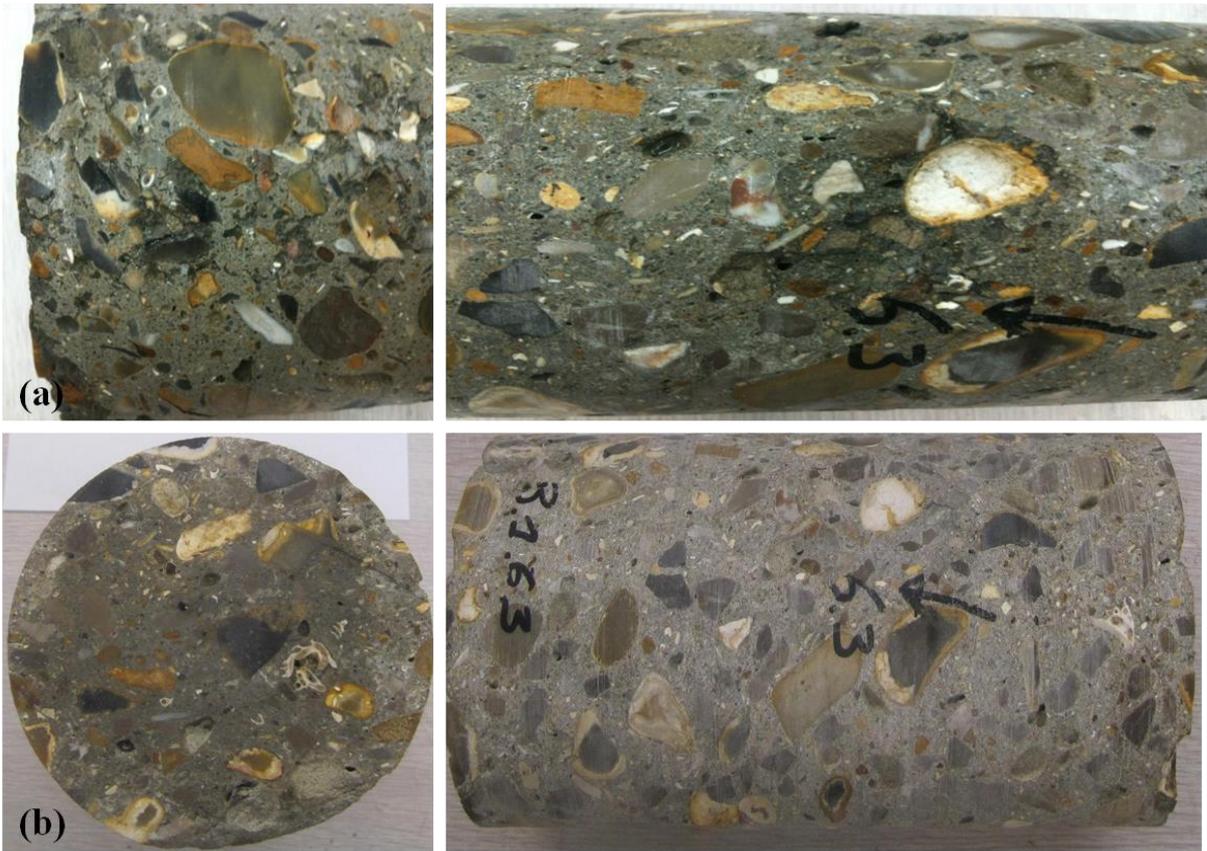


Figure 97: Echantillon de béton B1 du sédiment marin après 58 (a) et 85 (b) cycles gel-dégel



Figure 98: Echantillon du béton B2 du sédiment marin après 58 (a) et 85 (b) cycles gel-dégel

Cette étude montre que l'incorporation d'une grande quantité de sédiment dans le béton réduit considérablement sa résistance au gel comme le montre le comportement linéaire et non-linéaire des bétons B1 et B2. Par ailleurs, du fait que l'action néfaste du gel-dégel due à l'expansion de l'eau lors du gel, il est logique de supposer que, si l'eau excédentaire peut s'échapper facilement dans un vide adjacent rempli d'air, les désordres dans le béton seront évités, ce qui est le principe sous-jacent de l'entraînement d'air [Neuville, A.M., 2000]. L'ajout d'un entraîneur d'air peut améliorer les caractéristiques du béton à base de sédiment dans les conditions hivernales rigoureuses.

2. Attaque sulfatique externe des bétons B1 et B2

2.1. 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. 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, la variation du module d'élasticité dynamique, par leur allongement et par leur perte de masse ou peuvent même être évalués visuellement [Neuville, A.M., 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 du 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 externe. Les conséquences de pénétration des sulfates dans le béton sont la formation du gypse, d'ettringite, ou de la thaumasite, et la transformation des produits d'hydratation.

Dans le cas, où les sulfates sont de provenance extérieur, cette pathologie est souvent appelée « DEF by ESA » (*Delayed Ettringite Formation by External Sulfate Attack*), le second type de formation différée d'ettringite consiste à une formation à l'intérieur de béton, cette pathologie est appelée « DEF by ISA » (*Delayed Ettringite Formation by Internal Sulfate Attack*) [Colleparidi, 2003].

Suivant les définitions adoptées par le groupe de travail AFGC [Hornain, H., et Rougeau, P., 2006], on peut distinguer trois formes principales d'ettringite :

- 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.

Dans cette étude, deux types de béton à base de sédiment marin provenant du carottage de deux blocs béton font l'objet d'une attaque sulfatique externe. Pour cela, nous avons mis en place une série d'essais afin d'expliquer les résistances des bétons face à ce type d'attaque.

Pour pouvoir observer le comportement des échantillons ainsi qu'accélérer le vieillissement des carottes face à l'attaque sulfatique externe, trois protocoles ont été étudiés durant une période de six mois. Les protocoles consistent en une immersion dans une solution dosée à 5% de $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, des cycles d'immersion totale dans 5% de $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ puis séchage à 60°C et enfin des cycles d'immersion dans 5% de $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ puis séchage à 105°C. La solution de $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ est renouvelée tous les 30 jours. L'étude intègre la mesure de la variation de la masse, la variation du module E dynamique et l'évolution de la porosité des trois protocoles.

2.2. Protocoles expérimentaux

Pour évaluer le comportement des bétons vis-à-vis des attaques sulfatiques externes, aucun test n'est pour l'instant normalisé. Afin de pouvoir étudier le comportement des deux bétons B1 et B2, nous avons choisi parmi plusieurs tests expérimentaux trois protocoles d'essais de vieillissement accéléré face à des attaques sulfatiques externes. Pour chaque protocole expérimental, deux échantillons de chaque type béton ont été utilisés. Le principe des protocoles est brièvement décrit ci-après.

2.2.1. Protocole immersion totale

Les éprouvettes des deux types de béton sont entièrement immergées dans une solution de $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ dosée à 5%, la solution est renouvelée tous les 30 jours (Figure 99). C'est le protocole le plus utilisé, le choix de cette concentration vient de plusieurs études [Thidar, A., et al., 2011, Ghrici, M., et al., 2006, ASTM C 1012]. Cette méthode a pour but de simuler le cas typique des attaques sulfatiques par les sulfates issus de la pollution. Après chaque mesure, l'éprouvette est remise dans la solution.



Figure 99: Immersion des bétons B1 et B2 dans une solution à 5% de $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$

2.2.2. Protocole cycles immersion/séchage à 105°C

Le protocole avec immersion/séchage est utilisé pour évaluer la résistance à la cristallisation des sels. Les éprouvettes suivent un cycle de 24 h, étant tout d'abord plongées dans une solution de $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ à 5% pendant 4h avant de subir un séchage de 20 h à 105°C [Riçal, K., et al., 2009]. Ce protocole vise à accélérer le vieillissement des bétons en recréant les attaques subies dans un milieu saturé en sulfates et ainsi entraîner des réactions d'attaques sulfatiques internes.

2.2.3. Protocole cycles immersion/Séchage à 60°C

L'abaissement de la température à 60°C permet d'éviter tout risque d'attaque sulfatique interne. Comme pour le protocole précédent, les éprouvettes suivent un cycle de 24 h, étant tout d'abord plongées dans une solution de $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ à 5% pendant quatre heures avant de subir un séchage de 20 heures à 60°C. Avec ce protocole, la formation d'ettringite interne est limitée, il n'y a pas d'attaque sulfatique interne qui pourrait venir perturber les tests. 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. Le Tableau 23 présente les mesures à réaliser pour les deux bétons selon les trois protocoles :

Type Test/ Pourcentage sédiments	12,5%	20%
<i>Immersion totale</i>	2 tests hebdomadaires	2 tests hebdomadaires
<i>Immersion-Séchage 105°C</i>	2 tests hebdomadaires	2 tests hebdomadaires
<i>Immersion-Séchage 60°C</i>	2 tests hebdomadaires	2 tests hebdomadaires

Tableau 23: Programme des essais de l'attaque sulfatique selon les trois protocoles

2.3. Evolution de la masse et du module d'élasticité dynamique des bétons B1 et B2

Chaque échantillon de béton B1 et B2 a fait l'objet d'un suivi de la variation de la masse et du module dynamique. La fréquence de suivi est fixée et hebdomadaire.

2.3.1. Protocole immersion totale

Les échantillons B1 et B2 ont été immergés d'une façon continue dans la solution à 5% de $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ à 23°C. Après cinq mois d'immersion complète, nous n'avons pas détecté d'altération particulière des deux bétons. Afin de suivre au cours de temps la variation de la masse des éprouvettes de béton, nous avons procédé à des pesées à l'aide d'une balance de résolution inférieure au centième de gramme. Dans le cas du protocole immersion totale, ces dernières sont épongées afin de réduire l'incertitude dans la mesure de masse.

D'après la Figure 100, nous avons constaté une prise de masse des deux bétons au bout de 5 mois de 1,5% les échantillons B1 et de 2% pour les éprouvettes B2. Le gain de masse peut provenir de l'eau qui remplit les fissures, ce qui peut expliquer que le béton B2 présente plus d'hétérogénéité et de défauts que B1.

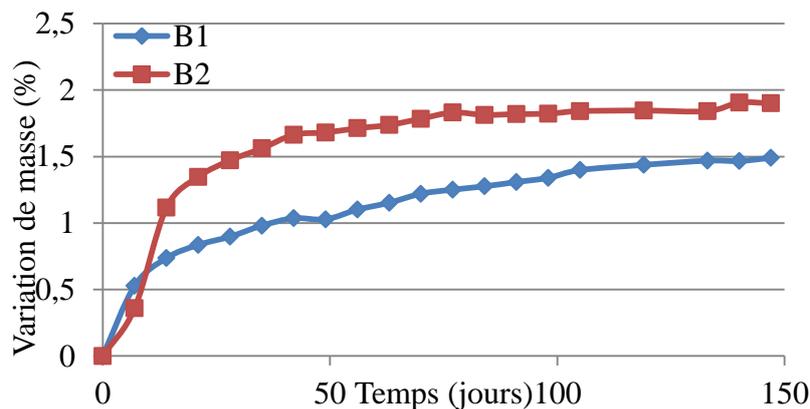


Figure 100: Variation de la masse moyenne des échantillons (Immersion totale)

Le module d'élasticité dynamique des éprouvettes a été déterminé par la mesure de la vitesse de propagation d'onde à l'aide du dispositif Controlab E0641.

Les modules d'élasticité dynamiques ont été estimés à partir de la formule reliant la vitesse au module dynamique Ed :

$$Ed = V^2 \cdot \rho \cdot \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \quad \text{Eq. 11}$$

(Avec : E_d module dynamique en N/m^2 , V vitesse en m/s , ρ masse volumique en kg/m^3 et ν coefficient de poisson). Durant l'étude, nous avons supposé que pour toutes les mesures $\nu = 0,3$ pour B1 et $\nu = 0,36$ pour B2 (ν déterminé par la méthode des jauges de déformation dans le chapitre 5, paragraphe 2.5).

Pour les deux types de béton, on remarque une augmentation de la masse accompagnée par une diminution du module d'élasticité dynamique de 30% pour B1 et de 28% pour B2 par rapport à l'état sain (Figure 101). La diminution de module d'élasticité dynamique ainsi que le gonflement constaté pour les deux bétons, concordent par un début d'un phénomène d'endommagement par fissuration. Ces symptômes concordent parfaitement avec un cas de réaction de gonflement interne [Brunetaud, X., 2005].

D'après les résultats obtenus, le béton B2 semble avoir subi plus de dégradation que B1, la conséquence de cette dégradation peut être expliquée par la présence d'une quantité plus importante de sédiment marin dans la matrice du B2, ce qui a favorisé la présence de plus de défauts et d'hétérogénéité ainsi que l'augmentation de la surface d'interface entre la pâte de ciment, les boulettes de sédiment et les granulats, tout cela a probablement augmenté la porosité du béton B2.

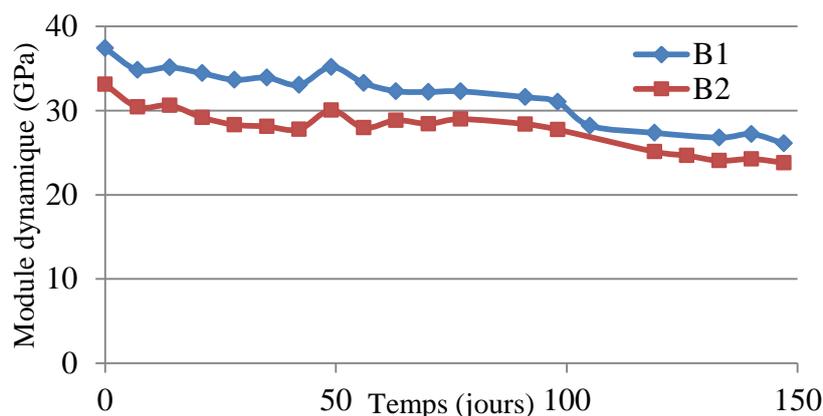


Figure 101: Variation du module dynamique moyen des échantillons (Immersion totale)

2.3.2. Protocole Immersion/Séchage à 105°C

Durant l'application du protocole immersion/séchage à 105°C, des symptômes macroscopiques sont apparus sur les échantillons B1. Nous avons observé une détérioration

dès la quatrième semaine par l'apparition d'un décollement au niveau des arrêtes engendrant des fissurations (Figure 102).

