



THESE DE DOCTORAT

Présentée en vue d'obtenir le grade de

DOCTEUR

En

Spécialité : **Génie Civil**

Par

Abdelhafid KASMI

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

Prétraitement et traitement des sédiments fluviaux en vue d'une valorisation en technique routière

Soutenue le 05 Décembre 2014 devant le jury d'examen :

Membre du jury

Président	M. Ali ZAOUI , Professeur, Polytech Lille - France
Rapporteur	M. Patrice RIVARD , Professeur, Université de Sherbrooke - Canada
Rapporteur	M. Fabrice BERNARD , HDR, INSA de Rennes - France
Membre	Mme. Fabienne BARAUD , HDR, Université de Caen - France
Membre	M. Ali ZAOUI , Professeur, Polytech Lille - France
Directeur de thèse	M. Nor-Edine ABRIAK , Professeur, Mines de Douai - France
Encadrant de thèse	M. Mahfoud BENZERZOUR , HDR, Mines de Douai - France
Invité	M. Pascal GREGOIRE , Docteur, Port de Dunkerque - France
Invité	M. Rachid ZENTAR , Professeur, Mines de Douai - France
Invité	M. Jesus CISNEROS-AGUIRRE , Professeur, Université Las-Palmas - Espagne

Laboratoire d'accueil : Laboratoire Génie Civil et géo-Environnement - LGCgE :
Lille - Nord de France & Laboratoire Génie Civil et Environnemental - Mines Douai
Ecole Doctorale SPI 072 Lille I

Résumé

Ces travaux de recherche rentrent dans le cadre d'un projet européen Interreg nommé PRISMA «**PR**omotion **I**ntegrated **S**ediment **MA**nagement», dont le principal objectif est de développer et valider de nouvelles pistes de valorisation de sédiments de curage dans des applications Génie Civil et de trouver ainsi de nouvelles sources d'approvisionnement alternatifs aux matériaux naturels. L'objectif de ce travail de thèse porte principalement sur la valorisation de sédiments fluviaux en technique routière et d'étudier l'influence de la déshydratation des sédiments par l'ajout de polymère sur leurs propriétés physico-chimiques et environnementales. Différents sédiments du partenariat ont été caractérisés. Cette caractérisation nous a permis de dresser une fiche d'identité détaillée de ces sédiments bruts incluant les propriétés physico-chimiques géotechniques et environnementales. Cette caractérisation s'avère être primordiale avant toute démarche de valorisation pour évaluer le potentiel d'utilisation des sédiments en technique routière. La déshydratation des sédiments est un prétraitement souvent indispensable facilitant le transport et l'utilisation de ces derniers. Nous avons pour cela conditionné les sédiments étudiés par l'ajout d'adjuvant de floculation (polymère) pour une déshydratation optimisée en utilisant la méthode dite de « lit de séchage ». Le choix des polymères et leurs dosages ont été optimisés pour obtenir une siccité maximale. L'influence des polymères sur les caractéristiques intrinsèques des sédiments a été étudiée ainsi qu'une comparaison de la sédimentation et du suivi de l'évolution de la teneur en eau entre sédiments bruts et sédiments floculés. Les travaux réalisés portent essentiellement sur l'élaboration d'un matériau à base de sédiments fluviaux susceptibles d'être utilisés en couche de fondation. Les principaux résultats de la phase de caractérisation ne nous permettent pas une utilisation dans l'état des sédiments fluviaux étudiés. Ceci est principalement dû aux performances mécaniques insuffisantes. Afin d'améliorer ces performances, plusieurs traitements ont été mis aux point et expérimentés tel que les traitements aux liants hydrauliques ou l'ajout de renforts granulaires. Ces différents traitements ont été testés sur des sédiments floculés et non floculés afin d'apprécier l'impact de la déshydratation par ajout de polymère sur les matériaux formulés. Pour l'optimisation de la compacité des mélanges sédiments-ajouts granulaires, nous avons utilisé le modèle des empilements compressibles. Sur la base des résultats obtenus, nous avons réalisé une planche expérimentale dont l'objectif est de vérifier la transposabilité des formulations de couches de fondation élaborées en laboratoire à une échelle supérieure. Un suivi mécanique et environnemental par carottage et analyse des eaux de ruissèlements et de percolation a été réalisé. Les résultats obtenus en laboratoire et in situ montrent qu'il n'y a pas d'effets néfastes de la déshydratation des sédiments par ajout de polymère sur leurs caractéristiques. Les résultats obtenus de ces travaux de recherche nous confortent dans la perspective d'une utilisation des sédiments de curage fluviaux en couche de fondation.

Mots clé : *Sédiments fluviaux, valorisation, déshydratation, adjuvant de floculation, technique routière, optimisation, compacité, planche expérimentale.*

Abstract

This research is a part of an European project called PRISMA «**PR**omotion **I**ntegrated **S**ediment **M**anagement», its primary objective is to develop and validate new approaches of sludge and sediments valorization in Civil Engineering applications and to find new sources for alternative supply of natural materials. The aim of this research is primarily focused on the valorization of the fluvial sediments used in road building. Different partnership sediments have been characterized. This general characterization allowed us to build a detailed identification of raw sediments including physical-chemical, geotechnical and mineralogical properties. To evaluate the potential of sediments use in road building, this characterization is proving to be important before any valorization procedure. The dehydration of the sediments is an often indispensable pre-processing which facilitates the transport and the use of the sediments. For an optimized dehydration, the used sediments have been conditioned by the addition of polymer (auxiliary of flocculation), by using a method called “drying bas”. The choice of polymers and their dosages have been optimized to obtain the maximal dryness. The influence of the polymers on the intrinsic characteristics of the sediments has been studied and a comparison of the sedimentation and the monitoring of the water content evolution between the raw and the flocculated sediments have been realized.

This work focuses on the development of the material based on fluvial sediments used as a sub-base. The main results of the characterization phase do not allow us to use the fluvial sediments studied in their current state. This is mainly due to their inadequate mechanical performance. In order to improve it, several treatments were developed and tested, such as treatments with hydraulic binders, or by adding granular reinforcements. These treatments were tested on flocculated and non-flocculated sediments to assess the impact of dehydration by adding polymer on formulated materials. To optimize the compactness of the mixtures of sediment-granular additions, we used the model of compressible stacks. Based on the results, we conducted an experimental board in order to verify the transferability of the foundation layers formulations developed in the laboratory on a larger scale. A mechanical and environmental monitoring and analysis by coring streaming and water percolation were achieved. The results obtained in the laboratory and in-situ encourage us to the potential use of sediments of river dredging sub-base.

Keywords: *River sediments; valorization, dehydration, auxiliary of flocculation, road foundation, Optimisation, compaction, experimental board*

Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer mes sincères remerciements à Monsieur Nor-Edine ABRIAK Professeur à l'Ecole des Mines de Douai et directeur de cette thèse pour son encadrement, les précieux conseils scientifiques, ses encouragements, sa grande générosité, sa confiance et surtout son humanité.

Je remercie aussi Monsieur Mahfoud BENZARZOUR Enseignant Chercheur à l'Ecole des Mines de Douai pour m'avoir encadré et appris de nombreuses expériences, son aide sans limite, sa générosité et sa disponibilité, et surtout sa patience pendant cette thèse.

Je remercie Monsieur Patrice RIVARD, Professeur à l'université de Sherbrooke à Canada et Fabrice BERNARD, HDR à l'INSA de Rennes d'avoir bien voulu me faire l'honneur d'accepter d'être rapporteuses de ma thèse

Je tiens à exprimer mes profonds remerciements à Monsieur Ali ZAOUI, Madame Fabienne BARAUD, Monsieur. Pascal GREGOIRE, Monsieur Jesus CISNEROS-AGUIRRE et Monsieur Rachid Zentar, pour avoir accepté d'examiner mon travail.

Tous mes remerciements à toutes les personnes du département Génie Civil et Environnemental de Mines de Douai : les Professeurs Rachid Zentar, Sébastien REMOND, David BULTEEL, Enseignant chercheur Patrick PIZETTE, Frédéric BECQUART, Samira BRAKNI, Claire ALARY, Georges AOUAD, qui ont contribué, directement ou indirectement, à mon travail, en apportant aides, conseils et bonne humeur. Les techniciens Guillaume, Christophe, Michaël, Johanna et Dominique qui m'ont assisté dans la plupart des montages et essais expérimentaux que j'ai été amené à utiliser. Merci au secrétariat Jacqueline et plus particulièrement à Carole pour m'avoir aidé à relire ma thèse. Je remercie également tous les thésards et post-docs du laboratoire et notamment Hassane, Khadija, Walid, Wissem, Issam-Eddine, Raouf, Moussa, Thomas et Maxime, Raid, Zeng feng, Sadok, ainsi mes co-bureaux Kai, Coralie et Cyrile, pour leur amitié et les nombreuses conversations stimulantes que nous avons eu sur nos sujets de thèse respectifs et sur les moments sympathiques que nous avons partagé tout au long de la thèse.

Je remercie toute ma famille, mon père Omar KASMI, ma mère Khadija AKLIM, mes frères Mounir, Mohammed, Ahmed, Abderrahim, Soufiane et Ikram, qui m'ont soutenu et ont toujours cru à ma réussite.

Un grand merci à mes amis : Hicham MOUADDINE, Oussama EL-GERARI, Mohammed MOKHTARI, Amine BOUIBES, Abdelmalek EL-GHAZI pour m'avoir toujours encouragé à aller encore plus loin.

Merci à tous.

Sommaire

Résumé	3
Abstract	5
Remerciements	7
Sommaire	9
Liste des Tableaux.....	14
Liste des figures	17
Liste des abréviations	21
Liste des Symboles.....	22
Glossaire.....	23
Introduction Générale.....	27
Chapitre 1 : Etat des connaissances des sédiments de curage.....	33
1 Introduction	33
1.1 Définition et origine des sédiments	33
1.2 Constitution des sédiments	34
1.2.1 Granulométrie des sédiments	34
1.2.2 Phase eau interstitielle	35
1.2.3 Phase organique.....	35
1.3 Pollution des sédiments	36
1.3.1 Les éléments nutritifs.	36
1.3.2 Les métaux lourds.	36
1.3.3 Les polluants organiques	37
1.4 Réglementation vis-à-vis de la gestion des sédiments fluviaux	38
1.4.1 Sédiments Marins.....	38
1.4.2 Sédiments fluviaux	41
1.4.2.1 Réglementation française.....	41
1.4.2.2 Réglementation Belge	44

1.4.2.3	Réglementation aux Pays-Bas.....	46
1.4.2.4	Réglementation de la Grand Bretagne	47
1.5	Prétraitement des sédiments - Séparation des phases solides / liquides	47
1.5.1	Mécanismes physico-chimiques de coagulation et floculation.	48
1.5.1.1	La coagulation.....	48
1.5.1.2	La floculation	50
1.5.2	Déshydratation des sédiments	52
1.5.2.1	Séparation physique	52
1.5.2.2	Déshydratation mécanique.....	54
1.6	Traitement des sédiments	56
1.6.1	Traitement à la chaux	57
1.6.2	Traitement au ciment.....	59
1.6.3	Ajout de correcteur granulaire.....	60
1.7	Sédiments : Matériaux alternatifs pour le Génie Civil	60
1.7.1	Valorisation en technique routière	61
1.7.1.1	Structure de la chaussée	62
1.7.1.2	Classification des sédiments fluviaux selon le guide technique GTR	63
1.7.1.3	Critères pour l'utilisation des matériaux en couche d'assise de chaussée ..	64
1.7.1.4	Réglementation des sédiments vis-à-vis de l'application en technique routière - Caractérisation environnementale.	67
1.7.2	Valorisation des sédiments en matériaux de construction	71
1.7.3	Valorisation des sédiments en éco-modélé paysager	72
1.8	Unité mobile	74
1.9	Conclusion	76
Chapitre 2 Caractérisation des sédiments fluviaux		79

2	Introduction	79
2.1	Propriétés physiques des sédiments.....	80
2.1.1	Teneur en eau	80
2.1.2	Analyse granulométrique	81
2.1.3	Limites d'Atterberg	84
2.1.4	Valeur au bleu de méthylène.....	84
2.1.5	Teneur en matières organique & Perte au feu	85
2.1.6	Masse volumique des particules solides (ρ_s).....	86
2.2	Caractérisation de compactage	87
2.2.1	Essai Proctor & Indice de Portance Immédiat (IPI).....	87
2.3	Analyse minéralogique et chimique	90
2.3.1	Teneur en carbone total	90
2.3.2	Analyse par Fluorescence des rayons X (FRX)	91
2.3.3	Analyse par diffraction de rayons X.....	92
2.4	Classification des sédiments fluviaux.....	94
2.5	Analyse environnementale	96
2.6	Conclusion	98
Chapitre 3 : Prétraitement et Séparation des phases solides –liquides des sédiments		103
3	Introduction	103
3.1	Sédimentation du matériau	103
3.1.1	Courbe de sédimentation	103
3.1.2	Etude expérimentale sur les sédiments fluviaux: méthode de Kynch.....	105
3.1.3	Sédimentation libre des sédiments fluviaux.....	105
3.2	Etude de la floculation des sédiments.....	107
3.2.1	Protocole d'essai	107

3.2.2	Essai de sédimentation sur les sédiments floclés	110
3.3	Déshydratation des sédiments par l'ajout de polymères	112
3.4	Carte d'identité des sédiments floclés	115
3.4.1	Analyse granulométrique du sédiment floclés	115
3.4.2	Caractérisation physique	118
3.4.3	Caractérisation de compactage.....	120
3.4.4	Analyse minéralogique.....	121
3.4.5	Analyse environnementale	124
3.5	Conclusion	126
Chapitre 4 : Traitement et Valorisation des sédiments		131
4	Introduction	131
4.1	Préparation des matériaux	133
4.2	Caractérisation des liants	133
4.2.1	La chaux	133
4.2.2	Liant hydraulique	134
4.3	Comportement des sédiments traités à la chaux et au LH- ROLAC 645.....	135
4.3.1	Performance mécanique à court terme	135
4.3.2	Confection des éprouvettes	137
4.3.3	Résistance à la compression.....	138
4.3.4	Résistance à la traction indirecte & module d'élasticité	139
4.3.5	Aptitude au traitement.....	141
4.3.6	Performances mécaniques des matériaux traités.....	142
4.4	Apport d'un correcteur granulaire	144
4.4.1	Compacité des mélanges : Modèle d'Empilement Compressible (MEC).....	145
4.4.2	Caractérisation des matériaux élaborés	148
4.5	Comportement mécanique des formulations à base des sédiments étudiés.....	151

4.5.1	Comportement Proctor-IPI(%).....	151
4.6	Performances mécaniques des formulations.....	153
4.6.1	Résistance à la compression.....	153
4.6.2	Résistance à la traction.....	155
4.6.3	Aptitude au traitement.....	157
4.6.4	Classification selon les performances mécaniques	157
4.7	Etude environnementale sur les formulations	160
4.8	Réalisation d'une planche expérimentale	163
4.8.1	Description et mise en place de la planche expérimentale.....	163
4.8.1.1	Préparation des sédiments.....	165
4.8.2	Suivi mécanique de la planche expérimentale	167
4.8.3	Suivi environnemental de la planche expérimentale.....	168
4.9	Conclusion.....	170
	Conclusions générales & Perspectives.....	175
	Références Bibliographiques.....	183
	Normes Utilisées	192
	Communication & Publication.....	194
	Annexes.....	199