Les échantillons du béton B2 ont commencé à s'endommager dès la troisième semaine, l'endommagement est localisé à la surface, entraînant l'apparition de plusieurs fissures au niveau de la surface des carottes (Figure 103).



Figure 102: Détérioration des arrêtes du B1 après 4 semaines de cycles immersion/séchage à 105°C



Figure 103: Fissuration du béton B2 après 3 semaines de cycles immersion/séchage à 105°C

Après quatre mois de cycle immersion/séchage, les éprouvettes B1 ont été complètement dégradées, les endommagements des échantillons ont été observés sur les surfaces et au niveau des arrêtes par des grandes pertes de matière (Figure 104). L'attaque de sulfates sur les deux bétons est visible à l'œil nu et les symptômes observés sont: de l'écaillage, du décollement, de la fissuration et éventuellement une perte de cohésion de la matrice. La profondeur de dégradation a atteint 10 mm. Les granulats et les boulettes des sédiments sont facilement déchaussés, le béton B1 a perdu une partie de sa cohésion en libérant des fragments de pâte et de granulats de son squelette granulaire.



Figure 104: Dégradation du béton B1 après quatre mois de cycles immersion/séchage à 105°C

Pour les échantillons B2, une détérioration importante des éprouvettes a été observée au troisième mois (un mois avant celle du B1), cette détérioration consiste en une perte considérable de matière au niveau des surfaces et des arrêtes. Observable à l'œil nu, plusieurs défauts correspondent à un développement d'un réseau de fissures multidirectionnelles au niveau de la surface des carottes ainsi que d'autres fissures au niveau des interfaces entre la pâte de ciment : Les granulats et les boulettes de sédiment ont contribué à fragiliser et désolidariser ses liens. L'apparition de plusieurs fissures surfaciques a fortement fragilisé le matériau et a engendré un écaillage des surfaces. On peut également repérer des gonflements et décollement des granulats, ainsi on remarque que l'écaillage a gagné progressivement toute la masse jusqu'à ce que le béton B2 est devenu friable (Figure 105).



Figure 105: Dégradation complète du béton à 20 % après trois mois de cycles immersion/séchage à 105°C

Les variations de masse des éprouvettes sont illustrées à la Figure 106. Nous constatons que toutes des éprouvettes ont subi une perte de masse : 4% pour B1 et 4,2% pour B2 jusqu'à la troisième semaine. Après la troisième semaine nous avons observé un gain de masse pour les deux types de béton B1 et B2. Après 15 semaines, le béton B1 a enregistré un gain de masse de 2,4% et de 1 % pour B2 après 11 semaines. D'après les résultats obtenus, la perte de masse significative observée pendant les trois premières semaines est associée à l'apparition des fissures pour l'ensemble des carottes B1 et B2. On peut penser que la formation de l'ettringite différée a eu lieu en provoquant une expansion et un gonflement des deux bétons. Ce gonflement est probablement lié aux pressions de cristallisation de l'ettringite. Sa formation a engendré des contraintes internes qui ont mené à des gonflements et des intenses fissures.

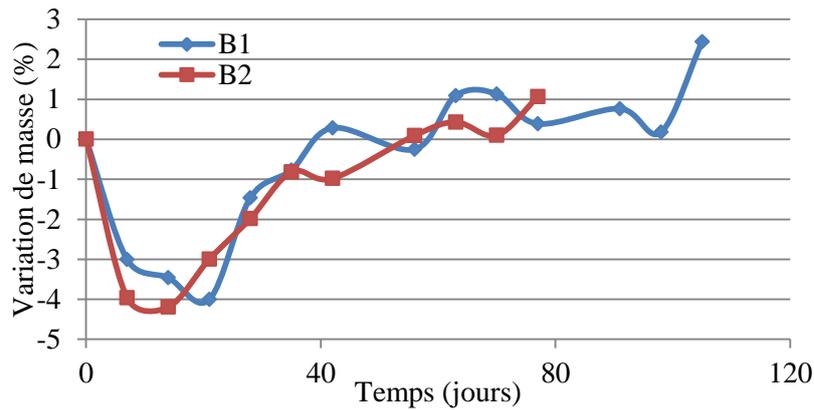


Figure 106: Variation de la masse moyenne des échantillons (Séchage 105°C)

En complément de l'évaluation de la condition physique des échantillons testés, la détermination du module dynamique offre de plus amples informations sur l'étendue des dégâts non visibles à l'œil nu.

La détermination du module d'élasticité dynamique est considérée sensible face aux fissures et aux microfissures engendrées par l'attaque de sulfates. D'après les résultats obtenus, nous avons constaté une importante diminution du module dynamique d'élasticité des deux bétons. Nous avons enregistré une perte de rigidité pour B1 de 27GPa par rapport à l'état sain après 15 semaines. En revanche, B2 a subi une perte de rigidité de 21 GPa après 11 semaines de suivi avant d'être complètement dégradé (Figure 107). On constate que les deux bétons ont perdu totalement leurs propriétés mécaniques presque à la troisième semaine en atteignant des modules très faibles.

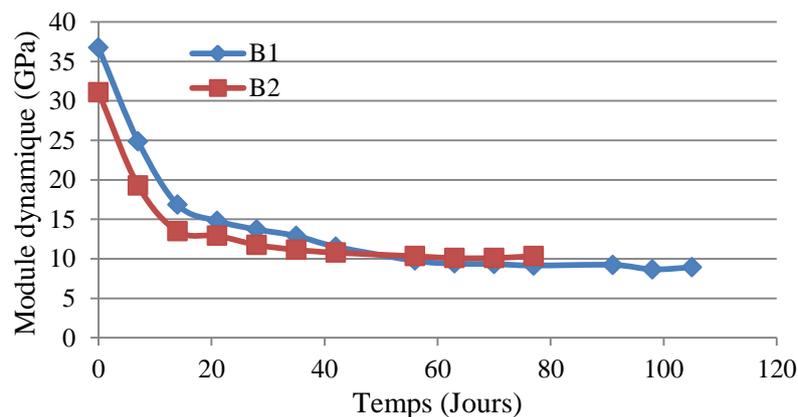


Figure 107: Variation du module d'élasticité dynamique moyen des échantillons (Séchage 105°C)

Les dégradations du B1 et B2 dues aux milieux sulfatiques sont probablement liées à la dissolution des composés calciques du liant hydraté et des boulettes de sédiment, ce phénomène a été observé sur les carottes testé par la disparition des boulettes de sédiment en

laissant un vide au niveau de la surface, ce qui a conduit à un accroissement de nombres de fissures. Ce phénomène a été plus visible sur les carottes du B2 que celui de B1.

Les cycles alternés de mouillage et de séchage à 105°C ont accéléré les dommages causés par la cristallisation des sels dans les pores des deux bétons.

Les conséquences de cette attaque sulfatique n'ont pas été limitées au gonflement, à la variation de la masse et à la fissuration, mais elles ont provoqué aussi une chute au niveau de rigidité des deux bétons due à une perte de cohésion de la pâte de ciment hydraté et à la désagrégation entre la pâte de ciment, les granulats ainsi que les boulettes de sédiment. On remarque que le béton B1 où le pourcentage d'incorporation est moins élevé que celui de B2, a résisté mieux dans le temps face à cette attaque sulfatique. Cette dégradation accélérée de B2 est probablement liée à un accroissement de la perméabilité et de la porosité dû aux intenses fissurations par rapport au béton B1. Cette perte rapide des performances de B2 par rapport à B1 est aussi liée au pourcentage plus élevé de sédiment ainsi que l'effet du sulfate présent dans le sédiment lui-même.

Un autre phénomène qui peut être à l'origine de l'importante dégradation des deux bétons, c'est la formation de l'ettringite différée par réaction des ions de sulfate avec les aluminates du ciment. En effet, la formation de ce composé a généré des contraintes de gonflement et des intenses fissures comme on l'a observé pour les bétons B1 et B2.

L'expansion de cette ettringite peut alors donner naissance sur les parois du réseau poreux à des pressions de traction causant l'expansion, la fissuration voire l'éclatement. [Mather B, 2000].

Les travaux de Pavoine, A., 2003 et de Bruneteaud, X., 2005 relatifs aux méthodes de prévention ou de diagnostic de l'ettringite différée dans des ouvrages, ont permis de préciser les paramètres importants vis-à-vis de cette réaction : élévation de température et temps de maintien de cette température au cœur de béton, conditions environnementales (humidité), composition du ciment (SO_3 , C_3A ...), caractéristiques du béton (dosage en ciment, E/C, microstructure....). Ce sont les conséquences de réactions et processus chimiques complexes entre les composants du ciment hydraté et les composés de sulfate et éventuellement le pourcentage de sédiment ajouté.

2.3.3. Protocole Immersion/Séchage à 60°C

Dans l'étude du troisième protocole immersion/séchage à 60°C, nous avons observé des fissures intenses sur les surfaces et l'apparition des dégradations des arrêtes à partir du sixième mois pour les éprouvettes B1 et au cinquième mois pour les éprouvettes B2 (Figure 108 et 109). Les fissures sont principalement situées aux interfaces pâte, granulats et boulettes de sédiment. Comme l'a montré le protocole précédent, les éprouvettes B2 ont présenté une sensibilité plus importante à l'attaque sulfatique externe par rapport aux éprouvettes B1.



Figure 108: Dégradation et fissuration du béton B1 après 6 six mois de cycles immersion/séchage à 60°C



Figure 109: Dégradation et fissuration du béton B2 après cinq mois de cycles immersion/séchage à 60°C

Nous constatons que les variations de la masse sont assez similaires pour les deux bétons. Nous remarquons que le béton B1 a subi une baisse maximale de 1,7% jusqu'aux 50^{ème} jour contre 1,4 pour B2. A partir du 50^{ème} jour, nous avons constaté un gain de masse pour B1 et B2, ce gain a atteint 1,2% pour B1 et 1,5% pour B2 après cinq mois de suivi par rapport à la masse initiale. Nous remarquons que le béton B2 a subi des gains de masse plus importante que le béton B1 (Figure 110).

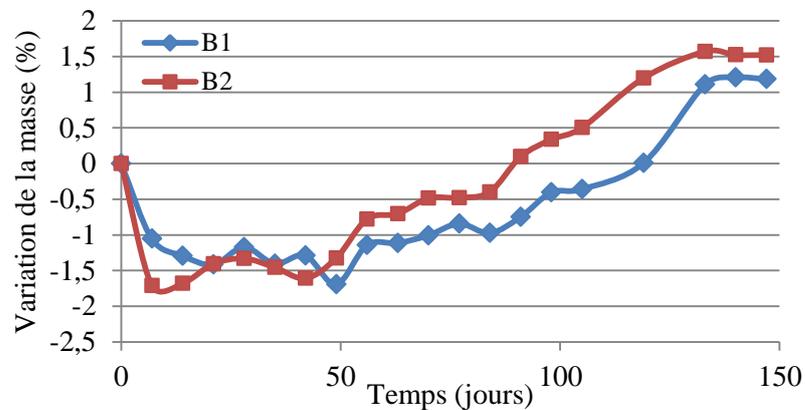


Figure 110: Variation de la masse moyenne du B1 et B2 (Séchage 60°C)

L'évaluation du module d'élasticité dynamique est illustrés sur la Figure 111, d'après les résultats obtenus nous avons constaté une baisse dans le temps du module d'élasticité dynamique pour les deux bétons. Lors de cette investigation, le béton B1 a montré une meilleure résistance par rapport B2. Le taux élevé de sédiment marin dans le béton B2 a influencé les propriétés et a accéléré la dégradation du béton. La comparaison des résultats du protocole immersion séchage à 60°C et le protocole immersion séchage à 105°C montre bien que le protocole à 60°C ne provoque pas l'apparition de la DEF.

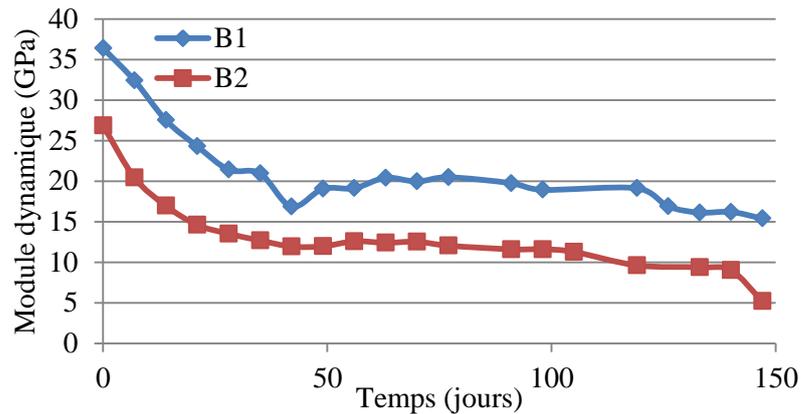


Figure 111: Variation du module d'élasticité dynamique du B1 et B2 (Séchage 60°C)

2.4. Etude microstructurale: porosité au mercure

La détermination de la variation de la masse, du module d'élasticité dynamique et les observations macroscopique nous a permis d'avoir des informations sur l'évolution de la durabilité selon les trois protocoles étudiés dans le temps. Dans le contexte d'évaluation de la durabilité des bétons incorporant des sédiments marins, une étude plus spécifique est nécessaire afin d'avoir plus d'informations sur le comportement des bétons face à l'attaque sulfatique externe. Pour cela, nous avons réalisé une étude microstructurale à travers des essais de porosité au mercure. Une étude de porosité a été réalisée afin d'évaluer l'ampleur de la détérioration des éprouvettes. Nous allons ainsi déterminer l'effet de la porosité sur les deux types bétons à base de sédiment face à l'attaque sulfatique externe.

La détermination de la porosité a été réalisée à T0 (béton sain n'ayant pas encore subi d'attaque), T1 (premier mois d'attaque) et T2 (deuxième mois d'attaque) sur les deux types de béton et selon les trois protocoles d'attaque sulfatique.

2.4.1. Cas immersion totale

Les résultats de la porosité au mercure sur les éprouvettes de B1 et B2 sont présentés en courbes différentielles. La Figure 112 présente une comparaison entre les courbes de porosité différentielle d'un béton sain ($T=0$), après un mois d'immersion totale ($T=1$) et après deux mois ($T=2$) du béton B1. La Figure 113 montre les résultats du béton B2.

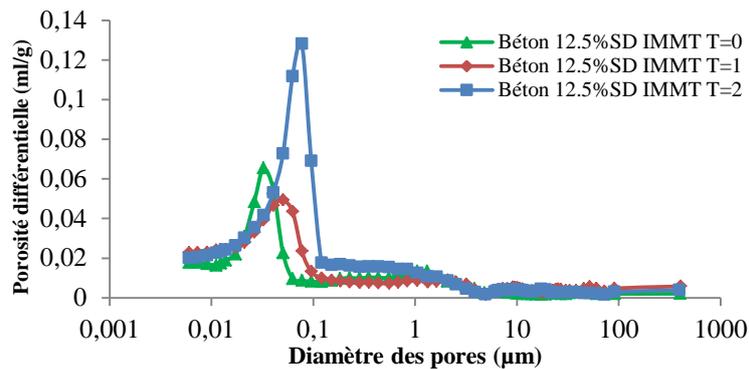


Figure 112: Variation de la porosité différentielle du B1 en immersion totale

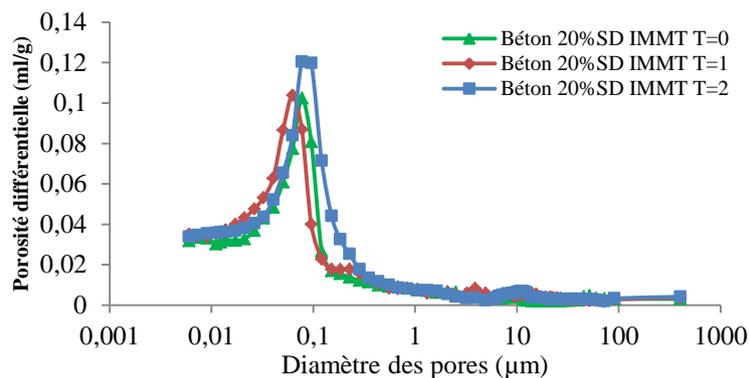


Figure 113: Variation de la porosité différentielle du B2 en immersion totale

Les résultats indiquent une faible différence entre les deux bétons B1 et B2 après deux mois d'immersion complète. Pour les deux bétons, le mode poreux principal de la distribution se situe dans la gamme de 0,05 à 0,1 μm pour le béton à 12,5% de sédiment et entre 0,08 à 0,11 μm pour le deuxième béton. Cette différence est due au pourcentage de sédiment introduit dans le deuxième béton et à l'attaque sulfatique externe.

La Figure 114 corrobore les résultats de la porosité différentielle obtenus durant les deux mois d'exposition. En effet, on constate une augmentation de la porosité de 4% pour B1 et de 3,5% pour B2 durant leur immersion complète en solution sulfatique.

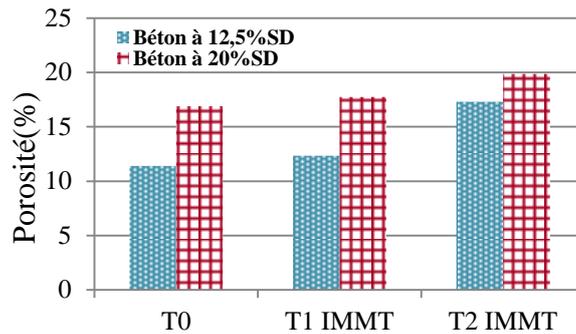


Figure 114: Comparaison entre les porosités des bétons B1 et B2 en immersion totale

2.4.2. Cas immersion/séchage 60°C

La Figure 115 présente une comparaison entre les trois courbes de porosité différentielle d'un béton sain (T=0), après un mois de cycle immersion/séchage à 60°C (T=1) et après deux mois (T=2) du béton B1. La Figure 116 montre les résultats du béton B2.

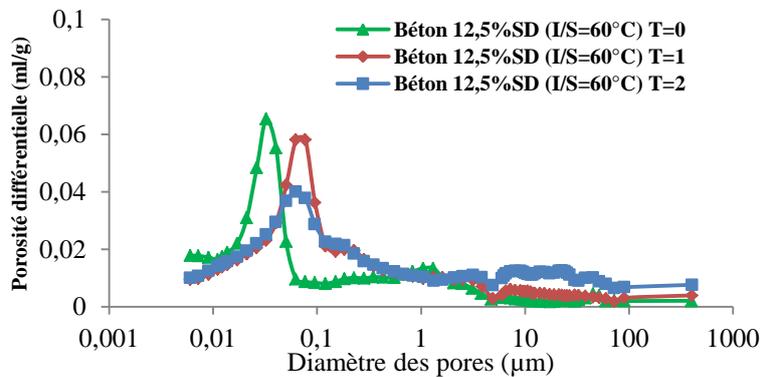


Figure 115: Variation de la porosité différentielle du B1 après cycles I/S à 60°C

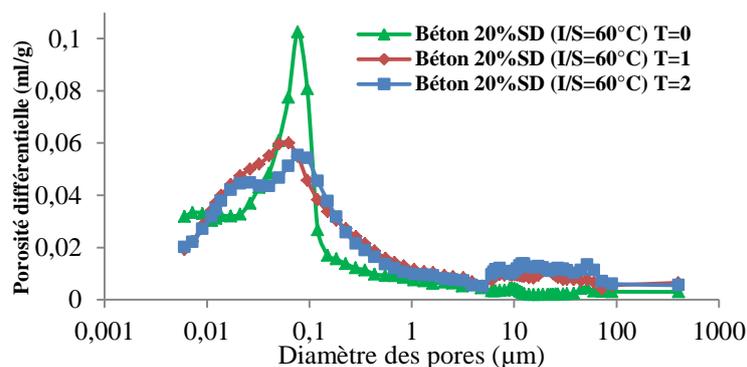


Figure 116: Variation de la porosité différentielle du B2 après cycles I/S à 60°C

L'analyse des éprouvettes B1 montre un diamètre de l'ordre de 0,06μm à l'état sain, ce diamètre augmente après un mois d'attaque pour atteindre 0,1μm et autour de 0,1μm au deuxième mois avec une augmentation du volume des pores entre 8 et 100μm. Dans le cas présent, l'augmentation de la porosité dans le béton B1 montre que le béton a subi une attaque sulfatique externe qui a engendré une modification au niveau de sa microstructure. Le béton

B2 a subi le même effet que pour le premier béton, une augmentation du volume des pores entre 0,01 et 0,11 μm et entre 8 et 90 μm pendant les deux mois des cycles immersion/séchage à 60°C par rapport à l'état sain. La modification de la microstructure des deux bétons par l'augmentation de la porosité peut être l'indicateur de la diminution des propriétés mécaniques.

La Figure 117 compare la variation de la porosité du B1 et B2 durant les deux mois de cycles immersion/séchage à 60°C. Nous remarquons que l'effet des cycles alternés a fait augmenter la porosité de 3% pour B1 et B2. L'évolution de la porosité des deux bétons montre qu'ils ont été affectés par l'effet de l'attaque sulfatique externe.

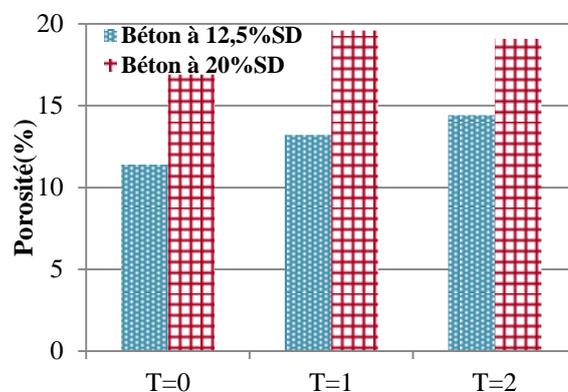


Figure 117: Comparaison entre les porosités des bétons B1 et B2 suite aux cycles I/S à 60°C

2.4.3. Protocole 105°C

La Figure 118 montre une comparaison entre les courbes de porosité différentielle d'un béton sain (T=0), après un mois de cycles immersion/séchage à 105°C (T=1) et après deux mois (T=2) des échantillons B1. La Figure 119 présente les résultats du béton B2.

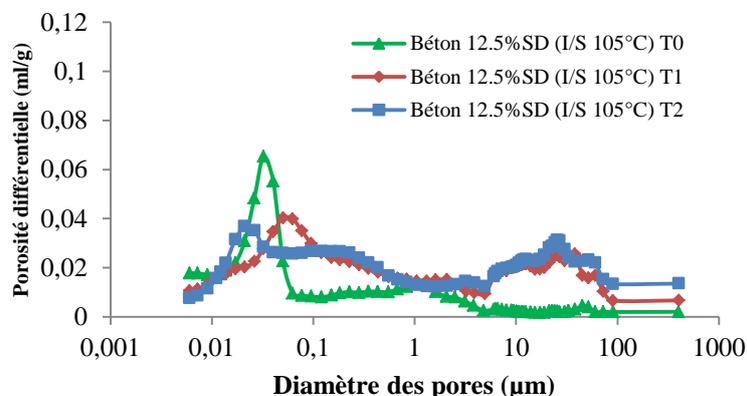


Figure 118: Variation de la porosité différentielle du B1 suite aux cycles I/S à 105°C

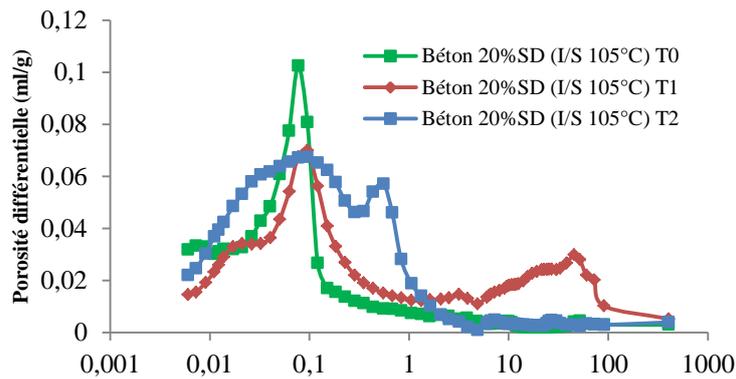


Figure 119: Variation de la porosité différentielle du B2 suite aux cycles I/S à 105°C

L'analyse des courbes indique qu'un endommagement a eu lieu par la progression de la fissuration et l'augmentation des volumes des pores. L'investigation du béton B1 montre une évolution entre l'état sain et les deux mois d'exposition aux cycles, soit une augmentation du volume des pores de 0,06 à 0,5µm au premier mois et de 0,06 et 1µm et entre 10 et 100µm à la fin du deuxième mois. Le changement total de la microstructure du béton B1 par rapport à l'état sain signifie que le béton a subi une sévère attaque sulfatique externe. Le béton B2 a subi le même effet que le béton B1, une augmentation du volume des pores entre 0,06 et 0,5µm et entre 10 et 90µm pendant le premier mois, le changement de la microstructure a été très sévère pour le deuxième mois où on constate qu'un grand volume de pores a été formé par rapport à l'état sain. La modification de la microstructure du béton par l'augmentation de la porosité est l'effet de la diminution des propriétés mécaniques des deux bétons et les fissurations observées au début des cycles immersion/séchage à 105°C.

La Figure 120 compare la porosité des deux bétons à T=0, à un mois et à deux mois des cycles immersion/séchage à 105°C. L'évolution de la porosité des deux bétons à base de sédiment montre que les deux bétons ont été sévèrement affectés par l'attaque sulfatique externe. La comparaison des deux bétons montre que les éprouvettes B1 avec du sédiment présente une porosité inférieure à celle des éprouvettes B2. Ce résultat reflète la meilleure performance mécanique obtenue lors des mesures du module d'élasticité dynamique pour les éprouvettes B1 et confirme la résistance d'un mois de plus à l'attaque sulfatique par rapport au deuxième béton.

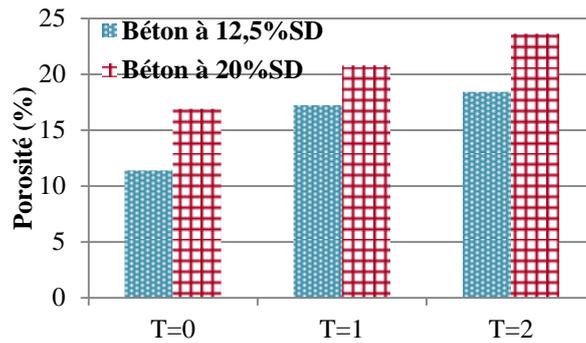


Figure 120: Comparaison entre les porosités des bétons B1 et B2 suite aux cycles I/S à 105°C

D'après les résultats obtenus, on constate que la porosité joue un rôle important dans la dégradation causée par la DEF. On remarque aussi que la porosité a augmenté de manière très significative pour les deux bétons durant les premiers mois suite aux cycles immersion/séchage à 105°C, cette augmentation a produit plusieurs vides, des fissures visibles et des pores, ce qui aide à l'accumulation et la cristallisation des sulfates provoquant des gonflements suivi d'intenses fissures.