Liste des Tableaux

Tableau 1.1 : Classe granulométrique d'un matériau.....	34
Tableau 1.2 : Source de pollution des métaux présents dans les sédiments de dragage	37
Tableau 1.3 : Niveaux relatifs aux composés traces (en mg/kg de sédiments secs analysés sur la fraction inférieure à 2 mm) (INERIS, 2009).	40
Tableau 1.4 : Niveaux relatifs aux composés traces PCB (en mg/kg de sédiments secs) (INERIS,2009).....	41
Tableau 1.5 : Seuils des métaux lourds et polluants organiques (mg/kg matériaux secs) proposés par différents pays.	41
Tableau 1.6 : Données générales du dragage continental par maitres d'ouvrage (LHER.J et al, 2007)	42
Tableau 1.7 : Conditions pour lesquelles les travaux de dragage de canaux et de cours d'eau sont soumis au régime de déclaration ou d'autorisation (A : autorisation, D : déclaration) (INERIS, 2009).....	42
Tableau 1.8 : Niveaux relatifs aux éléments métalliques et aux composés traces PCB et HAP (en mg/kg de sédiments secs) (INERIS, 2009)	42
Tableau 1.9 : TMA et TS, des éléments et composés organiques et inorganiques en mg/kg deMS.....	44
Tableau 1.10 : Valeurs limites de quelques éléments (métaux lourds et organique) pour la libre utilisation des terres excavées.	45
Tableau 1.11 : Valeurs limites sur lixiviat des métaux lourds et quelques éléments chimiques pour l'utilisation des terres excavées en construction.....	46
Tableau 1.12 : Teneurs maximales admissibles de quelques éléments pour la réutilisation à terre des sédiments de dragage (en mg/ kg de matières sèches).	47
Tableau 1.13 : Coefficients empiriques en fonction de la nature du liant utilisé [Norme NF P98 113].	66
Tableau 1.14 : Critères de jugement pour évaluer l'aptitude d'un sol à être traité à la chaux et/ou aux liants hydrauliques (NF P 14-100).....	66
Tableau 1.15 : Valeurs limites à ne pas dépasser en lixiviation et en contenu totale pour être candidat et pour justifier leur utilisation en technique routière.....	69
Tableau 1.16 : Valeurs limites en percolation permettant de justifier certaines utilisations visées par le présent guide.....	70
Tableau 2.1 : Etat hydrique initial des sédiments étudiés	81
Tableau 2.2 : Distribution granulométrique des sédiments fluviaux.....	83
Tableau 2.3 : Limites d'Atterberg des sédiments étudiés.	84
Tableau 2.4 : Valeur des VBS pour les sédiments Bruts.	84
Tableau 2.5 : Masse volumique des grains solides des sédiments étudiés bruts et calcinés à 450°C.	87
Tableau 2.6 : Résultats de l'essai Proctor-IPI sur les sédiments bruts	89
Tableau 2.7 : Composition élémentaire des sédiments fluviaux.....	92
Tableau 2.8 : Synthèse des caractéristiques des sediments fluviaux.....	94
Tableau 2.9 : Etude comparative des caractéristiques physiques des différentes sédiments.....	96
Tableau 2.10 : Analyses des éluâts de sédiments bruts et valeurs limites de lixiviation pour être candidat à une utilisation en technique routière (Guide Sétra, 2012).....	97

Tableau 2.11 : Analyse chimique sur le contenu total des sédiments bruts (mg/Kg de MS).....	98
Tableau 3.1 : Hauteurs et concentration initiales des sédiments étudiés.....	105
Tableau 3.2 : Caractérisation de sédimentation libre des sédiments pour des concentrations à 300 g/l et lors de la sortie de drague.....	107
Tableau 3.3 : Comparaison entre les concentrations mesurées et calculées.....	107
Tableau 3.4 : Dosage optimale de différents polymères pour les sédiments étudiés avec une concentration solide lors de dragage.....	109
Tableau 3.5 : Caractéristiques de sédimentation des sédiments floculés.....	112
Tableau 3.6 : Taux des métaux lourds dans l'eau filtrée par les sédiments étudiés.....	114
Tableau 3.7 : Distribution granulométrique : granulométrie Laser de sédiments d'Angleterre déshydratés par l'ajout de polymères.....	117
Tableau 3.8 : Distribution granulométrique : granulométrie Laser de sédiments de la Belgique déshydratés par l'ajout de polymère.....	118
Tableau 3.9 : Caractérisations des sédiments déshydratés par l'ajout de polymères.....	119
Tableau 3.10 : Résultats de l'essai Proctor – IPI sur les sédiments déshydratés par l'ajout de polymères et les sédiments bruts.....	121
Tableau 3.11 : Composition élémentaire des sédiments deshydratés par l'ajout de polymères.....	123
Tableau 3.12 : Analyses des éluât de sédiments de l'Angleterre et de la Belgique déshydratés par l'ajout de polymères.....	125
Tableau 3.13 : Analyses chimiques sur le contenu total des sédiments déshydratés par l'ajout de polymères (mg/Kg de MS).....	125
Tableau 4.1 : Caractéristiques du LHR ROLAC 645.....	135
Tableau 4.2 : Proportion de la chaux et du liant hydraulique Rolac 645.....	136
Tableau 4.3 : Synthèse des résultats des sédiments étudiés.....	137
Tableau 4.4 : Aptitude au traitement- Gonflement volumique Gv(%) et résistances diamétrales Rtb (MPa) pour les formulations élaborées.....	142
Tableau 4.5 : Compacité des mélanges binaires du sédiment de l'Angleterre et du sable Boulonnais.....	146
Tableau 4.6 : Compacité des mélanges binaires du sédiment de la Belgique et du sable Boulonnais.....	147
Tableau 4.7 : Compositions des formulations étudiées.....	149
Tableau 4.8 : Caractérisation de VBS et MO des formulations.....	150
Tableau 4.9 : Synthèse des caractéristiques optimales de l'essai Proctor Modifié et IPI pour les formulations issues de sédiments bruts et déshydratés par l'ajout de polymères (Belgique-Angleterre).....	153
Tableau 4.10 : Aptitude au traitement des formulations proposées.....	157
Tableau 4.11 : Valeur de coefficient empirique calculée à partir de résistance en traction et module d'élasticité à 90 j et 360j.....	160
Tableau 4.12 : Essai de lixiviation sur l'échantillon broyé des formulations à base des sédiments de l'Angleterre.....	161
Tableau 4.13 : Essai de lixiviation sur l'échantillon broyé des formulations à base des sédiments de la Belgique.....	162
Tableau 4.14 : les concentrations des métaux lourds dans l'eau de ruissellement et l'eau de Percolation.....	169

Tableau 4.15 : Résultats des analyses des lixiviations sur le matériau carotté à 90 jours..... 170

Liste des figures

Figure 1.1 : l'accumulation des sédiments (SAMARA .M, 2007).....	34
Figure 1.2 : Protocole établi par le groupe de travail « dangerosité des sédiments » du MEEDDM (octobre 2009) pour la mesure du paramètre H14 sur les sédiments	43
Figure 1.3 : Variation de l'énergie d'interaction conditionnant la déstabilisation de suspensions colloïdales($E =$ Energie potentielle; $E_a =$ Forces d'attraction ; $E_r =$ Forces de répulsion).....	49
Figure 1.4 : Double couche d'une particule colloïdale.	50
Figure 1.5 : Présentation schématique du phénomène de pontage (GREGORY. J, 1988).....	51
Figure 1.6 : Exemple des bassins de séchages (ENVISAN, 2013).	53
Figure 1.7 : Géo-tube situé à la ville Moordrecht (Pays-Bas) (P. PRISMA, 2014)	53
Figure 1.8 : Schéma d'un Filtre à bande (COLIN.D, 2003)	54
Figure 1.9 : fonctionnement d'un filtre à plateaux (MIRAOUI.M, 2010).	55
Figure 1.10 : Principe de fonctionnement d'une centrifugeuse.....	55
Figure 1.11 : La machine NEMEAU® 450 (MANCIOPPI.L et al, 2012).	56
Figure 1.12 : Modification immédiate du comportement d'un sol argileux humide provoquée par l'introduction de la chaux (GTS-LCPC-SETRA, 2000)	57
Figure 1.13 : Représentation des actions de la chaux sur les caractéristiques de compactage après l'ajout de la chaux. (GTS-LCPC-SETRA, 2000).....	58
Figure 1.14 : Relation entre la formation des hydrates CAH et CSH et résistance à la compression simple d'un sol traité (XING.H et al, 2009).....	58
Figure 1.15 : Répartition des différents types des granulats en France (UNICEM, 2009).....	61
Figure 1.16 : Route à base des sédiments marins de PGMD.....	62
Figure 1.17 : Chaussée type.	63
Figure 1.18 : Classification des matériaux (GTR, 1992).	64
Figure 1.19 : Critère de l'IPI pour la différente couche de la chaussée [norme NF P 98 115].....	65
Figure 1.20 : Classification de matériaux traités aux liants hydrauliques (Norme NF P 98 113).	65
Figure 1.21 : Processus d'évaluation environnementale pour une valorisation en technique routière (ABRIAK.N-E et al, 2011).	67
Figure 1.22 : Diagramme de caractérisation environnementale (ACHOUR.R, 2013).....	68
Figure 1.23 : Processus de fabrication de briques à base de sédiments (a) (MEZENCEVOVA.A et al, 2012) et (b) (SAMARA .M, 2007).....	71
Figure 1.24 : Bloc de Béton a base de sédiments marins (ACHOUR.R, 2013).	72
Figure 1.25 : Fabrication de béton à base des sédiments fluviaux (NEO-ECO, 2012).	72
Figure 1.26 : Butte paysagère à base de sédiments marins de GPMD (ACHOUR.R, 2013).	72
Figure 1.27 : Processeur de valorisation des sédiments fluviaux de la Belgique en digue (Région d'Anvers) (VAN ZELE.S et al , 2014) (PRISMA, 2014).	73
Figure 1.28 : Roselière à base de sédiments fluviaux en Angleterre (Coulet.W, 2014).....	74
Figure 1.29 : Conception de l'unité mobile.....	75

Figure 1.30 : Exemple d'une unité mobile de caractérisation des sédiments à terre et sur voie d'eau.....	75
Figure 2.1 : Sites de prélèvement (a) sédiments de l'Angleterre, (b) sédiments de la Belgique.	80
Figure 2.2 : Courbe granulométrique par granulométrie laser des sédiments fluviaux étudiés.....	82
Figure 2.3 : Diagramme triangulaire de Taylor de classification des sols fins.....	83
Figure 2.4 : Classification des sols en fonction VBS.	85
Figure 2.5 : Perte au feu des sédiments fluviaux bruts en fonction de la température pendant 3h.....	86
Figure 2.6 : Pycnomètre à hélium « MICROMERTICS-ACCUPYC1330 ».....	86
Figure 2.7 : Appareil Proctor – IPI(%).....	88
Figure 2.8 : Courbe Proctor – IPI des sédiments bruts de l'Angleterre.....	89
Figure 2.9 : Courbe Proctor – IPI des sédiments bruts de la Belgique.....	89
Figure 2.10 : Analyses thermogravimétrique sur sédiment d'Angleterre et de la Belgique.....	91
Figure 2.11 : Diffractogrammes des rayons X des sédiments fluviaux de l'Angleterre.....	93
Figure 2.12 : Diffractogrammes des rayons X des sédiments fluviaux de la Belgique.....	93
Figure 2.13 : Classification des sédiments Bruts selon GTR.1992.	95
Figure 3.1 : Courbe générale de sédimentation.....	104
Figure 3.2 : Colonnes des sédimentations des sédiments de la Belgique (a) et de l'Angleterre (b) dont la concentration est à 300 g/l.....	106
Figure 3.3 : Tassement des sédiments étudiés à différentes concentrations au bout de 24h.	106
Figure 3.4 : Les types des polymères utilisés.....	108
Figure 3.5 : Exemple d'essai d'optimisation de dosage de polymères cationique EM 340 CT pour les sédiments de l'Angleterre.	109
Figure 3.6 : Evolution des tassements de sédiments de l'Angleterre floculés avec différents types de polymères.	110
Figure 3.7 : Evolution des tassements de sédiments de la Belgique floculés avec différents types de polymères.	111
Figure 3.8 : Colonnes des sédimentations de sédiments de la Belgique Bruts et floculés.	111
Figure 3.9 : Lit de séchage utilisé.	112
Figure 3.10 : Evolutions de la teneur en eau en fonction du temps pour les sédiments de l'Angleterre bruts et déshydratés par l'ajout de polymère.....	113
Figure 3.11 : Evolutions de la teneur en eau en fonction du temps pour les sédiments de la Belgique bruts et déshydratés par l'ajout de polymère.....	113
Figure 3.12 : Aspect visuel du sédiment brut et sédiment floculé par l'ajout de polymères.....	115
Figure 3.13 : Courbes comparatives du sédiment déshydraté par l'ajout de polymères et sédiment Brut de l'Angleterre.	117
Figure 3.14 : Courbes comparatives du sédiment déshydraté par l'ajout de polymère et sédiment Brut de la Belgique.	118
Figure 3.15 : Courbe Proctor modifié–IPI du sédiment de l'Angleterre déshydraté par l'ajout de polymères. .	120
Figure 3.16 : Courbe Proctor modifié–IPI du sédiment de la Belgique déshydraté par l'ajout de polymères. ..	120
Figure 3.17 : Analyses thermogravimétriques sur sédiments déshydratés par l'ajout de polymères d'Angleterre et de la Belgique.....	122

Figure 3.18 : Diffractogrammes des rayons X des sédiments fluviaux deshydratés par l'ajout de polymères.	124
Figure 4.1 : Organigramme de la méthodologie de valorisation des sédiments fluviaux.....	132
Figure 4.2 : Appareillage utilisé pour le concassage des sédiments.....	133
Figure 4.3 : Evolution du pH en fonction du dosage de chaux.	134
Figure 4.4 : Distributions granulométriques de la chaux et LH-Rolac645.....	135
Figure 4.5 : Courbe de compactage et d'IPI(%) des sédiments de l'Angleterre (bruts, déshydratés par polymères) traités par l'ajout de la chaux et du ciment.	136
Figure 4.6 : Courbe de compactage et d'IPI(%) des sédiments de la Belgique (bruts, déshydratés par polymères) traités par l'ajout de la chaux et du ciment.	136
Figure 4.7 : Dispositif de mesure résistance en compression.....	138
Figure 4.8 : Evolution des résistances à la compression des matériaux élaborés en fonction du temps.....	139
Figure 4.9 : Dispositif de mesure résistance en traction (Rt) et module d'élasticité(E).	140
Figure 4.10 : Evolution des résistances à la traction des matériaux élaborés en fonction du temps.	140
Figure 4.11 : Evolution des modules d'élasticité des matériaux élaborés en fonction du temps.	141
Figure 4.12 : Aptitude au traitement- Gonflement volumique Gv(%) et résistances diamétrales Rtb (MPa) pour les formulations élaborées.....	142
Figure 4.13 : Classification des matériaux élaborés à 60 jours de cure.....	143
Figure 4.14 : Classification des matériaux élaborés à 90 jours de cure.....	143
Figure 4.15 : Distributions granulométriques du sable Boulonnais.	145
Figure 4.16 : Compacité des mélanges Sédiment de l'Angleterre et du Sable Boulonnais.	147
Figure 4.17 : Compacité des mélanges Sédiment de la Belgique et du Sable Boulonnais.	148
Figure 4.18 : Distribution granulométrique des formulations proposées à base de sédiments de l'Angleterre..	149
Figure 4.19 : Distribution granulométrique des formulations proposées à base de sédiments de Belgique.....	150
Figure 4.20 : Courbe de Proctor de matériaux formulés à base de sédiments l'Angleterre (Bruts et déshydratés par l'ajout de polymères).	151
Figure 4.21 : Courbe d'IPI(%) de matériaux formulés à base de sédiments l'Angleterre (Bruts et déshydratés par l'ajout de polymères).	151
Figure 4.22 : Courbe de Proctor de matériaux formulés à base de sédiments de la Belgique (Bruts et déshydratés par l'ajout de polymères).	152
Figure 4.23 : Courbe d'IPI(%) de matériaux formulés à base de sédiments l'Angleterre (Bruts et déshydratés par l'ajout de polymères).	152
Figure 4.24 : Evolution de la résistance à la compression des formulations (2% Cao+ 6% Rolac 645) à base des sédiments de l'Angleterre (Bruts et déshydratés par l'ajout de polymères).....	154
Figure 4.25 : Evolution de la résistance à la compression des formulations à base des sédiments de la Belgique (0,5% Cao+ 6% Rolac 645) (Bruts et déshydratés par l'ajout de polymères).....	154
Figure 4.26 : Résistance à la compression uniaxiale à 90 jours en fonction de la compacité des formulations réalisées.....	155
Figure 4.27 : Evolution des résistances à la traction des formulations étudiées à base de sédiments de l'Angleterre en fonction du temps.....	156