3. Effet de la réaction alcali-granulat RAG sur B1 et B2

3.1. Introduction

La réaction alcali-granulat RAG est une réaction interne entre la solution alcaline interstitielle du béton et certains granulats, produisant un gel silico-calco-alcalin expansif, d'où risque de gonflement, fissuration et éclatement du béton. En milieu marin les alcalins contenus dans l'eau de mer peuvent favoriser une alcali-réaction en surface des structures [Guide d'utilisation du béton en site maritime, 2008].

La réaction alcali-granulat RAG désigne un ensemble de réactions chimiques ayant lieu entre les alcalins (Na, K, OH⁻) de la solution interstitielle basique du béton, la portlandite issue de l'hydratation du ciment, et des minéraux réactifs (silice vitreuse ou mal cristallisée) provenant de certains granulats du béton appelés « potentiellement réactifs ». Les produits de cette réaction étant expansifs, la présence d'alcali-réaction est décelée par les fissures généralement importantes et les déformations des structures atteintes [Multon, S., 2004]

Trois types d'alcali-réaction principales sont décrits dans la littérature [Diamond, S., 1989 ; Hornain, H., et Bournazel, J.P., 1993] :

- **La réaction alcali-silice noté souvent RAS** qui est plus la fréquente et à laquelle se réduisent le plus souvent les deux autres types de réaction.
- **La réaction alcali-silicates** qui se caractérise en particulier par rapport à la RAS par la nature des granulats concernés (silicate, matériaux argileux...) et le type des phénomènes observés (gonflements de masse et/ou pop out). Les produits de réaction (gels alcalins plus ou moins calciques) sont voisins de ceux formés au cours de la réaction alcali-silice proprement dite.
- **La réaction alcali-carbonates** qui résulte de la transformation de granulats dolomitiques sous l'action des alcalins. Ce type de réaction, dont un seul cas observé en France, est généralement associé à des réactions alcali-silice et alcalis-silicates dues à la présence dans les granulats dolomitiques d'inclusions de microsilices et de minéraux argileux à l'origine de gonflement et fissurations observées.

3.2. Méthodes de caractérisation

Le suivi du béton à base de sédiment consiste à suivre l'endommagement lié à la RAG avec le suivi de l'allongement et la variation de la masse sur les carottes B1 et B2 dont la réaction est accélérée.

Des mesures d'allongement (expansion) et de prise de masse ont été réalisées sur les carottes des deux bétons. L'essai consiste à plonger les carottes B1 et B2 dans un récipient rempli d'une solution alcaline (solution de NaOH à 1M) dans des conditions de conservations à 38°C et à mesurer le gonflement. L'essai a été réalisé pendant 13 semaines sur deux éprouvettes de chaque béton.

3.3. Essai d'allongement et de variation de masse

3.3.1. Essai d'allongement

L'essai a été inspiré de la norme canadienne CSA A23.2-14A pour évaluer la réactivité des granulats et des sédiments des carottes B1 et B2. Les éprouvettes ont été équipées de deux plots inoxydables fixés au centre des faces des éprouvettes. La mesure d'allongement des éprouvettes a été réalisée à l'aide d'un appareil équipé d'un comparateur d'une précision de 0,001 mm par rapport à une barre de référence.

La Figure 121 présente une synthèse des résultats d'expansion des bétons B1 et B2. Les éprouvettes des deux types de béton n'ont pas subi de gonflement durant les premières semaines, un retrait 0,05% a été enregistré pour B1 et B2 à la première semaine. Cette période de latence à l'initiation de la réaction a déjà été observée lors des études sur des bétons contenant du calcaire [Sargolzahi, M., 2009, Boukari, Y., 2011]. Par ailleurs, nous observons un saut d'allongement (variation anormale) de même ordre à la deuxième semaine pour B1 et B2 suivi d'un retrait de 0,040% pour B1 et de 0,029% pour B2 à 6 semaines. Nous supposons que ce saut correspond à une hausse de température qui aurait fait réagir les deux types de béton plus rapidement.

A partir de la 7^{ème} semaine, le béton B2 a subi un allongement significatif, cet allongement a atteint 0,07% après 13 semaines de suivi. Le béton B1 n'a pas subi un important gonflement, on remarque plutôt un gonflement très limité après 6 semaines, suivi d'un léger retrait au bout de 13 semaines. La courbe moyenne correspondant aux mesures du B1 présente une expansion très faible par rapport à B2. On constate aussi que l'allongement

est intervenu avec une vitesse très faible pour les deux bétons de l'ordre de 0,007% /semaine pour le béton B2 et de l'ordre 0,006% /semaine pour le béton B1.

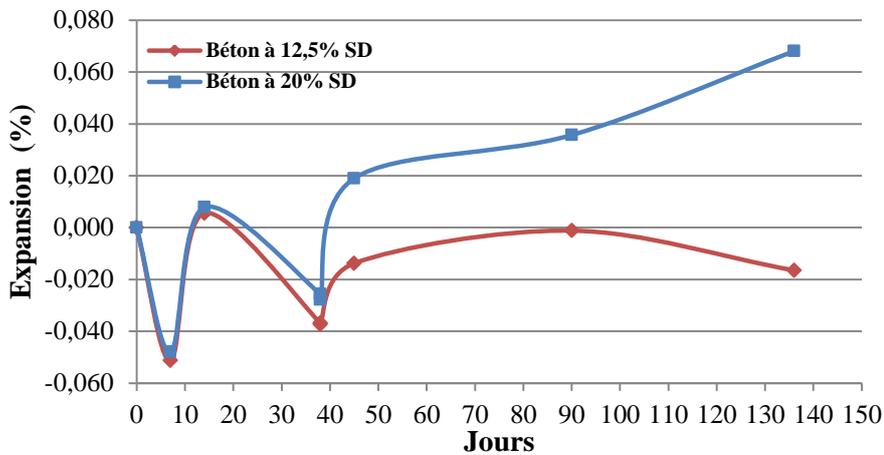


Figure 121: Graphique de l'expansion(%) des carottes B1 et B2 en fonction du temps (jours)

3.3.2. Variation de la masse

Les variations de la masse des éprouvettes B1 et B2 ont été mesurées avec une balance précise au centième de gramme. Les variations de la masse des deux bétons ont été mesurées au moment où les éprouvettes ont été placées dans la solution de NaOH à 1M.

Après 7 semaines, la courbe moyenne de variation de la masse des deux bétons atteint 0,5% pour le béton B1 et 0,82 pour le béton B2 (Figure 122). Pendant les 15 premiers jours, la prise de masse des deux bétons immergés dans la solution est importante, cette augmentation est due à l'hydratation des échantillons. Sellier, A., et al., 2009 confirme que le gonflement observé durant les 24 premières heures d'immersion dans la soude n'est pas attribué à la RAS mais au gonflement hydrique.

La courbe du béton B2 augmente rapidement entre 0 et 7 semaines, puis diminue légèrement entre 7 et 13 semaines. On constate la même chose pour le béton B1 au niveau de la prise de la masse mais on remarque une légère chute de la variation de masse après 7 semaines. On peut considérer que la prise de masse significative du béton B2 par rapport à B1 peut être attribuée à la RAS.

Les deux types de béton montrent un gain de masse dans le temps jusqu'à la 7^{ème} semaine, suivi d'une diminution jusqu'à la semaine 13. Une différence de variation de masse de l'ordre de 0,55% au niveau de la prise de masse entre le béton B1 et B2 est observée à la 13^{ème} semaine. Cette différence est probablement due à la forte hétérogénéité qui représente le béton B2 par la présence d'un taux plus élevé de sédiment par rapport au béton B1.

L'allongement observé pour B2 est directement lié à la prise importante de masse, suite à la formation probable du gel due à la RAS. Cette différence de prise de masse peut être aussi expliquée par le taux de porosité de B2 qui est plus important que celui de B1. La comparaison (allongement et variation de la masse) des deux bétons montre que le béton B2 est plus réactif. L'expansion et la prise de masse du béton B2 est l'une des principales conséquences de l'alcali-réaction. D'après les résultats obtenus, on peut donc conclure que la prise de masse dépend donc des granulats et dans notre cas des boulettes des sédiments et aussi de leur dosage dans le béton.

D'après la comparaison entre les deux bétons à 12,5% et 20% de sédiment, on peut constater que les boulettes de sédiment sont potentiellement réactives. La solution face à l'alcali-réaction consisterait, certes, à bien estimer le dosage de sédiment dans le béton.

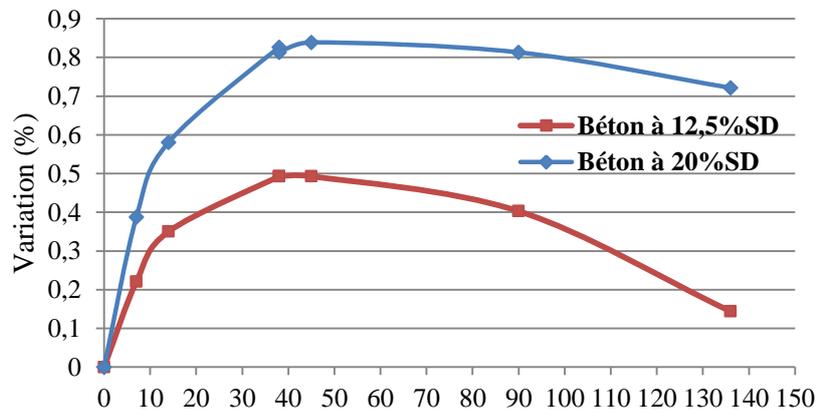


Figure 122: Graphique de variation de la masse (%) des bétons B1 et B2 en fonction du temps (jours).

Chapitre 7

Evaluation environnementale des bétons B1 et B2

1. Introduction

L'admission du béton à base de sédiment marin comme un nouveau produit dans le domaine de génie civil, en plus des performances mécaniques et de durabilité dépend essentiellement de son comportement environnemental. Avant de pouvoir définitivement valider le scénario de valorisation, il est utile d'évaluer la validité environnementale.

Pour qu'un sédiment soit compatible avec une utilisation sous forme de béton ou incorporé dans un béton, il doit satisfaire à des seuils de non dangerosité par rapport aux éventuels polluants qu'il contient.

La caractérisation du relargage des métaux lourds par des matériaux de construction (notamment le béton), présente une difficulté particulière, liée aux très faibles concentrations en métaux lourds dans le matériau (typiquement 20-300mg/kg). Ces concentrations sont fonction de l'origine de la matière première, du type d'ajouts minéraux de ciment, des combustibles et des déchets ou sous-produits industriels valorisés dans le four cimentier [Moudilou, E., 2000].

Ce chapitre a donc pour objectif de déterminer le relargage des métaux lourds contenus dans les deux types de béton à base de sédiment marin et voir si les sédiments incorporés présentent un effet sur la qualité des bétons et sur l'environnement.

L'étude d'évaluation environnementale a été réalisée sur le sédiment brut, sur les boulettes de sédiment incorporées dans les blocs béton, sur le béton contenant les boulettes de sédiment et enfin une évaluation des eaux prélevés du piézomètre installé à côté des blocs de béton.

2. Evaluation environnementale du B1 et B2

2.1. Comparaison des concentrations totale avec des seuils normatifs Géode

2.1.1. Comparaison des concentrations totale du sédiment brut et du sédiment incorporé dans B1 et B2

L'identification des éléments métalliques traces du sédiment brut (SB) destiné à être utilisé dans la valorisation des blocs de béton a été analysée par le GPMD avant la fabrication de ces derniers. Les résultats d'analyse du contenu total montrent que le SB présente un dépassement au niveau des concentrations du Cu, Pb et Zn par rapport à N2 selon les recommandations de l'arrêté du 23 décembre 2009 (Tableau 24), les autres éléments (As, Cd, Cr et Ni) respectent le niveau N1 et ne présentent pas un danger au niveau de la valorisation. D'après les résultats obtenus, et selon les seuils Géode (N1 et N2), le SB est considéré comme un sédiment pollué non-immérgeable.

<i>Eléments traces</i>	<i>Concentration totale en mg/kg de matériau sec</i>		
	<i>SB</i>	<i>Niveau N1</i>	<i>Niveau N2</i>
<i>As</i>	<i>18,30</i>	<i>25</i>	<i>50</i>
<i>Hg</i>	<i>0,50</i>	<i>0,4</i>	<i>0,8</i>
<i>Cd</i>	<i>1</i>	<i>1,2</i>	<i>2,4</i>
<i>Cr</i>	<i>61</i>	<i>90</i>	<i>180</i>
<i>Cu</i>	<i>106,70</i>	<i>45</i>	<i>90</i>
<i>Ni</i>	<i>17</i>	<i>37</i>	<i>74</i>
<i>Pb</i>	<i>286,70</i>	<i>100</i>	<i>200</i>
<i>Zn</i>	<i>333,30</i>	<i>276</i>	<i>552</i>

Tableau 24: Concentration totale des sédiments bruts

Dans le cadre de notre étude et dans l'objectif d'évaluer l'aspect environnemental des blocs du béton à base du SB, nous avons réalisé une campagne d'analyses du contenu total du sédiment incorporé dans les deux blocs de béton. L'analyse a été réalisée par la méthode de mise en solution totale par attaque acide dans un milieu fermé selon la recommandation pour analyse des métaux lourds (NF ISO 11466).

Les résultats d'analyse des boulettes du sédiment des blocs 1 et 2 (BSB1, BSB2) montre que la concentration moyenne en éléments est du même ordre de grandeur (Tableau 25). D'après les résultats obtenus, on peut dire que les sédiments incorporés dans les deux blocs sont similaires. Nous pouvons tout de même constater que les concentrations des ETM sont

inférieures au seuil N1, mis à part le Pb qui dépasse légèrement le seuil N1 et ne présente pas un danger en cas d'immersion dans la mer selon la réglementation.