Figure 4.28 : Evolution des résistances à la traction des formulations étudiées à base de sédiments de la Belgique en fonction du temps.....	156
Figure 4.29 : Classification des formulations à base de sédiment de l'Angleterre (Brut et déshydratés par l'ajout de polymères) mesurées à 90j et 60j.	158
Figure 4.30 : Classification des formulations à base de sédiment de la Belgique (Brut et déshydratés par l'ajout de polymères) mesurées à 60j et 90j.	158
Figure 4.31 : Classification des formulations proposées mesurées à 360j.	159
Figure 4.32 : Plaque expérimentale.	163
Figure 4.33 : Préparation de la plaque forme de la plaque expérimentale.	164
Figure 4.34 : Procédé de réalisation de la plaque expérimentale à base des sédiments de la Belgique.....	166
Figure 4.35 : Plaque expérimentale avec le dispositif pour récupérer de l'eau de ruissellement et de percolation.	167
Figure 4.36 : Carottage à 90j pour la plaque expérimentale.....	167
Figure 4.37 : Classification des carottes à base de sédiments de la Belgique à 90jours.....	168

Liste des abréviations

AGW : l'Arrêté du Gouvernement Wallon (Belgique)

AGF : l'Arrêté du Gouvernement Flamande

ATG : Analyse thermogravimétrique

BTP : Bâtiment et travaux publics

CET : Catalogue Européen des Déchets

CO : Carbone organique

COT : Carbone organique total

DRX : Diffraction de Rayons X

FX : Florescence X

GEODE : Groupe d'Études et d'Observation sur le Dragage et l'Environnement

GTR : Guide des Terrassements Routiers

GTS : Guide Traitement des sols

IPI : Indice Portant Immédiat

MEC : Modèle d'Empilement Compressible

MS : Matière sèche

OSPAR : Convention d'OSlo et de PARis

SETRA : Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes

TBT : Tributylétain

VNF : Voies navigables de France

Liste des Symboles

Al : Aluminium
As : Arsenic
Ba : Baryum
C₃A : Aluminate tricalcique (3 CaO Al₂O₃)
C₂S : Aluminate tricalcique (3 CaO Al₂O₃)
C₃S : Silicate tricalcique (3 CaO SiO₂)
C₄AF : Aluminoferrite tétracalcique (4 CaO Al₂O₃ Fe₂O₃)
C : Carbone
Ca : Calcium
CaO : Chaux vive
Cd : Cadmium
Cl : Chlore
Cr : Chrome
Cu : Cuivre
Fe : Fer
Hg : Mercure
K : Potassium
Mg : Magnésium
Mn : Manganèse
Mo : Molybdène
Na : Sodium
Na₂SO₄ : Sulfate de sodium
Ni : Nickel
O : Oxygène
P : Phosphore
Pb : Plomb
S : Soufre

Glossaire

Boue : Mélange de particules fines de limons et d'argiles et de l'eau.

Compacité : Taux d'occupation des grains d'un matériau dans un volume.

Curage : Opération qui consiste à enlever des sédiments fluviaux au fond de fleuve.

Conditionnement des sédiments : consiste en un prétraitement spécifique qui permet le bon fonctionnement des appareils de déshydratation mécanique).

Dragage : Opération qui consiste à enlever des sédiments marins au fond de la mer.

Drainage : Évacuation de l'eau d'un sol par écoulement gravitationnel.

Évaporation : Passage progressif de l'état liquide à l'état gazeux.

Filtration : Procédé consiste à retenir les particules en suspension dans l'eau.

Séchage : Passage de l'état liquide à l'état solide, rendre un matériau humide sec.

Sédiments floculés : Sédiments déshydratés par l'ajout d'un adjuvant de floculation

Prétraitement : Traitement préalable que l'on fait subir aux sédiments avant traitement.

Polymère ou macromolécule : Grande molécule constituée d'unités fondamentales appelées monomères. (Monomères est un composé constitué de molécule simples pouvant réagir avec d'autre monomères pour former un polymère).

Sédiment de l'Angleterre : Sédiments fluviaux proviennent de la ville de Norwich et dragués de la rivière du Rive bure.

Sédiment de la Belgique : Sédiments fluviaux proviennent de la ville de Durme et dragués de la rivière Durme.

Traitement : Protocole essai chimique ou thermique afin de comprendre un effet ou changer un comportement d'un matériau.

Introduction Générale

Introduction Générale

La navigation fluviale, est un mode de transport européen par excellence. Elle contribue au développement de leur économie par ce mode de transport de marchandises et des personnes. Le réseau des voies navigables en Europe est estimé à environ 20 000 km, et près de 8500 km en France. La France possède le plus long réseau de voies navigables d'Europe, formé autour de cinq bassins fluviaux à grand gabarit reliés entre eux : le Rhin, la Moselle, le Rhône, le Nord – Pas-de-Calais et le bassin de la Seine (MARSAULT. S, 2011). Le transport fluvial est considéré comme le transport le plus moderne et le plus adapté à tous types de produit. Il permet d'acheminer des tonnes de produits pour un faible coût, en toute sécurité et dans le respect de l'environnement. Ce mode de transport est fiable, économique et écologique. Afin de promouvoir le transport fluvial européen et en adéquation avec les directives cadres du Grenelle de l'Environnement, les autorités française envisage de mettre en service le Canal Seine-Nord Europe en 2016, afin d'assurer la connexion du bassin de la Seine au réseau fluvial européen.

L'accumulation des sédiments au fond des cours d'eaux, les canaux, les rivières et les fleuves est un phénomène naturel, qui peut entraver, voire empêcher la circulation des navires et perturber l'équilibre physico-chimique des masses d'eaux. Le curage est une opération indispensable pour maintenir ou restituer le tirant d'eau minimal afin de faciliter la circulation de la navigation, la restauration du milieu naturel et la prévention des risques d'inondation. Les activités industrielles et anthropiques apportent une multitude de polluants inorganiques (métaux lourds) et organiques (hydrocarbures, HAP, PCB....) dans les sédiments.

La quantité des sédiments dragués chaque année est considérable : environ de 600 Mm³ dans le monde (BOUTIN.R, 1999), 250Mm³ dans l'Europe (SEDNET, 2011), 50Mm³ en France (ALZIEU.C et al, 1999) dont plus de 6Mm³ sont des sédiments fluviaux (TRAN.N-T, 2009). La gestion des sédiments de curage représente un défi important en raison de la quantité énorme de sédiments dragués et à l'évolution continue de la législation nationale et européenne qui sont de plus en plus exigeants pour la protection de l'environnement et la santé humaine.

La déshydratation des sédiments permet d'obtenir un matériau pelletable en réduisant son poids, son coût de transport, ainsi qu'une teneur en eau acceptable pour leurs valorisations. Plusieurs techniques de déshydratation peuvent être mises en œuvre : par la voie de séchage

naturel, et par la voie mécanique par l'ajout de réactifs chimiques (Adjuvant de floculation / polymère) ou thermique, avec des couts d'exploitations différents et souvent élevés.

En France, environ 400 Millions de tonnes de granulats sont consommés dans le domaine du génie civil chaque année (UNICEM, 2009). L'utilisation des sédiments dans le domaine de la construction, peut présenter une nouvelle source d'approvisionnement en granulats. Néanmoins, les sédiments, après curage, sont considérés aujourd'hui comme déchets (TRAN NGOC . T, 2009) (Décret N°2002-540 du 18 Avril 2002), et la majorité de ces sédiments possèdent des propriétés mécaniques souvent insuffisantes pour une utilisation dans l'état dans les domaines du Génie Civil.

La valorisation des sédiments présente donc, malgré les difficultés rencontrées, un avantage socio-économique et environnemental certain. Plusieurs filières de valorisation ont été explorées : en Technique routière (BOUTOUIL .M, 1998; COLIN.D, 2003; DUBOIS.V, 2006; SCORDIA .P, 2008; MIRAOUIM, 2010; TRAN NGOC . T, 2009; DIA .M, 2013; ACHOUR.R, 2013; MAHERZI.W, 2013) (BENZERZOUR et al, 2013), en Granulats (BRAKNI .S, 2008) (ZRIA, 2010), en Béton (ACHOUR.R, 2013), et en Brique (SAMARA .M, 2007; LAFHAJA.Z et al 2007; ALLAL.L et al, 2011).

Ce travail entre dans le cadre d'un projet européen interreg nommé PRISMA « *PRomotion Integrated Sediment MANagement* ». Il a pour objectif d'améliorer les processus de déshydratation des sédiments et de proposer une réutilisation économiquement et écologiquement responsable des sédiments fluviaux en Génie Civil. Les pays partenaires de ce projet sont la Belgique, les Pays-Bas, l'Angleterre et la France.

L'étude réalisée dans le cadre de cette thèse menée au laboratoire Génie Civil et Environnemental de l'Ecole des Mines de Douai porte principalement sur la valorisation des sédiments fluviaux provenant de la Belgique et de l'Angleterre en technique routière. L'objectif de ce travail consiste à explorer l'effet de la déshydratation des sédiments par la méthode de « lit de séchages » avec et sans conditionnement par l'ajout de flocculants et d'améliorer leurs caractéristiques mécaniques et environnementales pour une utilisation en couche de fondation. Les travaux réalisés et présentés dans ce manuscrit se déclinent en quatre chapitres.

Le **premier chapitre** présente une étude bibliographique sur la gestion des sédiments fluviaux issus des opérations de curage : origines, compositions, pollutions, les expérimentations majeures de valorisation existantes et les principales réglementations

régissant leurs gestions à l'échelle nationale et internationale. Par la suite, nous avons abordé les principes et mécanismes régissant le processus de coagulation-floculation. Nous avons également présenté dans ce chapitre les différentes méthodes de déshydratation susceptibles de réduire la teneur en eau et les techniques les plus souvent mises en œuvre pour leur conditionnement. Ce conditionnement consiste à ajouter des réactifs chimiques afin de rendre exploitable l'équipement de déshydratation. Enfin, nous nous sommes intéressés au traitement des sols, considérés comme proche du comportement des sédiments, par liant hydraulique et les conditions requises pour leurs utilisations en technique routière.

Dans le **chapitre deux**, une étude de caractérisation globale des propriétés intrinsèques des sédiments est présentée. Cette caractérisation concerne les sédiments fluviaux provenant de sites expérimentaux anglais et belges. Ainsi, une fiche d'identité comprend les caractéristiques physico-chimiques, géotechniques, minéralogique et le degré de pollution de ces sédiments a été établi. Ces caractéristiques nous ont permis d'évaluer le potentiel d'utilisation des sédiments étudiés en couche de fondation.

Le **troisième chapitre** est dédié à la problématique de séparation des phases solides-liquides et à la déshydratation des sédiments. Nous présentons dans ce chapitre le protocole défini pour la sélection et l'optimisation du floculant et son dosage. Un suivi de la teneur en eau par la méthode de « lit de séchage », et de la qualité des eaux percolées avec ou sans polymères est présenté. Enfin, les caractéristiques physico-chimiques, géotechniques et environnementales des sédiments déshydratés par ajouts de polymères sont étudiés et comparés avec les résultats des sédiments déshydratés sans ajouts de polymères.

Dans le **chapitre quatre**, nous nous intéressons principalement à la valorisation des sédiments étudiés (avec ou sans polymère) en technique routière. Dans un premier temps, des traitements à la chaux et aux liants hydrauliques (LH645Rolac + Chaux) ont été appliqués. Nous avons par la suite évalué l'effet de la déshydratation des sédiments par ajout de polymères sur ces traitements en vue d'une application en couche de fondation. Afin d'améliorer les performances mécaniques des mélanges élaborés avec ou sans polymères, des renforts granulaires (sable Boulonnais) ont été nécessaires. Les proportions des constituants (granulats et sédiments) ont été optimisées par le Modèle d'Empilement Compressible (MEC) et ceci afin de déterminer la compacité maximale. Nous avons par la suite étudié le

comportement mécanique et environnemental des formulations élaborées. Enfin, pour valider notre démarche de valorisation, nous présentons dans ce chapitre les résultats obtenus de la réalisation d'une planche expérimentale à base d'une formulation validée en laboratoire. L'objectif de cette planche expérimentale est de valider le comportement mécanique et environnemental *in situ*, et de faire un suivi de la mobilité des éléments chimiques à travers l'analyse de l'eau de percolation et de l'eau de ruissellement.

Chapitre 1

Etat des connaissances : Les sédiments de curage

Chapitre 1 : Etat des connaissances des sédiments de curage

1 Introduction

1.1 Définition et origine des sédiments

Les sédiments appelés vases ou boues, sont définis dans le dictionnaire de géologie (FOUCAULT.A & RAOULT.JF, 1980) comme suit : «*Un ensemble constitué par la réunion de particules plus ou moins grosses ou de matières précipitées ayant, séparément, subi un certain transport* ». Ces particules proviennent de l'érosion des roches et de l'activité humaine du fait des rejets industriels et urbains. On distingue trois origines aux sédiments (SHNEIDER.G, 2001).

- **Origine endogène** : Ce sont tous les débris issus de la décomposition de macrophytes végétaux de grande taille peuplant les écosystèmes aquatiques, phanérogame les cadavres de microphytes et d'animaux. En général toutes les particules proviennent de la production autochtone du milieu.
- **Origine exogène** : ils peuvent être d'origine naturelle ou anthropique. Il s'agit des particules issues du ruissellement des eaux ou transportées par les vents, elles proviennent de l'érosion des sols, de la décomposition de matière organique, de micropolluants liés aux rejets agricoles, industriels et domestiques
- **Origine diagenèse ou néoformation** : cela correspond à l'ensemble des phénomènes d'altération, de précipitation, de transformation biochimique et physico-chimique qui vont se produire dans un bassin de sédimentation et durant la sédimentation.

L'accumulation de ces sédiments dans les ports, les chenaux d'accès, les canaux, les rivières et les fleuves empêchent la circulation des bateaux et perturbent l'équilibre physico-chimique de la qualité des eaux. Le curage ou dragage est une opération indispensable afin de rétablir le tirant d'eau minimal, la restauration du milieu naturel, ainsi que pour éviter plusieurs problèmes tels que : les inondations, la prolifération d'algues (lutte contre l'eutrophisation), et l'effondrement des berges. (SHNEIDER.G, 2001). Généralement, il y a deux techniques principales souvent utilisées pour effectuer le curage : la méthode hydraulique et la méthode mécanique.

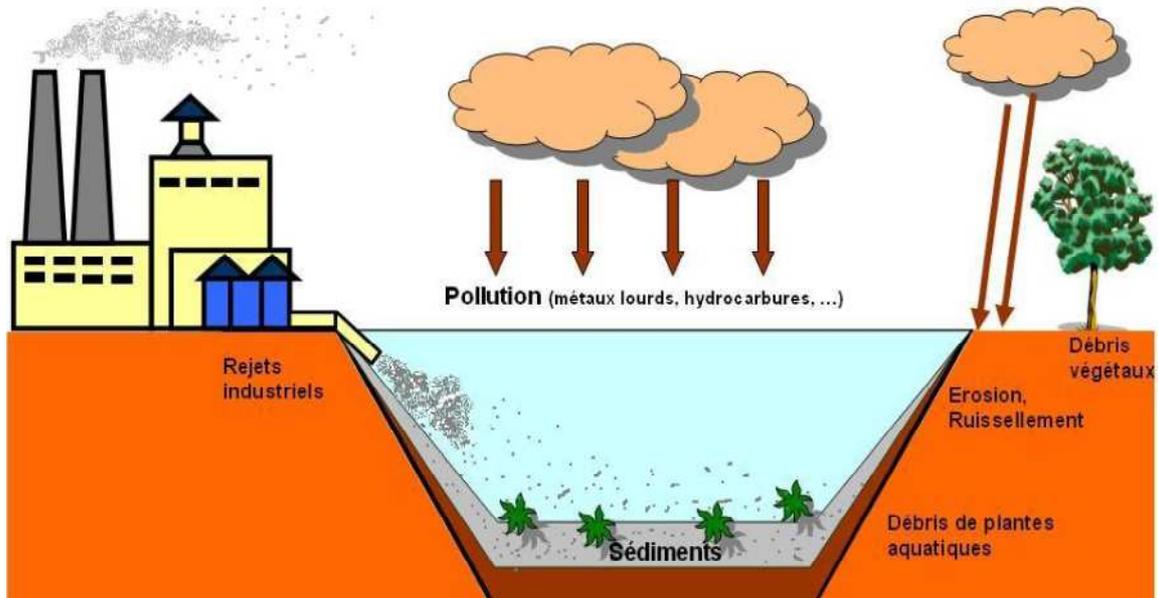


Figure 1.1 : l'accumulation des sédiments (SAMARA .M, 2007)

1.2 Constitution des sédiments

Le sédiment est une matrice très hétérogène. Il est constitué de fraction minérale, fraction organique et de l'eau. Ces composants ont des influences sur les caractéristiques physiques, géotechniques et environnementales.

1.2.1 Granulométrie des sédiments

La composition granulaire d'un matériau peut s'étendre des cailloux ($d > 20 \text{ mm}$) aux argiles ($d < 2 \mu\text{m}$). Cette distribution a un effet sur les comportements physiques, mécaniques et environnementaux des sédiments. Le Tableau 1.1, détaille le classement granulométrique des sédiments utilisés en géologie (SHNEIDER.G, 2001).

Taille	Dénomination
$> 20 \text{ cm}$	Blocs
$2 \text{ cm à } 20 \text{ cm}$	Galets et cailloux
$20 \text{ mm à } 2 \text{ cm}$	Graviers
$20 \mu\text{m à } 2 \text{ mm}$	Sables (grossiers et fins)
$2 \mu\text{m à } 20 \mu\text{m}$	Limons (ou silt)
$< 2 \mu\text{m}$	Vases, boues argileuses

Tableau 1.1 : Classe granulométrique d'un matériau

Sur le plan granulométrique, la fraction fine est caractérisée par les limons et les argiles avec une cohésion importante. Ainsi, cette fraction fine induit en général un comportement complexe provoqué par les interactions entre les particules minérales, l'eau contenue dans le milieu, les ions et les éléments organiques (DUBOIS.V, 2006). Plusieurs chercheurs ont montré que les particules fines dans les sédiments piègent les métaux lourds (PÉNA.G & PICOT.B, 1991) et la plupart des contaminations sont fixées dans les fractions fines plutôt que dans les autres classes granulométriques ((GOSSELIN.A et al, 1999); (TRAN NGOC . T, 2009)).

1.2.2 Phase eau interstitielle

Les sédiments de dragage contiennent en général une teneur en eau élevée, qui varie entre 150% et 300% (DUBOIS.V, 2006). On distingue 4 formes d'eau dans un sédiment (MUSTIN.M, 1987):

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

1.2.3 Phase organique

Dans les sédiments de curage, la matière organique est très diverse. Elle peut avoir comme origine des débris végétaux, d'algues et de micro-organismes. La décomposition de ces matières est très longue et peut prendre plusieurs années. En général, les sédiments contiennent entre 2% à 10% de matière organique et pouvant atteindre dans certain cas jusqu'à 20%. Les matières organiques dans le sol sont généralement réparties en quatre classes. (MUSTIN.M, 1987).

- La matière organique vivante (biomasse active),
- La matière organique fraîche (débris végétaux, cadavres, excréments, ...),
- Les composés en cours d'évolution dits transitoires,
- Les composés organiques stabilisés, appelés communément humus.

L'humus se divise en trois groupes : la fraction humine, les acides humiques et les acides fulviques. (MUSTIN.M, 1987).

La présence de la substance organique dans les sédiments, favorise l'interaction entre les substances organiques et les minéraux argileux par échange cationique ou par pénétration dans les espaces inter-couches des feuilles d'argiles (ACHOUR.R, 2013) . En revanche, des recherches menés affirment que la présence de la matière organique dans les sols, augmente la compressibilité, diminue la densité sèche du sol et accroît la teneur en eau optimale et les limites de plasticité et de liquidité (Holtz.R.D & Krizek.R.J, 1970); (FRANKLIN.A.F et al, 1973);(MALKAWI.H et al, 1998) (ZENTAR .R et al, 2009).

1.3 Pollution des sédiments

Dès les années 1970, les sédiments ont été reconnus comme étant la destination finale des polluants (SCORDIA .P, 2008), qui ont tendance à se fixer sur les fractions fines (PONS.J, PARRA.M, & JULIUS.C, 1987). Généralement, les polluants présents dans les sédiments sont essentiellement dus aux rejets agricoles, industriels et urbains. Ils peuvent être de nature inorganique (Cd, Cr, Cu, Hg, N, Pb, Zn), organique (HAP, PCB....) et des éléments nutritifs. En revanche, les sédiments ne constituent pas 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 transférer vers la colonne d'eau, vers le sol ou vers les nappes phréatiques (Projet LIFE, 2007).

1.3.1 Les éléments nutritifs.

Ils proviennent principalement des rejets d'eaux usées urbains et d'effluents agricoles et industriels. Il s'agit notamment du phosphore, des composés azotés comme l'ammoniaque et des composés organiques. L'apport excessif de substances nutritives dans un milieu aquatique peut entraîner la prolifération des végétaux toxiques, qui sont à l'origine du phénomène d'eutrophisation.

1.3.2 Les métaux lourds.

Les métaux lourds proviennent de l'érosion de la roche et des rejets générés par certaines activités industrielles : stockage de déchets industriels et urbains, de l'industrie du textile, de poussières des industries métallurgiques.

Les métaux lourds peuvent se présenter sous différentes formes : les ions, adsorbés à la surface des particules minérales et des matières organiques, les ions solubles ou insolubles dans l'eau. Une fois que les métaux lourds dépassent un seuil de tolérance, ils sont considérés comme toxiques. «Ils sont alors incompatibles avec les phénomènes vitaux et certains d'entre eux ont des propriétés cancérigènes et mutagènes» (GAZETTE RIVIER, 2012). Les principaux métaux lourds sont le Cadmium, le Cuivre, le Zinc, le Nickel, le Mercure, le Chrome, le Plomb, l'Arsenic. Les plus dangereux sont le mercure, le cadmium qui bloquent les activités enzymatiques du métabolisme, et sont suivis par le plomb, le cuivre, le nickel, le chrome, le zinc et le l'arsenic. (ALZIEU.C, 1999). Le tableau 1.2 expose les sources de pollution des métaux lourds.

<i>Cadmium</i>	Engrais phosphatés ; traitement de surface des métaux ; industries de stabilisation des matières plastiques ; fabrication des accumulateurs et des radiateurs automobiles ; fabrication de caoutchouc; colorants des eaux de ruissellement des voies de circulation.
<i>Cuivre</i>	Canalisation d'eau ; fils électriques; radiateurs automobiles ; appareils de chauffage.
<i>Zinc</i>	Produits pharmaceutiques ou domestiques ; conduites d'eau; peintures; piles ; galvanisation.
<i>Nickel</i>	Fabrication d'acier et d'alliage spéciaux ; recouvrement de surface par électrolyse ; hydrogénation des huiles et substances organiques ; fabrication de peintures.
<i> Mercure</i>	Produits pharmaceutiques ou domestiques; production et utilisation d'antifongiques; appareils électriques ; produits électrolytiques ; du chlore et de la soude; peintures.
<i>Chrome</i>	Tannerie; fabrication d'alliages spéciaux; industries de traitement de surface
<i>Plomb</i>	Canalisation d'eau; bac de batterie; peintures; additifs pour l'essence; eau de ruissellement des voies de circulation; industries pharmaceutiques et sidérurgiques; télévisions.
<i>Sélénium</i>	Fabrication de peintures et de colorants; verre; semi-conducteurs; insecticides alliages
<i>Arsenic</i>	Pesticides; herbicides; fongicides; insecticides; raticides; défoliants; conservateurs du bois; cellule solaires; semi-conducteurs; électrographie; catalyse; pyrotechnique; céramique;

Tableau 1.2 : Source de pollution des métaux présents dans les sédiments de dragage
(MAROT.F, 1997)

1.3.3 Les polluants organiques

Les polluants organiques contiennent trois groupes de contamination : les HAP «hydrocarbures polycycliques aromatiques», les PCB «polychlorobiphényles» et les TBT tributylétain. Ils sont composés généralement de carbone, d'hydrogène, d'oxygène et d'azote. Leur présence dans les sédiments est principalement due aux activités humaines et aux rejets industriels. Ces éléments sont souvent très toxiques et présentent un réel danger pour les différents organismes vivants et l'Homme.

- Les TBT (Tri-Butyl-Etain): C'est une molécule biocide incorporée dans la composition de certaines peintures. Son rôle est d'empêcher les organismes de se fixer sur les coques des navires. Les scientifiques ont conclu que le TBT était responsable des déclin dans les populations d'huîtres en France et qu'il avait des effets négatifs sur certains gastéropodes marins. L'un des effets notables du TBT est l'effet imposex, à savoir l'apparition de caractéristiques sexuelles mâles chez les femelles. (Environnement Canada, 2005). Interdit à la vente en 2003 et à l'utilisation en 2008, son action sur la faune aquatique est dangereuse. (TRAN NGOC . T, 2009)
- Les PCB (Poly-Chloro-Biphényles) : Famille de 209 composés organochlorés de haut poids moléculaire dont la formule générale est : $C_{10}H_{(10-n)}Cl_n$. Ces molécules ont été massivement utilisées entre les années 1930 et les années 1980 dans les industries comme lubrifiant et pour la fabrication de transformateurs et de condensateurs électriques.
- Les HAP (Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques) : Cette appellation désigne les substances dont la structure chimique est constituée de plusieurs noyaux aromatiques ayant en commun plus d'un atome de carbone. Ils sont toxiques pour les animaux aquatiques et cancérigènes pour les mammifères et insolubles dans l'eau (INERIS,2005). Les sources principales en HAP sont anthropiques (combustions incomplètes, raffinage du pétrole, incinérateurs, revêtements routiers, charbon, huiles) et naturelles (incendies éruptions volcaniques, synthèse naturelle les végétaux, les bactéries et les algues). (BOURCEREAU.L, 2010). Ils ont tendance à s'adsorber sur les matrices solides et notamment les matières organiques. (CHEFETZ.B et al,2000).

1.4 Réglementation vis-à-vis de la gestion des sédiments fluviaux

1.4.1 Sédiments Marins.

La France métropolitaine dispose d'un littoral d'une superficie d'environ 5500 km², partagé entre la mer du Nord, l'océan Atlantique et la Méditerranée. Il contient cinq grands ports maritimes : Dunkerque, Calais, Boulogne, Le Havre et La Rochelle. Le volume de sédiments dragués annuellement dans le monde est de 600 millions m³ (BOUTOUIL .M, 1998). En France, environ 45 million de m³ de sédiment sont dragués, dont 90% concernent les dragages maritimes des ports estuariens (LE GRENELLE DE MER, 2011). La gestion des sédiments marins est encadrée par des législations solides visant à persévérer les milieux aquatiques et

interdisant le clapage des sédiments contaminés. A l'échelle internationale, plusieurs textes juridiques portent sur l'immersion des sédiments et la protection du milieu marin. On peut citer :

- La convention d'Oslo du 15 février 1972 pour la prévention de la pollution des mers par les opérations d'immersion.
- La Convention de Londres du 29 décembre 1972 sur la prévention de la pollution des mers résultant de l'immersion des déchets.
- La convention de Barcelone de 1976, amendée en 1995, et les protocoles élaborés dans le cadre de cette convention visent à protéger l'environnement marin et côtier de la Méditerranée tout en encourageant des plans régionaux et nationaux contribuant au développement durable.
- De la convention de Paris du 22 septembre 1992 qui se substitue à celle d'Oslo et qui est relative à la protection du milieu marin de l'atlantique du Nord-est (CONVENTION DE PARIS, 1992).

En 1992, les conventions d'Oslo et de Paris ont été unifiées en une unique convention, dite convention Oslo-Paris ou « OSPAR ». Cette convention OSPAR oriente la coopération internationale sur la protection du milieu marin de l'Atlantique Du Nord-est. Elle a atteint un engagement commun des signataires souhaitant prendre toutes les mesures possibles dans le but de prévenir et d'éliminer la pollution. Elle prend également en compte les mesures nécessaires pour la protection des zones maritimes contre les effets dangereux des activités humaines, afin de préserver la santé de l'homme et des écosystèmes marins. La convention OSPAR (ALZIEU.C et al, 1999) a été ratifiée par plusieurs pays européens (Allemagne, Belgique, Danemark, Finlande, France, Irlande, Islande, Luxembourg, Norvège, Pays-Bas, Portugal, Grande Bretagne et l'Irlande du Nord, la Suède, et la Suisse) .

À l'échelle nationale, le groupe GEODE (*Groupe d'Etudes et d'Observation sur les Dragages et l'Environnement*), a établi un guide entrant dans le cadre de la convention OSPAR. Ce guide stipule par deux seuils (N1 et N2) pour les teneurs organiques et inorganiques (métaux lourds). Les deux seuils N1 et N2 visent les opérations de dragage et d'immersion (INERIS,2009).

- Le niveau 1 (N1) : au-dessous duquel les opérations de dragage et d'immersion seraient autorisées sans autres études complémentaires : l'impact potentiel est jugé

neutre ou négligeable, les valeurs observées se révélant comparables aux « bruits de fond » environnementaux.