A titre de comparaison entre le sédiment incorporé dans les blocs de béton (BSB1 et BSB2) et SB, nous avons constaté une importante diminution des concentrations des EMT. Cette diminution peut être liée à un traitement spécifique du sédiment brut comme nous l'avons constaté lors de l'investigation des boulettes par la DRX et le MEB. On peut estimer qu'un traitement réalisé avant l'incorporation des sédiments dans le béton a fortement contribué à une baisse significative des concentrations des ETM.

<i>Eléments traces</i>	<i>Concentration totale en mg/kg de matériau sec</i>				
	<i>BSB1</i>	<i>BSB2</i>	<i>SB</i>	<i>Niveau N1</i>	<i>Niveau N2</i>
<i>As</i>	9,20	9,23	18,30	25	50
<i>Hg</i>	-	-	0,50	0,4	0,8
<i>Cd</i>	<4	<4	1	1,2	2,4
<i>Cr</i>	37,13	36,78	61	90	180
<i>Cu</i>	43	45,13	106,70	45	90
<i>Ni</i>	11,60	11,45	17	37	74
<i>Pb</i>	136,80	133,26	286,70	100	200
<i>Zn</i>	151,47	158,60	333,30	276	552

Tableau 25: Comparaison entre les teneurs en ETM dans les sédiments traités et le sédiment brut

2.1.2. Comparaison des concentrations totale du sédiment brut et du béton B1 et B2.

La caractérisation environnementale du béton B1 et B2 peut apporter des informations supplémentaires sur la composition générale de la matrice. Dans ce cadre nous avons menés des essais d'analyse du contenu total de B1 et B2 selon la recommandation NF ISO 11466.

D'après les résultats obtenus on remarque que B1 présente une baisse significative des concentrations des éléments As, Cu, Pb et Zn par rapport à B2 (Tableau 26). Cela confirme bien que le béton B1 présente une proportion de sédiment moins élevé que celui de B2.

A titre de comparaison des ETM des deux bétons, on peut constater que les deux bétons ne dépassent pas les seuils N1 et N2. Les deux bétons ne présentent pas un danger sur l'environnement en cas d'immersion en mer.

<i>Eléments traces</i>	<i>Concentration totale en mg/kg de matériau sec</i>				
	<i>B1</i>	<i>B2</i>	<i>SB</i>	<i>Niveau N1</i>	<i>Niveau N2</i>
<i>As</i>	<i>7,9</i>	<i>9,92</i>	<i>18,3</i>	<i>25</i>	<i>50</i>
<i>Hg</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>0,5</i>	<i>0,4</i>	<i>0,8</i>
<i>Cd</i>	<i><4</i>	<i><4</i>	<i>1</i>	<i>1,2</i>	<i>2,4</i>
<i>Cr</i>	<i>39,3</i>	<i>39,04</i>	<i>61</i>	<i>90</i>	<i>180</i>
<i>Cu</i>	<i>33,3</i>	<i>41,61</i>	<i>106,7</i>	<i>45</i>	<i>90</i>
<i>Ni</i>	<i>17,06</i>	<i>17,8</i>	<i>17</i>	<i>37</i>	<i>74</i>
<i>Pb</i>	<i>29,1</i>	<i>42,56</i>	<i>286,7</i>	<i>100</i>	<i>200</i>
<i>Zn</i>	<i>65</i>	<i>79,46</i>	<i>333,3</i>	<i>276</i>	<i>552</i>

Tableau 26: Teneurs en ETM du sédiment brut et B1 et B2

2.2. Comparaison des résultats de lixiviation du SB et des bétons B1 et B2 avec la législation sur le stockage des déchets

L'étude de l'impact environnemental du sédiment brut (SB) et des bétons B1 et B2 a été évalué à partir d'essai de lixiviation selon la norme NF EN 12457-2 sur un matériau broyé et comparé par la suite à la législation pour la mise en décharge des déchets. Les résultats du sédiment brut (SB) ont été obtenus lors d'une campagne d'essai en 2010 avant la réalisation des blocs béton. D'après les résultats obtenus sur le SB, on remarque que les taux de relargage des ETM sont inférieurs aux seuils de mise en décharge des déchets inertes sauf pour les chlorures et les sulfates (Tableau 27).

Les résultats sur éluats des bétons B1 et B2 nous indiquent que les EMT sont très inférieurs aux seuils définis par la réglementation de stockage des déchets. Ceci montre que les bétons B1 et B2 ne présentent pas un effet négatif sur l'environnement. On peut voir que le relargage des ETM des deux bétons reste inférieurs à celui du SB, une diminution significative au niveau des chlorures et sulfates a été constaté, comme nous l'avons constaté au cours de l'analyse de contenu total, cette diminution est fortement due à un traitement réalisé sur les SB avant d'être incorporé dans le béton. La comparaison des taux de relargage des EMT des éluats des bétons B1 et B2 avec les concentrations totales du contenu montre que le béton ne relargue pas toute la quantité de concentration. Le relargage des éléments organiques est quasiment faible par rapport au contenu total.

<i>Eléments traces</i>	<i>Concentration totale en mg/kg de matériau sec</i>			
	<i>BSB1</i>	<i>BSB2</i>	<i>SB</i>	<i>Déchets inertes</i>
<i>As</i>	<i><0,1</i>	<i><0,1</i>	<i>0,22</i>	<i>0,5</i>
<i>Ba</i>	<i>9,88</i>	<i>14,7</i>	<i>0,11</i>	<i>20</i>
<i>Cd</i>	<i><0,04</i>	<i><0,04</i>	<i>0,01</i>	<i>0,04</i>
<i>Cr</i>	<i><0,1</i>	<i><0,1</i>	<i>0,05</i>	<i>0,5</i>
<i>Cu</i>	<i><0,1</i>	<i><0,1</i>	<i>0,05</i>	<i>2</i>
<i>Mo</i>	<i><0,1</i>	<i><0,1</i>	<i>0,27</i>	<i>0,5</i>
<i>Ni</i>	<i><0,1</i>	<i><0,1</i>	<i>0,05</i>	<i>0,4</i>
<i>Pb</i>	<i><0,1</i>	<i><0,1</i>	<i>0,05</i>	<i>0,5</i>
<i>Sb</i>	<i><0,1</i>	<i><0,1</i>	<i>0,06</i>	<i>0,06</i>
<i>Se</i>	<i><0,1</i>	<i><0,1</i>	<i>0,05</i>	<i>0,1</i>
<i>Zn</i>	<i><0,1</i>	<i><0,1</i>	<i>0,06</i>	<i>4</i>
<i>Chlorures</i>	<i>680</i>	<i>515</i>	<i>22290</i>	<i>800</i>
<i>Sulfates</i>	<i>718</i>	<i>43</i>	<i>2544</i>	<i>1000</i>

Tableau 27: Comparaison en teneurs en ETM du sédiment brut et B1 et B2 (essai de lixiviation)

La fabrication des blocs bétons à base de sédiment marin entraîne une encapsulation chimique (création de liaison entre les composants du béton) et physique (formation d'une barrière des composés chimiques). Les transferts vers le milieu naturel sont donc fortement limités voire inexistant. Ce point est parfaitement illustré par les résultats obtenus lors des essais de lixiviation des carottes du béton B1 et B2.

Conclusions générales et perspectives

Les travaux de recherche entrepris dans cette thèse s'inscrivent dans une problématique de gestion des sédiments marins, en particulier les sédiments non-immérgeables qui représentent un problème économique et environnemental majeur.

La présente étude a été réalisée dans le but de définir une méthodologie pour la gestion des sédiments de dragage du GPMD en vue d'une valorisation dans le domaine du génie civil. Elle a été établie en premier lieu par élaboration d'un nouveau matériau routier à base de sédiment marin doté pour une utilisation en couche de fondation et en deuxième lieu par une étude de durabilité des blocs bétons incorporant le sédiment de dragage.

L'originalité de cette première partie réside principalement dans l'application d'une méthodologie de valorisation d'un matériau alternatif par l'élaboration d'une formulation d'un nouveau matériau routier à base de sédiment marin en laboratoire et l'évaluation de la faisabilité par la réalisation d'une première route à base de ce matériau alternatif à l'échelle 1.

S'agissant d'un nouveau matériau alternatif, il était nécessaire de réaliser une étude approfondie des propriétés physico-chimiques, mécaniques et environnementales des sédiments non-immérgeables du GPMD. Deux études d'identification ont été réalisées sur deux prélèvements P1 (avant séchage naturel) et P2 (après séchage naturel). L'identification des prélèvements P1 et P2, nous a permis de mettre en évidence les principales caractéristiques du matériau comme la teneur en eau, la teneur en matière organique, la valeur en bleu de méthylène, la granulométrie, la masse volumique absolue, les limites d'Atterberg, l'indice de portance immédiat, la composition minéralogique, l'analyse thermique, l'observation MEB et l'évaluation environnementale. D'après les essais réalisés sur des sédiments P1 et P2, nous avons constaté que la teneur en eau du sédiment avant séchage est très élevée. Cette dernière a fortement baissé après quatre mois de séchage naturel. Le traitement par séchage naturel a permis de faciliter le transport et la manutention des sédiments pour leur valorisation dans des matériaux routiers. Les essais ont aussi montré un taux de fines relativement important, avec la présence de 10% de matières organiques. La caractérisation des paramètres physiques a permis de classer respectivement P1 et P2 en classes A₄ et A₃. D'un point de vue mécanique, les valeurs de l'Indice de Portance Immédiat de P1 et P2 ont présenté une insuffisance pour qu'ils puissent être valorisés en couche de fondation.

L'évaluation environnementale de P1 et P2 a été réalisée selon le nouveau guide d'acceptabilité des matériaux alternatifs en technique routière. Après une série d'analyses des deux matériaux, nous avons obtenus des concentrations de relargage en composés inférieures aux valeurs seuils définies par le guide, cela autorise donc l'acceptabilité de la valorisation des sédiments en technique routière. Après l'identification des deux sédiments P1 et P2, nous avons constaté que le traitement par séchage naturel a amélioré significativement les propriétés du sédiment par une diminution de la teneur en eau ainsi que de la plasticité et une amélioration au plan de la portance. Par ailleurs, le suivi environnemental a montré une diminution significative des concentrations en chlorures et une stabilisation au niveau des concentrations des EMT. On peut donc considérer que le sédiment traité après séchage naturel ne pose pas de problèmes concernant le relargage.

Pour une meilleure valorisation du sédiment en matériau routier, une amélioration des propriétés est nécessaire afin de répondre aux exigences du comportement mécanique et en prenant en compte l'aspect économique. Nous avons amélioré le comportement mécanique du sédiment par l'ajout d'un correcteur granulaire. Le correcteur granulaire choisi dans cette étude est un sable de dragage, ce dernier a permis d'avoir une distribution granulométrique respectant les coefficients d'uniformité et de courbure des courbes granulométriques ainsi une diminution de la fraction fine. L'analyse environnementale du mélange sable de dragage et sédiment de dragage a montré une diminution des concentrations des ETM par rapport au sédiment de dragage.

Dans l'optique d'une valorisation en couche de fondation, le mélange routier a été conçu avec 1/3 de sédiment de dragage, 2/3 de sable de dragage avec un traitement de 1% de chaux vive et 6% de liant hydraulique. L'étude du comportement mécanique du mélange proposé a été réalisée sur une durée d'un an. Cette étude nous a permis de vérifier la possibilité de la valorisation selon les recommandations du GTS. Après une campagne expérimentale du comportement mécanique (indice de portance, résistance à la compression, résistance à la traction et évaluation du module d'élasticité), il a été démontré que la formulation proposée est satisfaisante au regard des exigences pour une utilisation en couche de fondation. Les performances à 360 jours classent en S3 le matériau selon l'abaque de classement du GTS. L'évaluation environnementale de la formulation a permis de déterminer les concentrations des ETM sur 360 jours, les analyses réalisées ont montré une diminution des taux de concentration dans le temps de certains éléments traces. Selon le guide méthodologique d'acceptabilité des matériaux alternatifs en technique routière, la formulation

étudiée a montré un aspect inerte et confirme l'utilisation des sédiments traités en couche de fondation.

Afin de valider ces résultats, nous avons appliqué la formulation étudiée en laboratoire à l'échelle du site par la réalisation de 550 m de route à base de sédiment marin à Dunkerque. Cette application est une première à l'échelle industrielle. Une étude de durabilité de la route au niveau mécanique et environnemental a été réalisée afin de comparer les résultats obtenus au laboratoire et sur le site. Le suivi mécanique de la route a montré de bonnes performances et a permis de classer en S3 le matériau à 360 jours. L'évaluation environnementale de la route sur une durée de 360 jours a montré des seuils inférieurs aux seuils définis par le guide Sétra, [Sétra, 2012]. D'après l'investigation réalisée sur la formulation de la route réalisée à base de sédiments marins, nous avons montré la compatibilité entre les résultats in situ et ceux obtenus en laboratoire.

A partir de ce travail (étude en laboratoire et in situ), nous avons montré l'efficacité de la méthodologie de valorisation d'un matériau considéré comme déchet. Cette méthodologie intègre un prétraitement dans des bassins de décantation, un traitement du sédiment par ajout granulaire et de liant hydraulique, une réalisation d'un ouvrage routier à base du matériau alternatif. Ceci a rendu la valorisation du sédiment dans le génie civil possible.

Dans la même optique de gestion du sédiment en génie civil, la deuxième partie de la thèse a porté sur l'étude de la durabilité des blocs bétons incorporant des sédiments. Une démarche d'étude de durabilité selon une approche performantielle de durabilité a été réalisée. L'étude porte sur deux bétons respectivement à base de 12,5% et 20% de sédiment marin. Dans ce cadre, nous nous sommes intéressés à évaluer l'impact d'intégration du sédiment marin fin dans le béton sur les performances par des méthodes destructives et non destructives.

Les objectifs généraux étaient :

- une évaluation des indicateurs de la durabilité sur les deux bétons ;
- une étude de durabilité par des essais de performance (gel/dégel, attaque sulfatique externe, réaction alcalis-granulats) ;
- une évaluation de l'impact environnemental.