- Le niveau 2 (N2) : au-dessus duquel les opérations d’immersion sont susceptibles d’être interdites sous réserve que cette interdiction soit la solution de gestion la moins dommageable pour l’environnement : une investigation complémentaire est généralement nécessaire car des indices peuvent laisser présager un impact potentiel de l’opération. Une étude d’impact approfondie est alors jugée indispensable.
- Entre les niveaux N1 et N2, une investigation complémentaire peut s’avérer nécessaire en fonction du projet considéré et du degré de dépassement du niveau N1. Des tests peuvent alors être pratiqués pour évaluer la toxicité globale des sédiments. Les teneurs présentées dans le Tableau 1.3 et le Tableau 1.4 sont exprimées en mg/kg de sédiments secs analysés sur la fraction inférieure à 2 mm.

<i>Elément</i>	<i>Niveau N1</i>	<i>Niveau N2</i>
<i>Arsenic</i>	25	50
<i>Cadmium</i>	1.2	2.4
<i>Chrome</i>	90	180
<i>Cuivre</i>	45	90
<i>Mercure</i>	0.4	0.8
<i>Nickel</i>	37	74
<i>Plomb</i>	100	200
<i>Zinc</i>	276	552

Tableau 1.3 : Niveaux relatifs aux composés traces (en mg/kg de sédiments secs analysés sur la fraction inférieure à 2 mm) (INERIS, 2009).

<i>PCB</i>	<i>Niveau N1</i>	<i>Niveau N2</i>
<i>PCB congénère 28</i>	0.025	0.05
<i>PCB congénère 52</i>	0.025	0.05
<i>PCB congénère 101</i>	0.05	0.1
<i>PCB congénère 118</i>	0.025	0.05
<i>PCB congénère 138</i>	0.05	0.1
<i>PCB congénère 153</i>	0.05	0.1
<i>PCB congénère 180</i>	0.025	0.05

Tableau 1.4 : Niveaux relatifs aux composés traces PCB (en mg/kg de sédiments secs) (INERIS,2009).

Les valeurs de N1 et N2, présentées dans le tableau 1.5, des pays ayant ratifiés la convention d’Oslo, diffèrent d’un pays à un autre selon leurs besoins et leurs histoires géologique et industrielle.

<i>Métaux</i>	<i>Angleterre</i>	<i>Belgique</i>	<i>Pays-Bas</i>	<i>Allemagne</i>	<i>Espagne</i>
	<i>N1-N2</i>	<i>N1-N2</i>	<i>N1-N2</i>	<i>N1-N2</i>	<i>N1-N2</i>
<i>Arsenic</i>	20-100	36-100	29-29	30-150	80-200
<i>Cadmium</i>	0.4-5	3-7	0.8-4	2.5-12.5	1-5
<i>Chrome</i>	40-400	66-220	100-120	150-750	90-180
<i>Cuivre</i>	40-400	65-91	36-60	40 – 200	100 – 400
<i>Mercure</i>	0.3-3	4-7	0,3 – 1,2	1-5	0,6 – 3
<i>Nickel</i>	20-200	190-280	35 – 45	50-250	100 – 400
<i>Plomb</i>	50-500	400-600	85 – 110	100 – 500	120-600
<i>Zinc</i>	130-800	350-500	140 - 365	350 – 1750	500-3000
<i>HAP (totaux)</i>	-	-	-	1-3	-
<i>PCB (totaux)</i>	0.02-0.2	-	4 – 30	20 – 60	-

Tableau 1.5 : Seuils des métaux lourds et polluants organiques (mg/kg matériaux secs) proposés par différents pays.

1.4.2 Sédiments fluviaux

1.4.2.1 Réglementation française

Le territoire français contient 525 000 km de cours d’eau. Prés de 6 Mm³ de sédiments fluviaux y sont curés chaque année. Cette opération est principalement à la charge de l’Etat comme indiqué dans le tableau 1.6.

<i>Maître d'ouvrage</i>	<i>Volume curé</i>
<i>Compagnie National du Rhône (CNR)</i>	46%
<i>Voies Navigables de France (VNF)</i>	26%
<i>Collectivités</i>	18%
<i>Électricité de France (EDF)</i>	6%
<i>Ports autonomes</i>	2%
<i>État</i>	2%

Tableau 1.6 : Données générales du dragage continental par maîtres d'ouvrage (LHER.J et al, 2007)

Les opérations de curage des sédiments fluviaux doivent aussi se référer aux articles du Code de l'Environnement qui énoncent les conditions pour lesquelles une procédure d'autorisation ou de déclaration est nécessaire (Tableau 1.7).

<i>Volume de sédiments (m³/an)</i>	<i>Seuils de qualité</i>	<i>Procédure</i>
<2000	>S1	Autorisation
<2000	<S1	Déclaration

Tableau 1.7 : Conditions pour lesquelles les travaux de dragage de canaux et de cours d'eau sont soumis au régime de déclaration ou d'autorisation (A : autorisation, D : déclaration) (INERIS, 2009).

L'arrêté du 9 août 2006, fixe le niveau à prendre en compte lors d'une analyse des sédiments extraits de cours d'eau ou des canaux. Ce niveau appelé « S1 » a été établi pour apprécier l'incidence d'une opération sur le milieu aquatique. Il concerne les métaux lourds, les PCB (Poly-Chloro-Biphényles) totaux (7) et les HAP (Hydrocarbures Aromatiques Poly-cycliques) totaux (6) (Tableau 1.8).

<i>Éléments</i>	<i>Seuil S1</i>
<i>Arsenic</i>	30
<i>Cadmium</i>	2
<i>Chrome</i>	150
<i>Cuivre</i>	100
<i>Mercure</i>	1
<i>Nickel</i>	50
<i>Plomb</i>	100
<i>Zinc</i>	300
<i>PCB totaux</i>	0.68
<i>HAP totaux</i>	22.8

Tableau 1.8 : Niveaux relatifs aux éléments métalliques et aux composés traces PCB et HAP (en mg/kg de sédiments secs) (INERIS, 2009)

Lorsque le sédiment de dragage dépasse les seuils réglementaires « S1 », le sédiment est destiné à la filière terrestre et entre dans le cadre de la nomenclature déchets. Cette réglementation se base sur le décret du 18 avril 2002 qui est repris dans la nomenclature européenne des déchets :

- 17 05 05* : Boues de dragage contenant des substances dangereuses.
- 17 05 06 : Boues de dragage autres que celles visées à la rubrique 17 05 05.

La dangerosité des déchets repose sur 14 critères de dangerosité (notés H1 à H 14). Certains critères ne sont pas adaptés aux sédiments de dragage. Le critère le plus adapté au sédiment est le critère H14 (écotoxicité) qui est déterminant pour l'évaluation du caractère dangereux. Cet essai vise à mesurer les effets des sédiments sur la reproduction des organismes pendant 48h, prenant en compte la toxicité de l'éluât (toxicité aiguë et toxicité chronique), et la toxicité de la matrice brute (toxicité aiguë et sub-létale) (Figure 1.2). Le protocole « H14 sédiments MEEDDM 2009 » est conçu pour une application comprenant une phase d'acquisition de données de 18 mois. Actuellement il n'existe pas de protocole officiel pour tester de H14 (Environord, 2011).

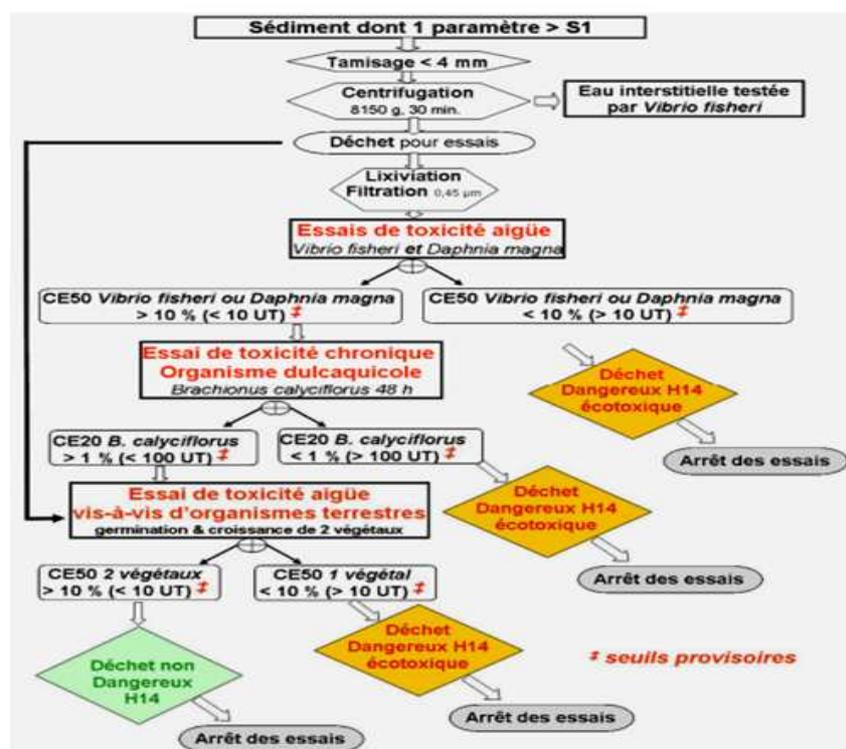


Figure 1.2 : Protocole établi par le groupe de travail « dangerosité des sédiments » du MEEDDM (octobre 2009) pour la mesure du paramètre H14 sur les sédiments

1.4.2.2 Réglementation Belge

a. Règlements en Wallonie

La gestion des sédiments et des boues enlevées du lit et des berges des cours et plans d'eau suite à des travaux de dragage ou de curage relève des directives de l'arrêté du 10 juin 1999 du gouvernement Wallon modifiant l'arrêté du 30 novembre 1995. Cet arrêté se base sur deux catégories qui définissent les statuts du devenir des sédiments.

- **Catégorie A** : les sédiments à extraire sont considérés comme appartenant à la catégorie A (Teneur Maximale Autorisée) lorsqu'il n'y a pas de dépassement des seuils définis dans le Tableau 1.9. Dans cette catégorie (A), on peut utiliser les sédiments dans les domaines suivants : aménagement du lit ou des berges des cours d'eau, en fondation ou sous-fondation, en réhabilitation des sites pollués, en aménagement-réhabilitation de centres d'enfouissement technique. (D.DROUSIE, 2010).
- **Catégorie B** : Lorsqu'au moins un des éléments ou composés dépasse la Teneur de Sécurité TS fixée au Tableau 1.9. Ces sédiments doivent être orientés vers le centre de regroupement pour le prétraitement ou le traitement, en vue de répondre aux critères pour le classer en catégorie A ou l'éliminer en centre d'enfouissement technique.

<i>Paramètre</i>	<i>Catégorie A (TMA)</i>	<i>Catégorie B (TS)</i>
<i>As</i>	50	100
<i>Cd</i>	6	30
<i>Cr</i>	200	460
<i>Cu</i>	150	420
<i>Co</i>	25	100
<i>Hg</i>	1.5	15
<i>Ni</i>	75	300
<i>Pb</i>	250	1500
<i>Zn</i>	1200	2400
<i>F</i>	250	500
<i>CN</i>	5	25
<i>Hydrocarbure apolaire</i>	1500	4500
<i>Hydrocarbure aliphatiques (C10-C40)</i>	50	100
<i>Hydrocarbure aromatique polycyclique</i>	10	75

Tableau 1.9 : TMA et TS, des éléments et composés organiques et inorganiques en mg/kg deMS.

b. Règlementation Flamande

La réglementation Flamande belge pour la gestion de sédiments de curage se réfère à l'Arrêté du Gouvernement Flamand (AGF) du 14 décembre 2007. Les sédiments de curage sont classés en fonction de leur qualité : soit pour une libre utilisation, soit pour une utilisation comme matériaux de construction. (La totalité des éléments sont présentées dans l'annexe 1).

➤ Valeurs pour la libre utilisation des terres excavées

Les valeurs pour la libre utilisation des terres excavées sont indiquées dans le Tableau 1.10. Ces valeurs permettent d'utiliser les sédiments comme terre, comme engrais ou comme produit d'amendement.

<i>Eléments</i>	<i>Partie fixe de la terre (Ms en mg/kg)</i>	<i>Eaux souterraines ([00b5]g/l)</i>
<i>Arsenic</i>	35	12
<i>Cadmium</i>	1.2	3
<i>Chrome</i>	91	30
<i>Cuivre</i>	72	60
<i>Mercure</i>	1.7	0.6
<i>Plomb</i>	120	12
<i>Nickel</i>	56	24
<i>Zinc</i>	200	300
<i>Benzène</i>	0.3	2
<i>1,2-dichloroéthane</i>	0.06	5

Tableau 1.10 : Valeurs limites de quelques éléments (métaux lourds et organique) pour la libre utilisation des terres excavées.

➤ Valeurs pour l'utilisation des terres excavées en construction (ou produit solide).

Lorsque les éléments chimiques contenus dans les sédiments sont inférieurs aux seuils présentés dans le Tableau 1.11 (Annexe 1), les sédiments peuvent être utilisés comme un matériau de construction pour la préparation des terrains à la construction ou pour la réalisation d'un terrassement ou d'une couche de fondation.

<i>Composés</i>	<i>Partie fixe de la terre</i>	<i>valeurs limites pour l'utilisation en construction</i>
<i>Arsenic</i>	250	0,2
<i>Cadmium</i>	10	0,015
<i>Chrome (2)</i>	880	0,1
<i>Cuivre</i>	375	0,2
<i>Mercuré</i>	5	0,003
<i>Plomb</i>	1250	0,4
<i>Nickel</i>	250	0,4
<i>Zinc</i>	1250	0,7
<i>Benzène</i>	0,5	-
<i>Naphtalène</i>	20	-
<i>Cyanure libre</i>	5	-

Tableau 1.11 : Valeurs limites sur lixiviat des métaux lourds et quelques éléments chimiques pour l'utilisation des terres excavées en construction.

1.4.2.3 Réglementation aux Pays-Bas

Les Pays-Bas sont connus pour leur forte sédimentation. Environ 45 Mm³ de sédiments sont dragués chaque année (BENAMAR.A et al, 2007), dont 75 % d'origine marin et le reste représente l'entretien du cours d'eau. Les sédiments aux Pays-Bas sont très fortement contaminés. (MISKO.P et al, 2008). La réglementation aux Pays-Bas vise à privilégier l'immersion des sédiments avant la valorisation directe et avant le confinement. En revanche une grande partie du pays située sous le niveau de la mer est menacée par le recul du système littoral, Les plans de gestion des sédiments au Pays-Bas est chargé de préserver et de renforcer la sécurité nationale, notamment par des techniques de rechargement de l'avant-côte (HANSON.H, et al., 2002). La gestion des sédiments de curage dans les Pays-Bas est régie selon le décret sur la qualité des sols du 18 avril 2013. Elle se répartit en deux grandes filières : l'immersion en eau douce et les matériaux de construction. Les seuils limites mis en place par les autorités néerlandaises servant à apprécier la qualité des sédiments pour l'immersion et pour l'utilisation comme matériaux de construction (liée en zone de construction). Le Tableau 1.12 présente les seuils de quelques éléments (les éléments totaux sont présentés dans l'annexe1).

<i>Métaux lourds</i>	<i>Valeur de fond</i>	<i>Immersion en eau douce</i>	<i>Zone d'habitat</i>	<i>Zone d'industrie</i>
<i>As</i>	20	29	76	76
<i>Br</i>	190	395	920	920
<i>Cd</i>	0,6	4	4,3	13
<i>Cr</i>	55	120	180	-
<i>Co</i>	15	25	190	190
<i>Cu</i>	40	96	190	190
<i>Hg</i>	0,15	1,2	4,8	-
<i>Pb</i>	50	138	530	530
<i>Mo</i>	1,5	5	190	190
<i>Ni</i>	35	50	100	100
<i>Zn</i>	140	563	720	720
<i>PCB (7)</i>	0,02	0,139	0,02	0,5
<i>Tributyltin</i>	0,065	0,25	0,065	0,065

Tableau 1.12 : Teneurs maximales admissibles de quelques éléments pour la réutilisation à terre des sédiments de dragage (en mg/ kg de matières sèches).