L'originalité de cette partie se résume principalement dans la transversalité des essais et des techniques de caractérisation mises en œuvre ainsi que les différents indicateurs employés

afin d'analyser et évaluer l'effet de l'ajout et du taux d'incorporation des sédiments sur la qualité et la durabilité du béton.

Les essais menés sur les deux types de béton contenant 12,5% et 20% de sédiment ont apporté des éléments de réponse aux objectifs généraux de cette partie de thèse, à savoir les informations collectées par les indicateurs non destructifs à travers des mesures par acoustique linéaire (détermination de l'UPV et du module d'élasticité dynamique) et par acoustique non linéaire (résonance en dynamique rapide), des essais destructifs (essai de compression, traction et détermination du module d'élasticité) et des analyses microstructurales (porosité, DRX et MEB).

Les vitesses ultrasonores (UPV) ont montré que le béton B1 présente une meilleure performance par rapport au béton B2. Les résultats obtenus par UPV ont classé le béton B1 comme un béton de bonne qualité et B2 comme un béton de qualité discutable selon le tableau de qualité du béton [Carino, 2003]. Selon le module d'élasticité dynamique, le béton B1 a révélé une rigidité plus importante que B2. Selon les deux indicateurs déterminés par l'acoustique linéaire, nous avons constaté que le béton B1 présente une bonne qualité par rapport au béton B2. On constate que l'ajout de 20% du sédiment dans le béton B2 a joué un rôle néfaste sur la qualité et la performance du béton par rapport à celui de B1. Cette réduction de performance peut être expliquée par l'augmentation de la porosité, des microfissures internes et l'augmentation de l'hétérogénéité. Un autre indicateur a également été déterminé de manière non destructive par la méthode de résonance non linéaire, selon cette méthode, nous avons en particulier déterminé le paramètre αf caractéristique du phénomène de décalage fréquentiel. Nous avons observé que le béton B2 présentait une augmentation du décalage fréquentiel αf de 25 % par rapport au B1. La variation du décalage fréquentiel entre les bétons B1 et B2 confirme la présence d'une forte hétérogénéité entre les deux bétons causés par l'ajout du sédiment. Comme observé lors de l'investigation acoustique linéaire, l'incorporation de 7,5% en plus du sédiment marin dans le béton B2 a réduit les propriétés du béton.

L'investigation par des essais de résistance à la compression, traction et la détermination du module d'élasticité statique a permis de confirmer les résultats obtenus en essais non destructifs et d'avoir des informations supplémentaires sur les indicateurs de durabilité. Les résistances à la compression ont montré que le béton B1 présente une meilleure performance que B2. Nous constatons que l'effet de l'ajout d'un taux plus élevé dans le

mélange du béton B2 a induit une chute de résistance de l'ordre de 10 MPa. Au niveau de la résistance à la traction, une diminution de 0,3MPa a été enregistrée pour le béton B2 par rapport à B1. La détermination du module d'élasticité statique a permis d'identifier un écart entre les deux bétons. L'augmentation du taux d'incorporation du sédiment dans le béton B2 a mené à une diminution de rigidité de l'ordre de 4GPa du béton B2; cette diminution peut s'expliquer par le changement de la microstructure ainsi que l'augmentation de la porosité et de l'hétérogénéité du béton B2 par rapport à celles de B1.

Les analyses de DRX et MEB ont permis de mesurer, grâce à l'analyse de microstructure de B1 et B2, la porosité et l'effet d'incorporation du sédiment sur la microstructure du béton. Nous avons remarqué que l'augmentation du taux d'incorporation du sédiment est accompagnée par une augmentation de la porosité du béton. L'investigation des deux bétons a présenté une porosité totale de 11,6% pour B1 et de 16,9 % pour B2.

Dans le cadre de l'évaluation de l'influence de l'incorporation du sédiment dans le béton, les analyses des résultats des programmes expérimentaux des indicateurs de la durabilité ont apporté de nouvelles informations sur la qualité et la performance des bétons étudiés. Nous avons constaté que 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. Avec un taux d'incorporation de 20% de sédiment, le béton B2 a montré des performances moins élevées que B1, mais avec ce taux, le béton B2 se rapproche de la performance équivalente d'un béton ordinaire.

Après une première lecture des indicateurs de durabilité des deux types bétons à base de sédiments, les résultats ont montré la faisabilité d'incorporation du sédiment comme matière première pour la confection du béton.

Afin de valider l'étude des indicateurs de durabilité, nous avons réalisé une série d'essais de performance de durabilité des bétons B1 et B2. Cette étude a fait l'objet d'une étude de durabilité vis-à-vis les cycles gel/dégel, l'attaque sulfatique externe et la réaction alcalis-granulats. La rudesse de l'environnement en période d'hiver sur le littoral de dunkerque et l'usage des blocs de béton à l'extérieur dans un milieu marin, justifiaient l'étude de ces modes de dégradation.

L'étude de durabilité face aux cycles gel/dégel a été réalisée selon la norme ASTM C 666. Durant cette étude, nous avons réalisé un suivi non destructif (acoustique linéaire et non

linéaire) après 58 et 85 cycles afin d'évaluer le comportement des bétons. Soumis à des cycles gel/dégel, le béton B1 a présenté une durabilité supérieure à celle du béton B2. Les résultats en acoustique linéaire (UPV et E_{dyn}) ont été influencés par les cycles gel/dégel pour les deux bétons. D'après les résultats, nous avons constaté une dégradation plus sévère du B2, provoquant une diminution d' E_{dyn} de l'ordre de 29% contre 16 % pour B1 et de 27% pour UPV contre 8% pour B1 à 58 cycles. L'évaluation du paramètre décalage fréquentiel a permis de confirmer les résultats obtenus en acoustique linéaire. Lors de l'investigation par la méthode acoustique non-linéaire, le béton B1 a subi une augmentation du paramètre de décalage fréquentiel αf de 397 % à 58 cycles et de 1265 % à 85 cycles par rapport à l'état initial. Par contre, à 58 cycles le béton B2 a subi une augmentation très importante, de l'ordre de 5500% par rapport à son état initial. Les mesures à 85 cycles n'ont pas été réalisées à cause de la forte dégradation subie. Cette chute de durabilité du béton B2 est directement liée au taux élevé de sédiment par rapport au B1. Cependant, l'augmentation s'est traduite par la l'augmentation du nombre de microfissures internes du béton. On peut donc déduire que la fissuration interne du béton et l'hétérogénéité de B2 sont plus importantes que celles du béton B1. D'après les investigations réalisées sur les deux types de béton, le béton B1 a résisté aux cycles gel/dégel et n'a pas perdu totalement ses propriétés en comparaison à B2. Face à ce type de dégradation, l'ajout d'un entraîneur d'air doit être considéré comme une solution afin d'améliorer les performances du béton à base du sédiment marin dans les conditions hivernales rigoureuses.

Un autre essai performantiel a fait l'objet de cette étude de durabilité, les deux bétons B1 et B2 ont subi une attaque sulfatique externe. Trois protocoles d'attaque sulfatique ont été testés dans cette étude : (immersion totale dans une solution à 5% $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$, cycles immersion/séchage à 60°C et cycles immersion/séchage à 105°), le but de ces protocoles étant d'observer l'évolution du comportement des deux bétons face à ces attaques et d'accélérer leur vieillissement. Les résultats du module d'élasticité dynamique après application des trois protocoles ont montré que le béton B1 résistait mieux à l'attaque sulfatique externe. L'analyse microstructurale de la porosité des bétons B1 et B2 a montré une augmentation de la porosité de B2 par rapport à B1. L'augmentation de la porosité a influencé directement la qualité du béton et a provoqué une diminution au niveau de la performance.

L'investigation des bétons B1 et B2 face à la réaction alcali-granulats (RAG) a été entreprise dans notre étude. L'objectif de cet essai est de savoir si le béton à base de sédiment présente une sensibilité face à l'endommagement lié aux RAG. Au cours des essais

d'expansion et de prise de masse sur les carottes B1 et B2, nous avons observé que le béton B2 a enregistré une augmentation en comparaison au béton B1. Cette augmentation est probablement associée à la formation du gel de silice propre à la RAG. L'évolution (allongement et variation de la masse) des deux bétons montre que le béton B2 est plus réactif. L'expansion et la prise de masse du béton B2 est l'une des principales conséquences de la RAG. La différence constatée entre les deux bétons peut être expliquée par l'aspect des boulettes de sédiment qui peuvent être potentiellement réactives. La solution face à l'alcali-réaction consisterait, certes à limiter l'ajout du sédiment dans le béton.

Après l'étude des performances mécaniques et l'évaluation de durabilité des deux bétons à base du sédiment, une évaluation environnementale a été réalisée afin de valider le scénario de valorisation des sédiments dans le béton. L'objectif de cette évaluation est de déterminer le relargage des métaux lourds contenus dans les deux types de béton à base de sédiment marin et évaluer si les sédiments incorporés ont un effet sur la qualité des bétons et sur l'environnement. D'après les analyses réalisées sur les deux types de béton, nous avons montré que le taux de relargage est inférieur aux seuils définis par la réglementation GEODE et la législation de stockage des déchets. Les bétons B1 et B2 ne présentent pas un effet négatif sur l'environnement. Puisque les bétons seront destinés à être immergés dans mer, des analyses de lixiviation à l'eau de mer feront l'objet de recommandations et perspectives.

Les perspectives à ce travail sont nombreuses pour une utilisation bénéfique de ce nouveau type de matériau en technique routière et fabrication du béton.

Perspectives d'utilisation des sédiments en technique routière :

La méthodologie de valorisation du sédiment en couche de fondation en laboratoire et l'application de cette dernière par la réalisation d'une route à base de sédiment a été validée. En effet, même si nous avons montré l'efficacité de traitement des sédiments en laboratoire et in situ durant cette partie, d'autres éléments doivent être étudiés afin de d'estimer le comportement mécanique et environnemental à long terme. Des nouvelles expérimentations devront être faites dans ce sens. Nous envisageons donc un suivi sur une durée deux ans du comportement mécanique et proposer des essais de durabilité sur des échantillons de la route. Quant à l'évaluation environnementale des analyses mensuelles d'eaux issues de relargage d'un plot installé au milieu de la route à base de sédiment dont l'objectif est de déterminer le flux de relargage dans le temps des ETM sur une longue période. Une modélisation des concentrations des ETM et le flux de relargage permettrait ainsi la compréhension des

phénomènes de relargage et peut être utilisée comme outil de prédiction et de prévision.

Perspectives d'utilisation des sédiments en béton :

L'étude de durabilité des bétons à base de sédiment marin a montré la faisabilité et l'efficacité de l'incorporation mais à des taux pas très élevés. Il faut toutefois souligner que des essais performantiels supplémentaires sont encore nécessaires pour une meilleure compréhension et une meilleure exploitation des résultats obtenus lors de l'étude de la durabilité. Les principales caractéristiques à déterminer sont l'observation MEB et DRX des bétons exposés à l'attaque sulfatique externe et à la RAG afin de mieux comprendre et expliquer l'origine d'expansion et de gonflement ainsi. Des nouvelles expérimentations devront être faites dans ce sens. Parmi les essais à disposition :

- la détermination de la porosité accessible à l'eau par pesée hydrostatique qui peut être préconisée de façon quasi systématique pour toute évaluation de durabilité des deux types de bétons ;
- évaluation des performances des bétons B1 et B2 vis-à-vis de la pénétration des ions chlorures puisque les bétons seront immergés à l'eau de mer, cette méthode peut déterminer le coefficient de diffusion à partir d'essais de diffusion simple ou d'essais de migration sous champ électrique.

Au niveau impact environnemental, des essais de lixiviation des bétons B1 et B2 à l'eau de mer sont recommandés, afin d'être plus proche de la réalité. Une autre perspective importante de cette étude consiste à un suivi in situ des eaux de ruissellement des blocs béton.

Il est recommandé de réaliser des études de formulation de béton à base de sédiment en laboratoire et comparer les résultats obtenus par ceux obtenus lors du carottage afin de comparer les influences de la fissuration ainsi que l'interface entre le sédiment/pâte/granulat.

Références bibliographiques

Abriak, N.E., et al., 2003: « Etude d'une grave routière à base de sable de dragage », In 2nd International symposium on contaminated sediments-Posters. p.370-373 Québec CANADA.

AFGC, 2004: « Guide de conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrage », Juillet 2004.

Agostini, F., 2006: « Inertage et valorisation des sédiments de dragage marins », Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lille, 215 p.

Agostini, F., et al., 2007: « About a possible valorisation in cementitious materials of polluted sediments after treatment », Cement and Concrete Composites, Volume 29 pages 270-278.

Al Wardany, R. et al., 2009: « Condition assessment of concrete in hydraulic structures by surface wave non-destructive testing », Materials and structures, 42, 251-261.

AMATR, Sétra 2012: « Guide méthodologique : Acceptabilité de Matériaux Alternatifs en Techniques Routière, Evaluation environnementale ».

Antonaci, P., et al., 2010: « Monitoring evolution of compressive damage in concrete with linear and nonlinear ultrasonic methods », Cement and Concrete Research 40 (2010) 1106–1113.

Babut, M., et al., 1999: « Sediment quality assessment of three rivers and streams in France: the Moselle, the Rhône and the Seine », International Symposium on Sediment Quality Assessment 1999, Berlin.

Baroghel-Bouny, V., et al., 2008: « Approche performantielle de la durabilité des bétons » La durabilité des bétons, Presses de l'école nationale des ponts et chaussées. 853pp. ISBN :978-2-85978-434-2.

Baroghel-Bouny, V., et al., 2006: « Durability indicators : relevant tools for performance-based evaluation and multi-level prediction of durability », International RILEM Workshop on Performance Based Evaluation and Indicators for concrete Durability, Madrid, 19-21 mars 2006.

Baroghel-Bouny, V., et al., 2004: « Maitise de la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures et de l'alcali-réaction », Guide de conception des bétons pour une durée de vie donné des ouvrages », Juillet 2004.

Baroghel-Bouny, V., et Gawsewitch, 2000 : « caractérisation de la structure poreuse des bétons durcis- objectifs et méthodes », Journées durabilité 8 et 9 mars 2000 Bordeaux- CETE du sud.

Baroghel-Bouny, V., et AMMOUCHE, A., 2000 : « sous-groupe microstructure », GranDuBé. (2007) Grandeurs associées à la durabilité des bétons. Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées (ENPC) Juin 2007

Beauchamp, J., 2005: « Sédiments et roches sédimentaires, cours de sédimentologie » Site : <http://www.u-picardie.fr/beauchamp/cours-sed/sed-1.htm>

Boutin, R., 2000: « Dragage et rejets en mer- les produits de type vase », Presses de l'école nationale des ponts et chaussées. 2000 ; 307p.

Brakni, S., 2008: « Première approche vers une valorisation de granulats artificiels à base de sédiments de dragage », Thèse de doctorat, Ecole des mines de Douai, 182 pages.

Brunetaud, X., 2005: « Etude de l'influence de différents paramètres et leurs interactions sur la cinétique et l'amplitude de la réaction sulfatique interne du béton », Thèse de l'école centrale de Paris, 2005, 253p.

Bonnet, 2000: « Développement de bioessais sur sédiments et applications à l'étude, en laboratoire, de la toxicité de sédiments dulçaquicoles contaminés », Thèse de doctorat. Université de Metz, UFR Sciences fondamentales et appliquées.

Boukari, Y., 2011: « Contribution à la caractérisation des bétons endommagés par la réaction alcali-silice : apports combinés de méthodes physico-chimiques et acoustiques non linéaires », Thèse de doctorat, Co-tutelle Université Lille 1 et Université de Sherbrooke, 230 pages.

Carino, N.J., 2003: « Nondestructive test methods to evaluate concrete structures », 6th CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Thessaloniki, Grèce.

Carles-Gibergues, A., et Pigeon, M., 1992: « La durabilité des bétons en ambiance hivernale rigoureuse », La durabilité des bétons : Presses de l'école nationale des Ponts et chaussées, 1992, Paris. ISBN : 2-85978-184-6.

CETMEF, 2010: Centre d'Etudes Techniques Maritimes et Fluviales « Enquête dragage 2008 analyse des données ».

Colleparidi, 2003 : « A state of the art review on delayed ettringite attack on concrete », Cement and Concrete Composites, vol. 25, p. 401-405.

Dia, M., 2013: « Traitement et valorisation de sédiments de dragage en technique routière », Thèse de Doctorat, Ecole des mines de Douai, 169 pages.

Diamond, S., 1989: « ASR-An other look at the mechanisms », 8th International conference on alkali-Aggregate Reaction, Kyoto, 83-92.

Dubois, V., 2006: « caractérisation physico chimiques et environnementale des sédiments marins. Application en technique routière », Thèse de Doctorat, Ecole des mines de Douai, 291 pages.

Dubois, V., et al., 2009: « The use of marine sediments as a pavement base material », Waste Management, Volume 29, Issue 2, 2009, Pages 774–782.

Dupain, R., et al., 2000: « Granulats, sols, ciments et bétons – Caractérisation des matériaux de génie civil par les essais en laboratoire », 2ème édition conforme aux normes européennes. Editions Educavivres. 2000 ISBN : 2-7135-2064-9.

DREAL, 2011: « Contexte réglementaire relatif à la gestion terrestre des sédiments de dragage en France », Journées nationales sur les sédiments, 8 et 9 Juin 2011 à Lille.

ENVISAN, 2009 : « Approche novatrice en matière de gestion des sédiments non immergeables dans le port de Dunkerque »

EPA : « United States Environmental Protection Agency en ligne site » : <http://epa.gov/OST/cs/aboutcs/overview.html> , October 1999.

Gagné, R., et Linger, L., 2008 : « la durabilité des bétons » Sous la direction de Olivier J.P et Vichot A., Presses de l'Ecole nationale des Ponts et chaussées, p. 304-385, 2008b.

Garnier, V., et al., 2009: « Caractérisation Non Destructive des bétons par propagation d'ondes ultrasonores », 19^{ème} Congrès Français de Mécanique.

Garnier, V., et al., 2002: « Caractérisation non destructive des bétons par propagation d'ondes ultrasonores », 19^{ème} congrès Français de mécanique.

Grégoire, P., 2004 : « Modèle conceptuel d'aide à la décision multicritère pour le choix négocié d'un scénario de dragage maritime », Thèse de Doctorat, Université d'Artois, 281 pages.

Grégoire, P., 2012 : « Stratégie de dragage et de gestion des sédiments du port de Dunkerque », Congrès éco-technologies pour le futur – Atelier sédiments –13 juin 2012.

Ghrici, M., et al., 2006 : « Mechanical and durability properties of cement mortar with Algerian natural pozzolana », J Mater Sci (2006) 41:6965–6972.

GTR, 1992: « Guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme », Editions de SETRA-LCPC, 2000, fascicule I et II, 2000, 98 p. et 102 p.

GTS, 1992: « Guide de traitement des sols à la chaux et aux liants hydrauliques », Editions de SETRA-LCPC, 2000,237p.

Guide d'utilisation du béton en site maritime, Avril 2008: centre d'études techniques maritimes et fluviales.

Gosselin, A., et al., 1999: « Protocole d'évaluation de la traitabilité des sédiments, des sols et des boues à l'aide des technologies minéralurgiques », Préparé par la : Section Eco-innovation technologique, Programme de développement et de démonstration technologiques, Direction de la Protection de l'Environnement Canada, Mars 1999.

Guyer, R.A., et Johnson, P.A., 1999: « Nonlinear mesoscopic elasticity : Evidence for a new class of materials », Physics Today, 52, 30-36.

Hamer, K., et al., 2002: « Brick production with dredged harbour sediments. An industrial-scale experiment », Waste Management, Volume 22, Issue 5, (2002) pages 521–530.

Hussein, A.I., et al., 1999: « Effects of organic matter on the physical and the physicochemical properties of an illitic soil », Applied clay science 14 (1999), pp 257-278.

Holtz, R.D., et Kovacs, W.d., 1991 : « Introduction à la géotechnique », Editions de l'Ecole Polytechnique de Montréal. ISBN 2-553-00222-3, 808p., 1991

Hornain, H., et Bournazel, J.P., 1993 : « Réaction alcali-silice : point sur les mécanismes de gonflement », Journée scientifique AFGC-DRAST sur l'alcali-réaction, ESPCI, 21 octobre 1999.

IDRA, 2011: « Journées Nationales sur la gestion terrestre des sédiments de dragage portuaires et fluviaux », Lille 7 au 9 juin 2011 ».

In vivo, 2002: « Méthodes de gestion et de réutilisation des sédiments pollués. Inventaire détail technique et financier des méthodes de curage, de traitement et des usages possibles. Logiciel d'aide à la décision pour la gestion des sédiments, 2002 », Agence de l'eau Artois Picardie, Pôle de Compétence Sites et Sols Pollués, 2002. Disponible à l'adresse : <http://www.eau-artoispicardie.fr/IMG/pdf/gestionsediments.pdf>.

JOCE, 2003: « Journal officiel des Communautés européennes, décision du conseil du 19 décembre 2002 établissant des critères et des procédures d'admission des déchets dans les décharges, conformément à l'article 16 et à l'annexe II de la directive 1999/31/CE».

Keller, G .H., 1982: « Organic matter and geotechnical properties of submarine sediments», Geomarine Letters, Volume 2: 191-198.

Kim, B.C., et Kim, J.Y., 2009: « Characterization of ultrasonic properties of concrete», Mech. Res. Commun. 36 (2009) 207–214.

Kodjo, S., 2008: « contribution à la caractérisation des bétons endommagés par des méthodes de l'acoustique non linéaire. Application à la réaction alcalis-silice », Thèse de doctorat, Université de Sherbrooke, 127 pages.

Lafhaj, Z., et al., 2007: « Polluted river sediments from the North region of France: Treatment with Novosol process and valorization in clay bricks », Construction and Building Materials, 2007, volume 148 pages 606-612.

Le grenelle de la Mer, 2011: « Les sédiments de dragage », Groupe n°11.

LIFE, 2002: « Méthodes de gestion et de réutilisation des sédiments pollués », Projet européen LIFE réalisé par In Vivo, l'Agence de l'eau Artois Picardie, le Pôle de Compétence des sites et sols pollués. Source : Agence de l'eau Artois Picardie – <http://www.eau-artoispicardie.fr>

Mac Farlane, F., 2004 : « Méthodologie de gestion des matériaux de dragage maritime – Application au Port Autonome de Dunkerque », Thèse doctorat, Université d'Artois, 244p.

Mather, B., 2000: « Sulphate attack on hydraulic-cement concrete », presented at ACI/CANMET mtg. In Barcelona, Spain.

Marchandise, P., Robbe, D., 1978 : « Qualité des eaux superficielles : l'eau, les matières en suspension, les sédiments », Réf. 2209. pp44-59.

Michel, M., 2009: « Accélération de ciment au laitier par du ciment sulfo-alumineux », Thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon, 280pp.

Mezencevova, A., et al., 2012: « Utilization of savannah harbor river sediment as the primary raw material in production of fired brick », Journal of Environmental Management 113 (2012) 128-136.

Miraoui, M., 2010: « Prétraitement et traitement des sédiments de dragage en vue d'une valorisation dans le génie civil », Thèse Doctorat, Mines de Douai, 210pp.

Mitchell, J. K., et al., 1992: « Clay soil heave caused by lime sulphate reactions », Innovations and Uses for Lime, ASTM STP1135 (1992), pp. 41–64 Philadelphia.

Moulidou, E., 2000: « Cinétiques et mécanismes de ragage des métaux lourds présents en traces dans les matrices cimentaires », Thèse Doctorat, Université d'Orléans, 219 pp.

Moradi-Marani, et Rivard, P., 2013: « Nondestructive Assessment of Alkali-Silica Reaction in Concrete: A Review », Nondestructive Testing of Materials and Structures, RILEM Bookseries Volume 6, 2013, pp 317-322.

Mustin, M., 1987: « le compost », Edition François Dubusc, ISBN 2 864 72008 6, 954 p.

Multon, S., 2004: « Evaluation expérimentale et théorique des effets mécaniques de l'alcali-réaction sur des structures modèles », AO 46, LCPC Edition, Paris.

Naar, S., 2006: « Evaluation non destructive du béton par mesures de résistivité électrique et thermographie infrarouge passive », Thèse de doctorat, Co-tutelle Université Bordeaux1 et Université de Sherbrooke, 223 pages.

Neuville, A.M., 2000: « Propriétés des bétons », Editions Eyrolles, 806pp. ISBN : 2-212-01320-5.

Neuville, A.M., et Books., 1987: « concrete technology », Edition : Longman scientific and technical, 468p.

Ostrovski, C., 2005: « Auscultations des ouvrages en béton par thermographie infrarouge active et passive », Thèse de doctorat, Co-tutelle Université Artois et Université de Sherbrooke, 171 pages.

Pavoine, A., 2003: « Evaluation du potentiel de réactivité des bétons vis-à-vis de la formation différée de l'ettringite », Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, 223 pages.

Peysson, S., 2005: « Contribution à l'étude de la stabilisation de déchets par ciment sulfo-alumineux », Thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon 262pp.

Pigeon, M., et Marchand., J., 1993: « Frost durability of dry concrete products », Rapport de recherche GCS 9306, département de génie civil, Université Laval, 196p.

Power, E.A et al., 1992: « Assessing sediment quality», SEDIMENT Toxicity Assessment, 1992:p.1-18.

Qasrawi, H.Y., 2000: « Concrete strength by combined nondestructive methods simply and reliably predicted», Cem. Concr. Res. 30 (2000) 739–746.

Riçal, K., et al., 2009: « The Behaviour of Self-Compacting Concrete Subjected to an External Sulphate Attack », Damage and Fracture Mechanics: Failure Analysis of Engineering, 2009, pp 583-590.

Samara, M., et al., 2009: « Valorization of stabilized river sediments in fired clay bricks: Factory scale experiment », Journal of Hazardous Materials, Volume 163 pages 701-710.

Sbartai, Z.M., 2005: « Caractérisation physique des bétons par radar-approche neuromimétique de l'inversion », Thèse de doctorat, Co-tutelle Université Toulouse et Université de Sherbrooke, 223 pages.

Schneider, G., 2001: « Boues de curage des cours d'eau », CE, Le Courrier de l'Environnement de l'INRA, 43, 146-147. <http://www.inra.fr/dpenv/curage.htm#1A>

Scordia, P.Y., 2008: « Caractérisation et valorisation des sédiments fluviaux pollués et traités dans les matériaux routiers » Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lille.

Sednet, 2011: « European Sediment Network », site : <http://www.sednet.org>.

Soltani, F., 2011: « Caractérisation de la pâte de ciment par méthodes ultrasonores », Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lille, 154 pages.

Sorgolzahi, M., 2009: « Evaluation of alkali-silica reaction evolution in concrete using ultrasonic tests », Thèse de doctorat, Université de Sherbrooke, 190 pages.

Thidar, A., et al., 2011: « Resistance of plain and blended cement mortars exposed to severe sulfate attacks », Construction and Building Materials, 25 (2011) 2988–2996.

Tribout, C., et al., 2011: « Use of treated dredged sediments as road base materials: environmental assessment », Waste biomass Val (2011)2: 337-346.

Tremblay, H., 1998: « Amélioration mécanique et prédiction de la compressibilité des sols fins au Québec », Thèse de la Faculté des Sciences et de Génie, Université de Laval au Québec.

Tremblay, H., et al., 2002: « Influence of the nature of organic compounds on fine stabilization with cement », Canadian Geotechnical journal, 2002. 39(3): p. 535-546.