1.4.2.4 Réglementation de la Grand Bretagne

La gestion des sédiments en Angleterre se base principalement sur les seuils A1 et A2 mentionnés dans la partie 1.4.1. Néanmoins, avant toute valorisation, une étude de risque et d'impact sanitaire est réalisée conformément aux directives locales ou régionales (P. PRISMA, 2014).

1.5 Prétraitement des sédiments - Séparation des phases solides / liquides

Les sédiments de dragage sont souvent des matériaux fins avec une teneur en eau assez élevée. La déshydratation des sédiments est indispensable pour réduire cette teneur en eau, faciliter la manutention des matériaux en vue de leur élimination ou leur valorisation. Pour rendre les opérations de déshydratation exploitables, il est indispensable de conditionner les boues par l'ajout de flocculant (réactifs minéraux et/ou de polymères de synthèse ou de polyélectrolytes) afin de faciliter la séparation des phases solide-liquides. En général, la déshydratation des boues est réalisée en deux phases. La première phase consiste à mener un conditionnement des boues par l'ajout de flocculant, la seconde phase correspond à la déshydratation mécanique (filtration, centrifugation ou séchage). Dans ce qui suit, nous

aborderons les différents prétraitements physico-chimiques et mécaniques permettant la séparation des phases liquide- solide.

1.5.1 Mécanismes physico-chimiques de coagulation et floculation.

La coagulation et la floculation forment un procédé de traitement physico-chimique et représentent une étape importante du conditionnement des boues pour faciliter l'utilisation des équipements de déshydratations. Ce procédé est une étape essentielle pour éliminer les polluants dans les traitements des eaux de stations d'épuration. Pour le traitement des eaux usées, la coagulation correspond au phénomène de déstabilisation des particules en suspension, tandis que la floculation implique la collision entre ces dernières particules (CHEN.W et al, 2014). L'ajout de coagulants et de floculants facilitent l'élimination des Matières En Suspension (MES) et des colloïdes en les agglomérant sous forme de floc de taille plus grosse, afin de favoriser leur enlèvement par sédimentation ou par filtration et d'accélérer la déshydratation. Ce conditionnement physico-chimique permet également d'éliminer une partie des polluants des effluents, des substances organiques, de certains métaux lourds, des micropolluants associés aux MES et des macromolécules colloïdales. (ADAMCZYK.Z, 2003) (FU.F & WANG.Q, 2010) (CHEZAU.D & GINISTY.P, 2008). En revanche, la floculation des colloïdes dépend de la nature de l'effluent, de la concentration des floes, de la matière organique, du pH, de la température et des doses de coagulants-floculant (BURBAN.P-Y et al, 1990). Le conditionnement de coagulation-floculation se réfère à la nature du réactif employé et aux mécanismes que nous allons aborder par la suite.

1.5.1.1 La coagulation

La coagulation a pour but de déstabiliser les particules fines en suspension, c'est-à-dire de neutraliser les charges pour faciliter leur agglomération (CHEN.W et al , 1997). Dans les milieux aquatiques les particules colloïdales possèdent des charges négatives sur leur surface (CHUN-YANG.Y, 2010). En effet, au sein des particules colloïdales, il y a deux types de forces qui gouvernent leurs stabilités (ABU-ORF.M & ÖRMECI.B, 2005) :

- Les forces d'attraction sont généralement les forces de Van der Waals qui sont liées à la structure et à la forme des colloïdes ainsi qu'à la nature du milieu;

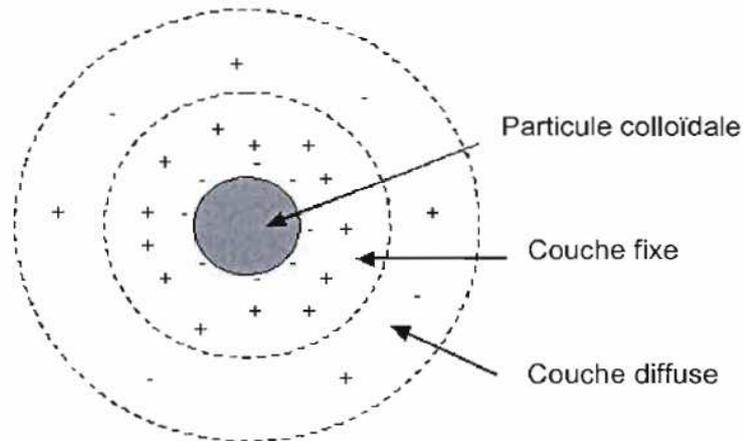


Figure 1.4 : Double couche d'une particule colloïdale.

Il existe deux grandes familles de coagulants :

- Les coagulants minéraux qui sont des sels métalliques simples (sulfate d'aluminium, sels de fer), et qui possèdent des cations trivalents.
- Les coagulants organiques à caractère cationique de masse moléculaire moyenne, parmi lesquels nous distinguons notamment les polyamines et les polyDAMAC.

1.5.1.2 La floculation

La floculation est un procédé utilisé pour l'agglomération des particules fines en formant des floccs volumineux plus poreux, afin de faciliter la relargage d'eau et le bon fonctionnement les différents équipements de déshydratation. C'est un processus qui favorise les contacts entre les particules par deux mécanismes liés qui sont : le pontage entre les particules par la longue chaîne de polymères et la neutralisation par l'utilisation de polymères des charges opposées de celles-ci. La floculation nécessite l'ajout de flocculant. Ces polymères sont caractérisés par :

- Le poids moléculaire qui représente la longueur de la chaîne de flocculants dépendant de l'équipement utilisé pour la déshydratation.
- Le type de flocculants ou de charges est directement lié à la nature des particules à capter :
 - Les flocculants anioniques qui amènent des charges négatives dans le milieu.
 - Les flocculants cationiques qui amènent des charges positives dans le milieu.

- Les flocculants amorphes qui apportent des charges positives et négatives dans le milieu.
- La structure moléculaire qui se fait en fonction des performances visées pour la déshydratation. On peut distinguer trois structures : linéaire, ramifiées, réticulées.

Le pontage interparticulaire est un mécanisme expliqué par l'adsorption du polymère à la surface des particules. Ce mécanisme se fait par deux étapes (Figure 1.5) : l'agglomération primaire qui permet la formation de floccs de petite taille, et l'agrégation secondaire qui entraîne la formation des floccs de grande taille. Ce mécanisme est plus efficace pour les polymères de hautes masses moléculaires (BESRA.L et al, 1999), et pour le polymère de structure moléculaire linéaire (DICKINSON.E & KSSONB.L, 1991).

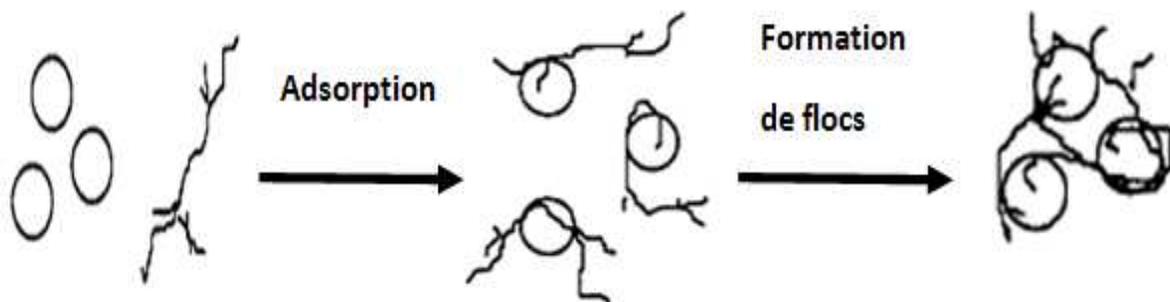


Figure 1.5 : Présentation schématique du phénomène de pontage (GREGORY. J, 1988).

La floculation par neutralisation de charges se fait par le biais d'interaction électrostatique entre les charges de polymères et les charges de particules de signe contraire, ce processus est dépendant de la charge des polymères et un peu de la longueur de chaîne polymères et peut être influencé de façon significative par la présence de certaines espèces ioniques, la force ionique et le pH. (KRAPF.M-E, 2012). La détermination du dosage optimale de polymères est indispensable pour neutraliser les charges. D'autre part, un sous-dosage et surdosage de polymères peuvent induire une restabilisation du système par l'exclusion de la chaîne et inversion de la charge (KRAPF.M-E, 2012) (COUTURIER.F & PONCET.F, 2013). Cette floculation est réversible (BRIANT.J, 1989).

Le choix du produit de conditionnement et sa dose repose sur des essais d'optimisation en laboratoire afin de trouver le produit efficace et puis leur dose optimale. Ces essais d'optimisation sont liés au matériau et à la méthode de déshydratations. (CHEZAU.D & GINISTY.P, 2008).

Les polymères cationiques sont des réactifs essentiellement utilisés pour le conditionnement de boues à teneur élevée en matières organiques. Les doses utilisées sont de l'ordre de 1 à 10 kg/tonne de matières sèches. (BOEGLIN.J.C et al, 2013).

Les polymères anioniques et non ioniques s'adaptent plus facilement aux boues minérales à caractère hydrophobe ou hydrophile. Les doses employées avec ces polymères sont souvent plus modestes, de l'ordre de 0,3 à 2 kg/tonne de matières sèches. (BOEGLIN.J.C BOEGLIN.J.C et al, 2013).

1.5.2 Déshydratation des sédiments

Nous allons présenter différentes méthodes et techniques de déshydratations au cours des sections suivantes:

1.5.2.1 Séparation physique

a. Décantation

La décantation est une opération qui consiste à la séparation des phases solide-liquide sous l'effet de la gravité. Cette méthode a pour but de décanter les particules par la formation des floccs. Ce procédé est peu coûteux et l'exploitation est simple. L'utilisation de flocculant est indispensable pour accélérer la vitesse de décantation, épaissir le sédiment et obtenir à une eau surnageant plus claire. Nous explorerons la décantation des sédiments dans le chapitre 3 qui est consacré à la déshydratation des sédiments. Les principaux décanteurs sont: les décanteurs conventionnels et les décanteurs lamellaires.

b. Séchage

Le principe du séchage naturel consiste à disposer les sédiments dans un bassin contenant ou non du sable et du gravier (Figure 1.6). Ce dispositif se pratique à l'air libre soit en présence ou en l'absence de drainage. L'inconvénient de cette technique est la nécessité d'une grande surface et d'un temps de séchage relativement long, qui dépend du climat. Le lit de séchage est la méthode retenue comme base de déshydratation dans le cadre de notre travail.



Figure 1.6 : Exemple des bassins de séchages (ENVISAN, 2013).

c. Géo-tube

La technologie de déshydratation des sédiments par Géo-tube est utilisée dans le monde entier et surtout au cours les dix dernières années. Cette technologie est simple et efficace à mettre en œuvre, elle répond à toutes les conditions d'espace ou de capacité de stockage. L'utilisation des polymères pour cette technologie est indispensable afin de faciliter la séparation de la phase solide-liquide et de favoriser la filtration. Le procédé de déshydratation par Géo-tube est de pomper les sédiments mélangés avec un polymère et de les remplir dans les sacs. L'essorage se fait par filtration de l'eau claire qui ressort par toute la surface du sac, et capturant jusqu'à 95% de solides dans les sacs Géo-tube (Figure 1.7).



Figure 1.7 : Géo-tube situé à la ville Moordrecht (Pays-Bas) (P. PRISMA, 2014)

1.5.2.2 Déshydratation mécanique

La déshydratation mécanique représente la seconde étape de réduction de la teneur en eau après conditionnement des sédiments par ajout d'adjuvants de floculations. L'action mécanique réalisée après cette étape permet d'atteindre une teneur en eau variant généralement entre 20% à 30%.

a. Déshydratation par filtration

La filtration est un procédé permettant la séparation des constituants d'un mélange solide-liquide au travers d'un milieu poreux. Elle est très utilisée dans le prétraitement des sédiments (MIRAOUIM, 2010).

- le filtre à bandes permet la déshydratation de sédiments en continu entre deux toiles filtrantes. Le fonctionnement de cet instrument est de conditionner les boues avant son arrivée dans la zone d'égouttage (Figure 1.8). La boue floculée est égouttée sur une première toile par drainage libre, ensuite est prise en sandwich entre deux toiles filtrantes par application. Le choix de floculation est choisi pour aboutir à des floccs qui possèdent une bonne aptitude à l'égouttage et qui résistent au cisaillement. L'essai de test à la résistance au cisaillement est important pour ce type de déshydratation. (GINISTY.P & CHEZAUD.D, 2008).

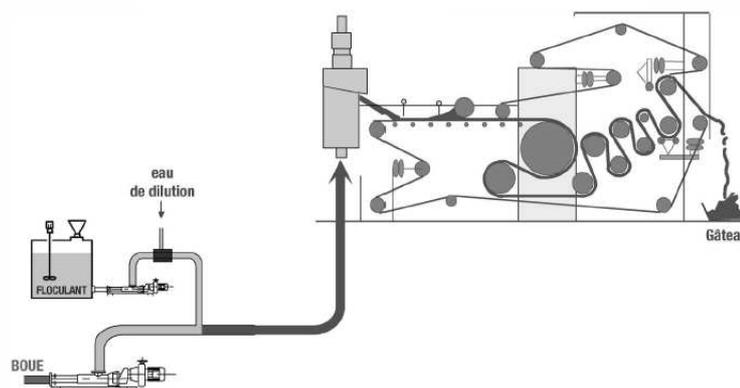


Figure 1.8 : Schéma d'un Filtre à bande (COLIN.D, 2003) .

- Le filtre à presse ou le filtre à plateaux est un procédé discontinu qui s'effectue par cycle. Ce procédé permet la transformation du matériau initialement liquide en une forme de «gâteau» de siccité élevée meilleure qu'avec la technique de filtre à bandes.

Le filtre à plateaux est composé d'une série de plateaux verticaux, évidés et dotés de toiles filtrantes. Ces plateaux forment des chambres étanches, et sont disposés et serrés les uns contre les autres par un vérin hydraulique. (Figure 1.9). La sélection de polymères adaptés à la déshydratation sur filtre à bandes est faite afin de générer des floccs qui possèdent une aptitude à la déshydratation sous pression avec la plus faible résistance spécifique possible. Ce choix est réalisé à l'aide d'une cellule de filtration-compression munie d'un piston qui détermine le volume filtré au cours du temps et mesure la siccité de la boue obtenue. (GINISTY.P & CHEZAUD.D, 2008)

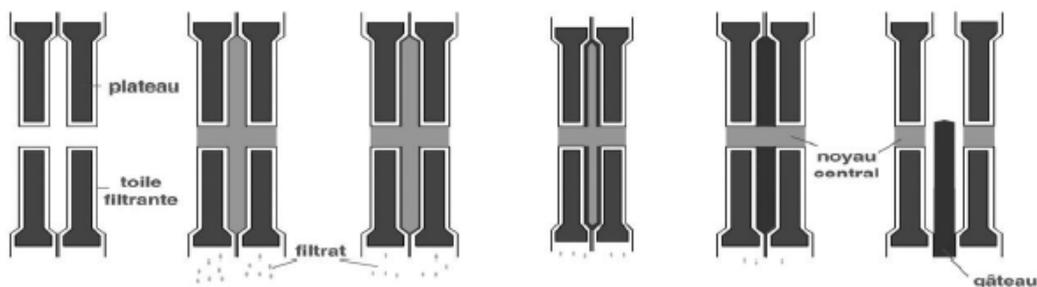


Figure 1.9 : fonctionnement d'un filtre à plateaux (MIRAOUI.M, 2010).

b. Déshydratation par Centrifugation

Le principe de la technique de déshydratation par centrifugation est d'accélérer la séparation des phases solide-liquide à l'aide d'une force centrifuge. Cette force centrifuge est créée par la rotation d'un bol cylindro-conique à grande vitesse (Figure 1.10). La sélection de polymères en vue de cette déshydratation nécessite des boues résistantes aux forces de cisaillement générées par la force centrifuge. (PARTON.S, 2009).