Tran, N.T., 2009: « valorisation de sédiments marins et fluviaux en technique routière », Thèse de doctorat, Ecole des mines de Douai 189 pages.

Troalen, J.P., 1998: « Comportement et réutilisation des vases d'estuaire (Seine) traitées au limon quaternaire », Process of the 8th Congress of the International association engineering and geology environment, sep 98 Vancouver (Canada).

UNPG, 2009 : « Union nationale des producteurs de granulats », Site : <http://www.unpg.fr>.

Van den Abeele, K.E.E et al., 2000: « Nonlinear elastic wave spectroscopy (NEWS) techniques to discern material damage, PartII : Single-mode nonlinear resonance acoustic spectroscopy », Research in Nondestructive Evaluation, 12, 31-42.

Zakaria, M., 1996: « Performance and durability of concrete made with demolition waste and artificial fly ash-clay», *Waste mangement*, Volume, Issues 1-3, Pages 151-158.

Zentar, R., et al., 2009: «Effects of salts and organic matter on Atterberg limits of dredged marine sediments», *Applied Clay Science* 42, 2009, pages 391-397.

Zri, A., 2010: « Mise en place d'une nouvelle approche de formulation d'une matrice cimentaire à base de sable de dragage : application aux bétons de sables et de granulats », *Mines de Douai*, 223 pages.

Zri, A., et al., 2009: « Valorisation des sédiments dans le béton de sable à base du sable dragage », *SBEIDCO – 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria) - October 12-14, 2009.*

Normes

NF P 94-050, Septembre 1995 : « Détermination de la teneur en eau pondérale de sols. Méthode par étuvage ».

NF P 94-049-1, Février 1996 : « Sols, reconnaissance et essais : Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux – Partie 1 : Méthode de la dessiccation au four à micro-ondes.

NF EN 12879, Novembre 2000 : « Caractérisation des boues - Détermination de la perte au feu de la matière sèche ».

NF P94-068, Octobre 1998 : « Sols, reconnaissance et essais - Mesure de la capacité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux - Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux par l'essai à la tâche.

NF ISO 13320-1, Septembre 2000 : « Analyse granulométrique. Méthodes par diffraction laser. Partie 1 : principes généraux ».

NF P 94-057, Mai 1992 : « Sols, reconnaissance et essais – Analyse granulométrique des sols – Méthode par sédimentation ».

NF P 94-040, Octobre 1993 : « Sols, reconnaissance et essais, méthode simplifiée d'identification de la fraction 0/50 mm d'un matériau grenu, détermination de la granulométrie et de la valeur au bleu.

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 94-052-1, Novembre 1995 : « Sols, reconnaissance et essais : Détermination des limites d'Atterberg – Partie 1 : limite de liquidité ; Méthode du cône de pénétration.

NF P 94-093, Décembre 1993 : « Détermination des caractéristiques de compactage d'un sol: essai Proctor normal, essai Proctor modifié ».

NF P 94-078, décembre 1992 : « Indice CBR après immersion, indice CBR immédiat, indice portant immédiat, mesure sur échantillon compacté dans le moule CBR ».

NF ISO 11466, Juin 1995 : « Qualité du sol : Extraction des éléments en traces solubles dans l'eau régale.

NF EN 14227-1, Décembre 2006 : « Mélanges traités aux liants hydrauliques : spécifications, partie 13 : sol traité au liant hydraulique routier ».

NF EN 13286-41, Septembre 2003 : Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 41 : méthode d'essai pour la détermination de la résistance à la compression des mélanges traités aux liants hydrauliques.

NF EN 13286-42, Septembre 2003 : Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 42 : méthode d'essai pour la détermination de la résistance à traction indirecte des mélanges traités aux liants hydrauliques.

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.

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 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 12457- 4, Décembre 2002 : « Caractérisation des déchets - Lixiviation - Essai de conformité pour lixiviation des déchets fragmentés et des boues - Partie 4 : essai en bûchée unique avec un rapport liquide/solide de 10 l/kg et une granularité inférieure à 10 mm (sans ou avec réduction de la granularité) ».

NF EN 12390-3 : « Essais pour béton durci - Partie 3 : résistance à la compression des éprouvettes ».

NF EN 12390-13 : « Essai pour béton durci - Partie 13: Détermination du module sécant d'élasticité en compression ».

ASTM C 215-02 : « Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Frequencies of Concrete Specimens, norme ASTM ».

ASTM C 597-97 : « Standard test for pulse velocity through concrete, norme ASTM ».

ASTM C 39-02 : « Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, norme ASTM.

ASTM C 496 : « Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression, norme ASTM ».

ASTM C 666 : « Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing, norme ASTM ».

ASTM C 1012 : « Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution ».

Textes réglementaires et législatifs

Convention OSPAR 1992 : « Convention pour la protection du milieu marin de l'Atlantique du Nord-Est.

Journal Officiel des Communautés Européennes du 16 janvier 2003 : « Décision du conseil du 19 décembre 2002 établissant des critères et des procédures d'admission des déchets dans les décharges, conformément à l'article 16 et à l'annexe II de la directive 1999/31/CE ».

La circulaire du 4 juillet 2008 : relative à la procédure concernant la gestion des sédiments lors de travaux ou d'opérations impliquant des dragages ou curages maritimes et fluviaux.

L'arrêté du 25 janvier 2010 : relatif aux méthodes et critères d'évaluation de l'état écologique, de l'état chimique et du potentiel écologique des eaux de surface pris en application des articles R. 212-10, R. 212-11 et R. 212-18 du code de l'environnement.

Décret n°2002-540 du 18 avril 2002 : relatif à la classification des déchets.

23 décembre 2009 complétant l'arrêté du 9 août 2006 relatif aux niveaux à prendre en compte lors d'une analyse de rejets dans les eaux de surface ou de sédiments marins, estuariens ou extraits de cours d'eau ou canaux relevant respectivement des rubriques 2.2.3.0, 3.2.1.0 et 4.1.3.0 de la nomenclature annexée à l'article R. 214-1 du code de l'environnement.

Arrêté du 9 août 2006 : relatif aux niveaux à prendre en compte lors d'une analyse de rejets dans les eaux de surface ou de sédiments marins, estuariens ou extraits de cours d'eau ou canaux relevant respectivement des rubriques 2.2.3.0, 4.1.3.0 et 3.2.1.0 de la nomenclature annexée à l'article R. 214-1 du code de l'environnement.

Communications et publications personnelles

Articles dans revues avec comité de lecture

ACHOUR Raouf, ABRIAK Nor-Edine, ZENTAR Rachid, RIVARD Patrice, GREGOIRE Pascal, Valorisation of unpermitted sea disposal dredged Sediments as a road foundation Material, Environmental Technology, article accepté.

GREGOIRE Pascal, ABRIAK Nor-Edine, BRAKNI Samira, ACHOUR Raouf, Benthic quality evaluation of immersion zones of sediments dredging, Revue Paralia, Vol 6, pp 3.1 - 3.12, 22/04/2013. DOI: 10.5150/revue-paralia.2013.003.

GREGOIRE Pascal, ABRIAK Nor-Edine, BRAKNI Samira, ACHOUR Raouf, Evaluation de la qualité benthique des zones d'immersion des sédiments de dragage, Revue Paralia, Vol 6, pp 3.13-3.24, 22/04/2013. DOI: 10.5150/revue-paralia.2013.003.

Communications dans congrès ou conférences internationaux avec comités de sélection et actes :

ABRIAK Nor-Edine, ACHOUR Raouf, ZENTAR Rachid, Evaluation de l'acceptabilité environnementale des sédiments de dragage en tant que matériaux alternatifs : Application du guide méthodologique, Conférence Méditerranéenne Côtière et Maritime EDITION 2, TANGER (MAROC), 22 au 24 novembre 2011, N°23, pp 107-112.

ACHOUR Raouf, RIVARD Patrice, ABRIAK Nor-Edine, ZENTAR Rachid, GREGOIRE Pascal, Valorization of dredged marine sediments in concrete : Durability study, Anna Maria Workshop XIII , Holmes Beach (Floride), 7 au 9 novembre 2012.

ACHOUR Raouf, ZENTAR Rachid, ABRIAK Nor-Edine, RIVARD Patrice, KHEZAMI Issam-Eddine, BENZERZOUR Mahfoud, Valorisation des sédiments marins en couche de fondation, ECGP'11 , Villeneuve d'Ascq, France, 26-28 Juin, 2013.

ACHOUR Raouf, ABRIAK Nor-Edine, ZENTAR Rachid, RIVARD Patrice, KHEZAMI Issam-Eddine, Méthodologie de caractérisation et de valorisation des sédiments marins en génie civil, Third International Conference on Geotechnical Engineering, Hammamet (Tunisie), 21 au 23 février 2013.

KHEZAMI Issam-Eddine, ABRIAK Nor-Edine, BENZERZOUR Mahfoud, ACHOUR Raouf, Valorisation des sédiments fluviaux en génie civil : Application : Butte paysagère – Béton – Route, ECGP'11 , Villeneuve d'Ascq, France, 26-28 Juin, 2013.

KHEZAMI Issam-Eddine, ABRIAK Nor-Edine, BENZERZOUR Mahfoud, ACHOUR Raouf, Characterization and valorization of river sediments in the landscaped mounds, Third International Conference on Geotechnical Engineering, Hammamet (Tunisie), 21 au 23 février 2013.

Communications dans congrès ou conférences nationaux avec comités de sélection et actes

ACHOUR Raouf, Méthodologie de valorisation, instrumentation et suivi des ouvrages en techniques routières à base de sédiment marin, Journées Nationales Sédiments : ENVIRONORD, Lille, 05 et 06 juin 2013.

Valorisation et caractérisation de la durabilité d'un matériau routier et d'un béton à base de sédiments de dragage

Résumé

La valorisation des sédiments marins non-immérgeables du Grand Port Maritime de Dunkerque comme un nouveau granulats présente une solution alternative dans le domaine de génie civil pour une meilleure gestion. Les travaux de cette thèse se focalisent sur l'étude de valorisation de sédiment marin en technique routière (étude en laboratoire et in situ) et l'étude de durabilité de blocs béton à base de sédiment marins destinés à la protection des ouvrages portuaires. La première partie de la thèse fait l'objet de la valorisation des sédiments marins en technique routière. Cette partie est divisée en trois étapes :

La première étape a été consacrée à une caractérisation physique, minéralogique et mécanique des sédiments dragués du GPMD afin de mieux connaître le comportement général des sédiments. La deuxième étape présente la méthodologie de valorisation des sédiments par la mise au point d'une formulation en laboratoire. Une étude du comportement mécanique et environnementale a été réalisée afin d'évaluer la durabilité du matériau. La dernière étape concerne la réalisation d'un ouvrage routier à l'échelle 1 à base de sédiment à Dunkerque. La phase de suivi in situ de l'aspect mécanique et environnemental de l'ouvrage est également traitée.

La deuxième partie de la thèse fait l'objet d'une étude de durabilité de deux blocs en béton à base de sédiment marin. Cette partie est divisée en trois étapes.

La première étape est consacrée à une caractérisation non destructive et destructive des deux bétons contenant 12,5% et 20% de sédiment associé à une caractérisation microstructurale. La deuxième étape concerne l'étude de durabilité de ces bétons face à l'attaque sulfatique externe ; soumission aux cycles gel/dégel et à la réaction alcali-granulats afin d'évaluer l'effet de l'incorporation des sédiments dans les bétons et le comportement de ces derniers. Enfin, la troisième étape traite du volet impact environnemental par des essais de lixiviation sur les deux types de bétons. L'étude de durabilité des bétons à base de sédiment présentée dans cette partie peut servir de base à des futurs travaux visant à mieux comprendre l'impact d'incorporation de sédiment dans le béton (taux d'incorporation, porosité...) sur la résistance mécanique, ainsi que sur les mécanismes de dégradation.

Ce travail a été réalisé en collaboration entre Mines de Douai et l'Université de Sherbrooke (Canada) avec le soutien Grand Port Maritime de Dunkerque et de la Région.

Mots-clés : Sédiments marins, valorisation, technique routière, performance mécanique, évaluation environnementale, durabilité du béton à base de sédiment, contrôles destructifs et non destructifs.

Abstract

The valorization of non-submersible marine sediments of the Grand Port Maritime de Dunkerque GPMD as a new aggregate presents alternative solutions in the field of civil engineering for a better management. The work of this thesis focus on the valorization study of marine sediment in road engineering (laboratory and in situ) and the study of the durability of concrete blocks made with marine sediment for the protection of harbour structures. The first part of valorization non-submersible sediments in road engineering is divided into three steps:

The first step was devoted to the physical, mechanical and mineralogical characteristics of these materials, as well as their chemical composition and environmental effects, in an attempt to characterize their behavior and their potential as material in road engineering. The second step presents an experimental methodology for the development of a road foundation made from dredged fine sediment, dredged sand, lime and hydraulic binder. The last step describes the construction of an experimental road and analyses the mechanical properties of cores drilled from the road and the results of deflection tests. An environmental assessment, based on leaching tests, was also performed. The second part of the thesis focuses on a durability study of two concrete blocks with two different percentages of sediment. This part is divided into three steps:

In the first step, mechanical, physical and chemical characteristics of two types of concrete containing 12,5% and 20% of dredged marine sediments are presented and discussed. In the second step, we have examined the durability of these types of concrete with regards to alkali-aggregate reaction, sulphate attack and freezing and thawing cycles. The results of this study will serve in order to better understand the impact of the incorporation of sediments into the concrete (percentage of incorporation, porosity...) and the effect on the mechanical resistance and the degradation mechanisms.

This study is the framework of collaborative research work between Mines de Douai and the University of Sherbrooke (Canada) with the support GPMD and the Region.

Keywords: Dredged sediments, Valorisation, environmental assessment, experimental road construction, mechanical performance, durability of concrete made from marine sediment, destructive and non-destructive testing.