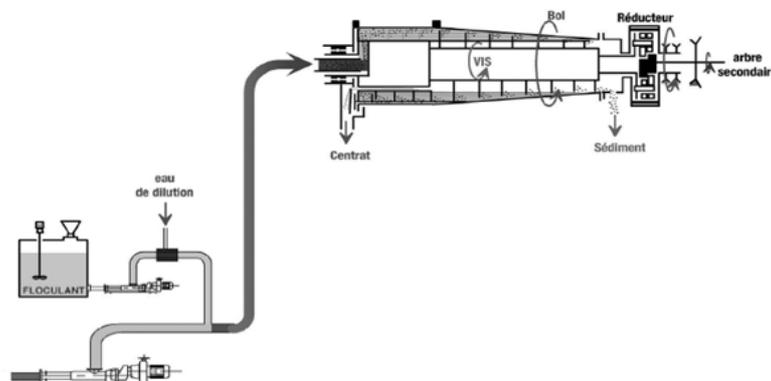


Figure 1.10 : Principe de fonctionnement d'une centrifugeuse

La société SEDIGATE a développé un décanteur dynamique NEMEAU[®]450 innovant pour la déshydratation des sédiments in-situ (Figure 1.11). Ce procédé est un décanteur dynamique transportable, et sa fonction est semblable à la centrifugation. Il est conçu pour trois containers aux gabarits routier et ferroviaire : un premier conteneur technique (alimentation de l'ensemble du décanteur dynamique, préparation des flocculants et injection), un second conteneur de décantation et un troisième conteneur considéré comme un local stockage. Les performances techniques de NEMEAU[®] 450 permettent, selon ces concepteurs, d'atteindre une siccité variant de 40 % à 50%. (MANCIOPPI.L et al ,2012).

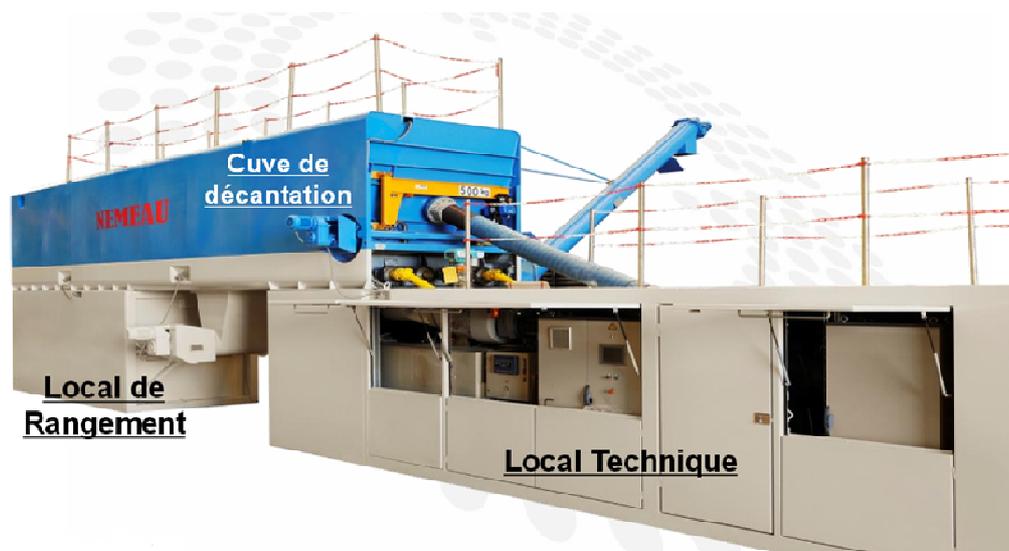


Figure 1.11 : La machine NEMEAU[®] 450 (MANCIOPPI.L et al, 2012).

1.6 Traitement des sédiments

Les différents modes de traitement sont choisis en fonction de chaque type de sédiment afin d'optimiser leur comportement. Les liants hydrauliques sont les plus utilisés pour la stabilisation et la solidification des sols.

L'utilisation des sédiments en technique routière obéit à certaines exigences au point de vue mécanique. Ces exigences se traduisent par une amélioration de performances mécaniques telles que la résistance à la compression, la résistance à la traction et l'indice de portance immédiat ou de CBR. Par ailleurs, le traitement des sédiments de dragages par liant hydraulique ne peut être effectué qu'après la réduction de la teneur en eau par un processus d'hydratation. (BOUTOUIL .M, 2011).

1.6.1 Traitement à la chaux

La chaux est obtenue par la décomposition du calcaire à une température élevée. L'ajout de la chaux dans les sols contribue à une réduction de 1% de la teneur en eau du sol pour 1% de chaux apportée (ROSSI.P et al, 2007). L'incorporation de la chaux dans un sol argileux conduit à la floculation des particules. Ce phénomène se traduit par une modification des champs électriques inter-particulaires par échange des cations alcalins (Na^+ , K^+ ,...) avec des cations Ca^{2+} et OH^- apportés par la chaux. D'un point de vue géotechnique. Cette action entraîne une modification de la consistance par la réduction de l'indice de plasticité. Cette réduction se traduit par une augmentation de la limite de plasticité s'accompagnant plus ou moins d'une augmentation de la limite de liquidité (Figure 1.12). En revanche, l'ajout de la chaux abaisse la densité maximale optimale de l'essai Proctor, avec un décalage de la teneur en eau optimale qui devient plus importante (Figure 1.13) et une augmentation de l'indice de Portance CBR (augmentation de 4 à 10 fois par rapport aux sols non traité), (CABANE.N, 2004), (ROSSI.P et al, 2007)). La chaux peut contribuer également à la diminution de la sensibilité à l'eau, l'accroissement de la résistance et la stabilité du matériau. (ROUX & RIVIÈR.A, 1969).

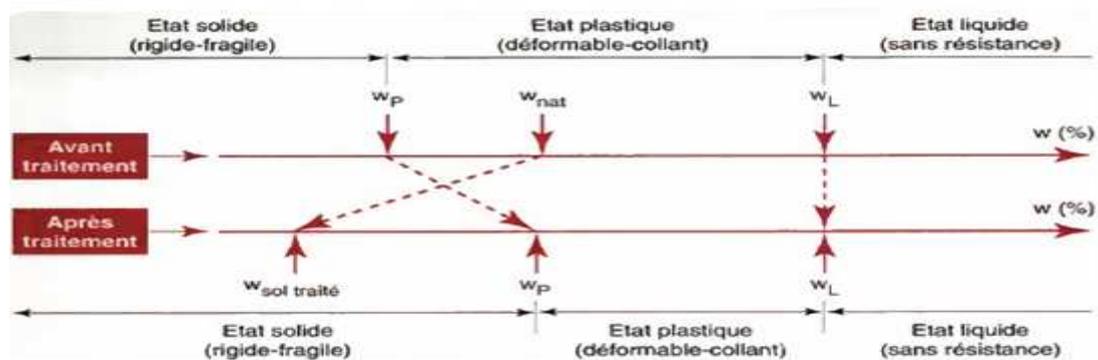


Figure 1.12 : Modification immédiate du comportement d'un sol argileux humide provoquée par l'introduction de la chaux (GTS-LCPC-SETRA, 2000)

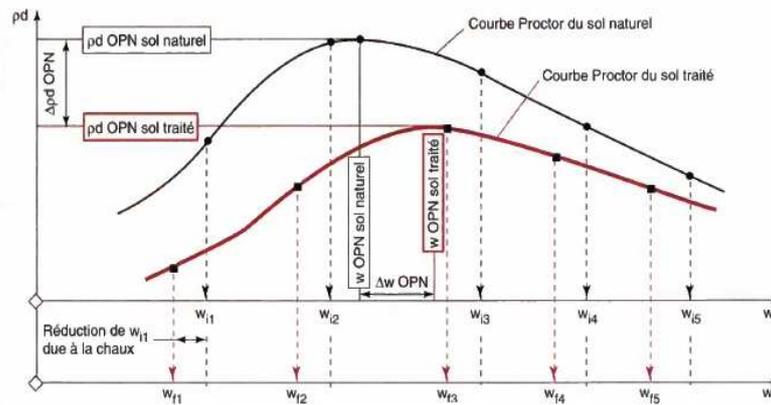


Figure 1.13 : Représentation des actions de la chaux sur les caractéristiques de compactage après l'ajout de la chaux. (GTS-LCPC-SETRA, 2000)

L'ajout de chaux dans un sol provoque une augmentation immédiate du pH qui peut atteindre 12.4. Cette valeur de pH permet de favoriser la formation de silicates de calcium hydratés (CSH, CAH, CASH). La formation de cette réaction est conditionnée par la présence d'une quantité nécessaire de chaux pour la saturation du sol. Pour cela, un test est effectué afin de déterminer la teneur en chaux nécessaire pour que ces réactions puissent avoir lieu.

La quantité de chaux nécessaire pour obtenir cette valeur de pH (pH=12,4) est connue sous le nom de « lime fixation point » (EADES.J & GRIM.R-E, 1966). Le développement des minéraux CSH, CAH, CASH, contribue à l'augmentation de la résistance R_c . En effet, plusieurs chercheurs (Figure 1.14) montrent que les résistances de compression sont proportionnelles ou liées au développement de la formation de CAH et de CSH (XING.H et al, 2009).

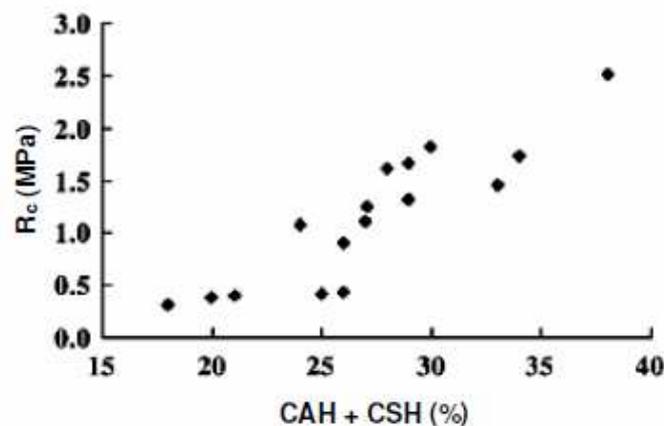


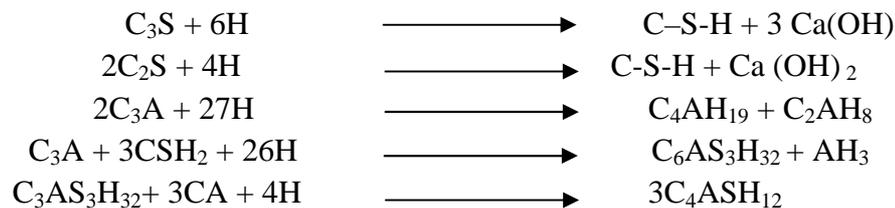
Figure 1.14 : Relation entre la formation des hydrates CAH et CSH et résistance à la compression simple d'un sol traité (XING.H et al, 2009).

1.6.2 Traitement au ciment

Le liant hydraulique ou ciment de type Portland est constitué principalement de clinker, qui résulte à partir d'un mélange de 80 % de calcaire et 20% d'argile et qui est issu de la cuisson à haute température de 1450°C. (DESCHAMPS.T et al, 2006). Les principaux composants anhydres obtenus lors de refroidissement rapide du clinker sont :

- ❖ Le silicate tricalcique $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$ (C_3S) (50-70% du clinker);
- ❖ Le silicate bicalcique $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$ (C_2S) (10-30% du clinker);
- ❖ L'aluminate tricalcique $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A) (2-15% du clinker);
- ❖ L'alumino-ferrite tétracalcique $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$ (C_4AF) (5-15% du clinker).

Au contact de l'eau les principaux composés du ciment C_3S , C_2S , C_3A , et C_4AF réagissent pour former de nouveaux composés insolubles qui entraînent la prise et le durcissement progressif du matériau. Cette réaction d'hydratation de ciment peut se résumer en cinq équations principales qui sont :



Avec : (C = CaO; S = SiO₂; A = Al₂O₃; F = Fe₂O₃; H = H₂O; S = SO₃). (SILITONGA. E, 2010). L'hydratation du ciment est un processus très complexe du fait de ces réactions qui se déroulent simultanément à des cinétiques différentes et peuvent contribuer au durcissement et à la solidification/stabilisation. L'utilisation du liant hydraulique permet de piéger, de fixer et de rendre moins mobiles les polluants par plusieurs mécanismes : précipitation, sorption, insertion, piégeage mécanique (LOUSTAU C- M, 2012), (DESCHAMPS.T et al, 2006). En revanche, plusieurs chercheurs montrent que les métaux lourds et les matières organiques ont une influence sur les mécanismes et ou la cinétique de l'hydratation, ainsi que sur la résistance finale des matériaux. (MEZAZIGH.S, 2010) ; (DIET.J-D, 1996).

1.6.3 Ajout de correcteur granulaire.

L'ajout de correcteur granulométrique dans les sédiments a pour but d'augmenter la compacité du matériau et d'améliorer les performances mécaniques pour l'utilisation comme matériaux de construction. En général, les sédiments contiennent une proportion importante de particules fines (porosité élevée), de teneur en eau, de matières organiques et de polluants. L'ajout d'un correcteur granulaire peut contribuer à l'atténuation de ces paramètres ainsi qu'à l'amélioration du squelette granulaire du matériau qui permet de réduire les vides pour obtenir une compressibilité plus faible et une résistance mécanique plus élevée (BOUTOUIL.M & SAUSSAYE.L, 2011). Plusieurs recherches réalisées sur la valorisation du sédiment incluent la faisabilité d'utiliser un correcteur granulaire, montrent que l'ajout d'un correcteur granulaire contribue à la l'amélioration des performances mécaniques en complément du traitement aux liants hydrauliques. ((ABRIAK.N.E & GREGOIRE.P, 2003) (KAMALLI.S et al, 2007) (BOUTOUIL.M & SAUSSAYE.L, 2011) ; (ACHOUR.R, 2013) ; (MAHERZI.W, 2013) (LIANG.Y, 2012) ; (MIRAOUI.M, 2010); (TRAN NGOC . T, 2009) ; (BOUTOUIL .M, 1998) ; (DUBOIS.V, 2006) ; (COLIN.D, 2003)).

1.7 Sédiments : Matériaux alternatifs pour le Génie Civil

Dans le contexte de développement durable, la gestion des sédiments issus de l'opération de curage doit être réalisée sous certaines conditions de faisabilité technique, environnementale et économique. La gestion des sédiments fluviaux est limitée principalement à la mise en dépôt à terre en vue du stockage ou de la valorisation (TRAN NGOC . T, 2009).

Actuellement, en présence de réglementations très contraignantes pour la protection de l'environnement, plusieurs recherches ont été réalisées afin de s'orienter de plus en plus vers la valorisation des sédiments de dragage pour l'utilisation comme matériaux alternatifs de construction (DAMIDOT.D et al, 2006). En fonction des caractéristiques physico-chimiques, géotechniques et environnementales, la valorisation des sédiments du curage peut être envisagée dans plusieurs domaines tels que les techniques routière, les briques, le béton, la bute paysagère, l'agriculture ou encore l'aménagement de sites naturels.

1.7.1 Valorisation en technique routière

De très grandes quantités de granulats sont consommées chaque année en France. 80 % de ces granulats sont utilisés dans le domaine des infrastructures et 20 % pour la construction de bâtiments (Figure 1.15). Plus de 96% de ces granulats proviennent essentiellement de gisements naturels terrestres. (UNICEM, 2009).

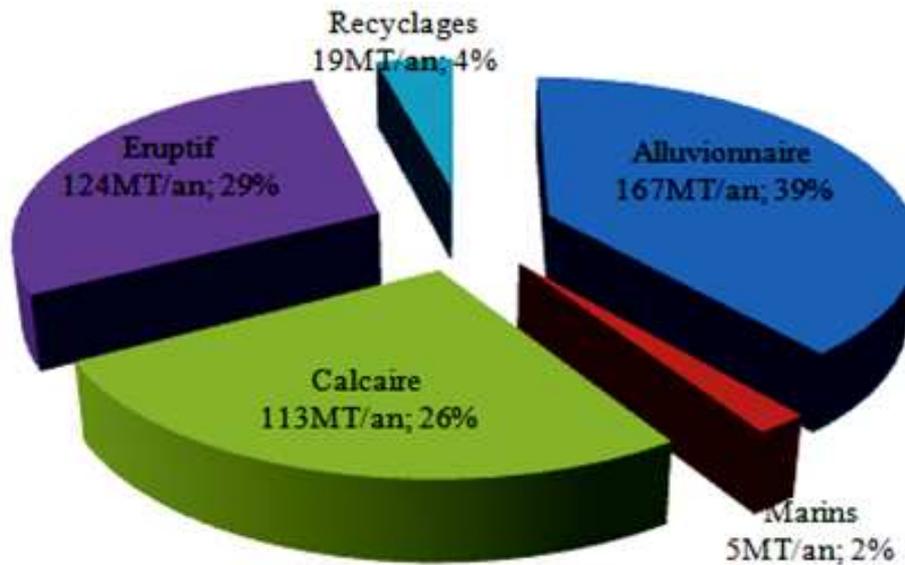


Figure 1.15 : Répartition des différents types des granulats en France (UNICEM, 2009).

Le domaine de la construction routier est le plus grand consommateur des granulats en France. Par conséquent, l'utilisation des quantités importantes de sédiments générés chaque année en travaux publics est une solution intéressante pour contribuer à la gestion durable des sédiments (mise en dépôt) et à la préservation des ressources naturelle. Sachant que les sédiments sont considérés comme des déchets, pour l'utilisation en génie civil, on doit s'assurer qu'ils ne présentent pas de risques pour la santé humaine et sur l'environnement. Une étude des caractérisations environnementales, géotechniques et mécaniques des sédiments est indispensable pour une utilisation en technique routière.

Plusieurs études ont montré la faisabilité de valoriser les sédiments marins ou fluviaux en technique routière. L'Ecole des Mines de Douai a abouti à travers des recherches (Figure 1.16), à la réalisation d'une route expérimentale à base de sédiments marins en 2005, pour valider l'étude menée au laboratoire, et pour vérifier la faisabilité de sa mise en place sur chantier, et ainsi suivre l'évolution de la structure pendant une année aux niveaux mécaniques et environnementales (DUBOIS.V, 2006). En 2013 une réelle route de 550 mètres à base de

sédiments marins a été réalisée à coté de port de Dunkerque dans le cadre de la thèse d'Achour (ACHOUR.R, 2013).

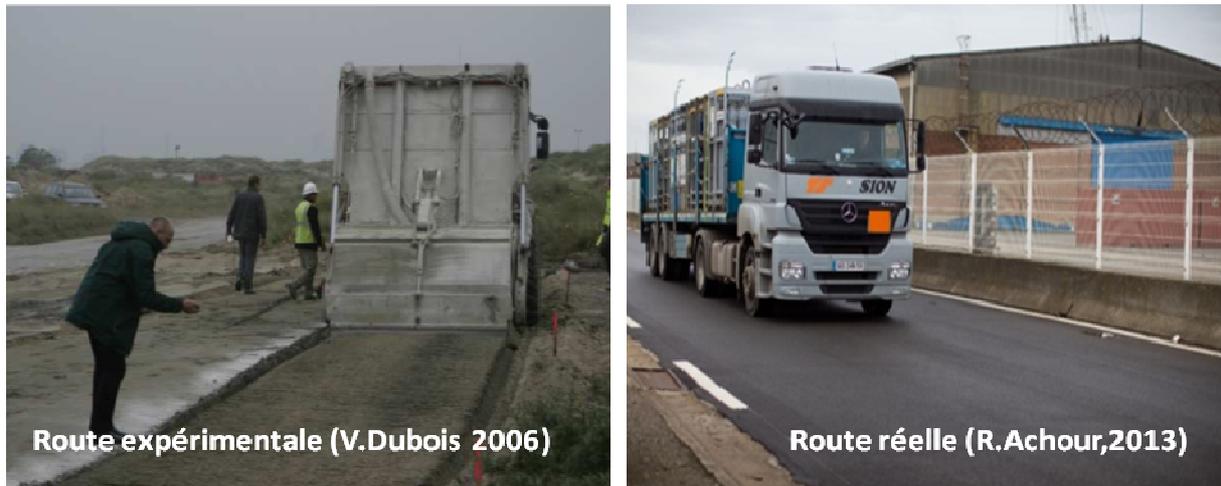


Figure 1.16 : Route à base des sédiments marins de PGMD.

1.7.1.1 Structure de la chaussée

Les chaussées sont des structures multicouches surmontant un ensemble appelé plateforme support de chaussée. Elle est constituée de sol support, d'une couche de forme, d'une couche d'assise et d'une couche de surface (Figure 1.17). Le sol support est surmonté généralement par une couche de forme, cette couche contribue à la protection du sol-support contre le gel, et assurer la traficabilité. Ensuite, la couche de fondation et la couche de base constituent le corps d'une chaussée. Elles assurent la diffusion des efforts produits par le trafic et les répartissent sur la plate-forme support, afin de maintenir les déformations à un niveau admissible. Enfin, la couche de surface qui se compose de la couche de liaison et d'une couche de roulement. Les performances mécaniques requises sont importantes pour la couche éloignée de la PST « *Partie Supérieure des Terrassements* ». Dans cette étude, nous allons explorer la possibilité de valoriser des sédiments fluviaux en couche de fondation. L'utilisation de sédiments en couche de fondation obéit à certaines exigences mécaniques préconisées par GTS (GTS-LCPC-SETRA, 2000).

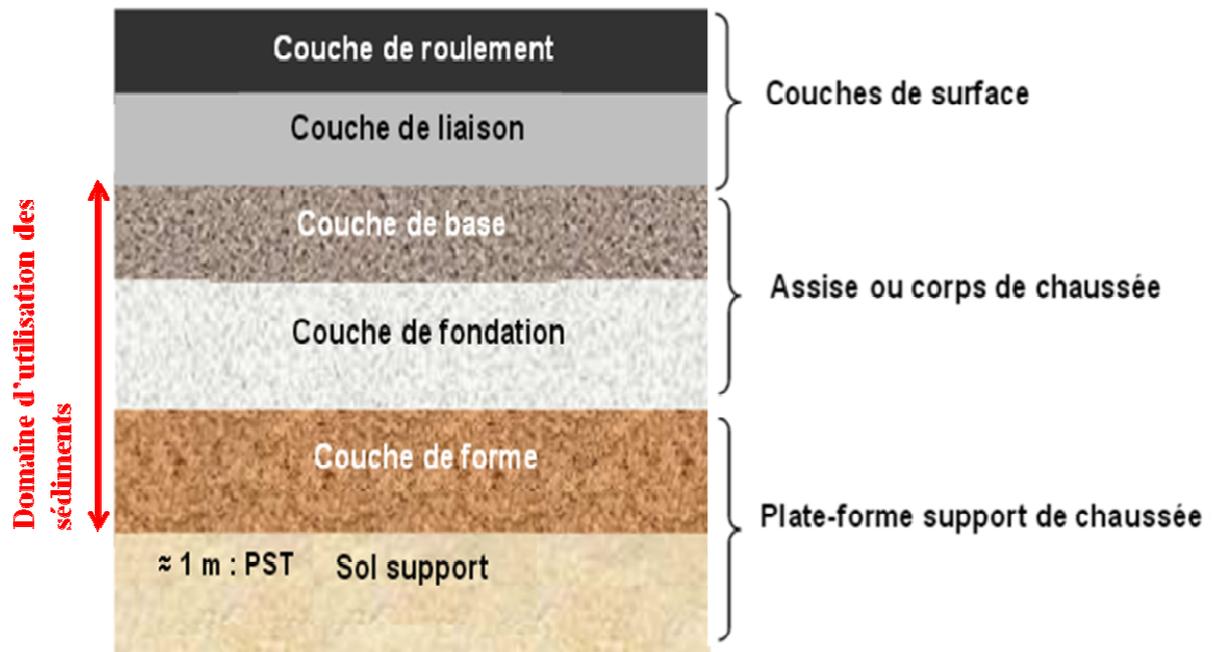


Figure 1.17 : Chaussée type.

1.7.1.2 Classification des sédiments fluviaux selon le guide technique GTR

L'utilisation de sédiments en remblai ou terrassements routiers nécessite la détermination de caractéristiques physico-chimiques et géotechniques. La connaissance de ces paramètres permet notamment d'aboutir à une classification du matériau dans le Guide Technique de Réalisation des Remblais et couche de forme (GTR, 1992) (Figure 1.18). Ces paramètres sont essentiellement la granulométrie, l'indice de plasticité, la fraction argileuse et la matière organique (MO).

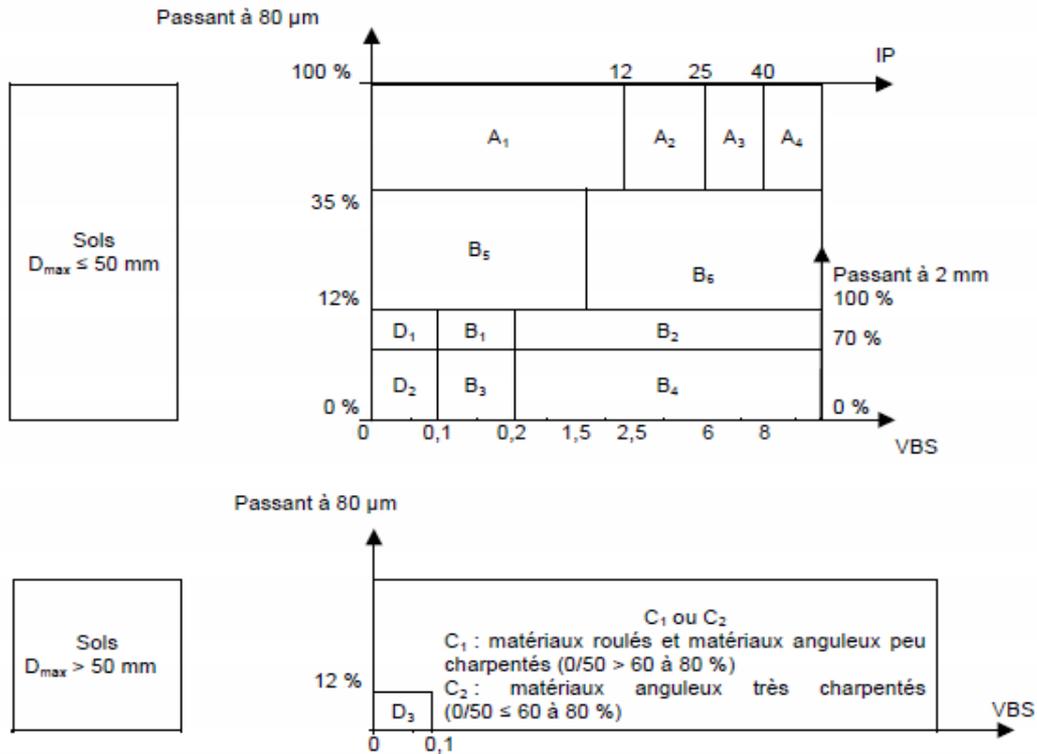


Figure 1.18 : Classification des matériaux (GTR, 1992).

1.7.1.3 Critères pour l'utilisation des matériaux en couche d'assise de chaussée

Avant toute utilisation d'un matériau en sous couche routière, il est nécessaire dans un premiers temps d'identifier ses caractéristiques pour sa classification (Guide GTR). Une fois cette étape réalisée, il est nécessaire également de déterminer sa densité sèche maximale correspondante à sa teneur en eau optimale, ce paramètre de référence (W_{OPM} , ρ_{OPM}) est déterminé à l'aide de l'essai Proctor Modifié. Cet essai nous permet d'avoir un matériau dont la compacité est maximale et un meilleur arrangement granulaire. Parallèlement à la recherche de ce paramètre, des mesures de poinçonnement sur les matériaux compactés permettent d'évaluer l'aptitude du matériau à supporter la circulation des engins sur chantier à court terme. Selon la recommandation française (NF P 98 115), Les valeurs requises de l'indice de portance immédiate, doivent être inférieures à 35 % pour la couche de fondation et 45% pour la couche de base. (Figure 1.19).

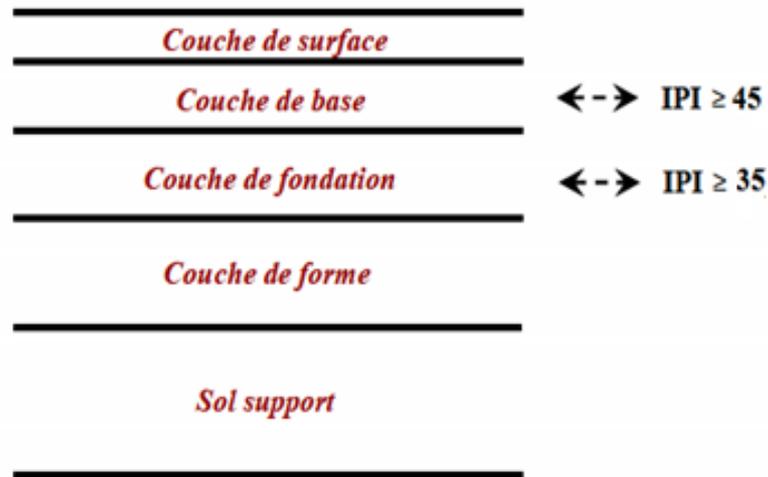


Figure 1.19 : Critère de l'IPI pour la différente couche de la chaussée [norme NF P 98 115].

L'appréciation des performances mécaniques de matériaux à long terme, nécessite la détermination du module d'élasticité (E) et la résistance en traction (R_t) afin de classer le matériau suivant l'abaque de la Figure 1.20. La norme française [norme NF P98 113] définit 6 classes allant de S0 à S5. Selon la même norme, pour une utilisation en couche d'assise, le matériau doit être classé au minimum en classe S2.

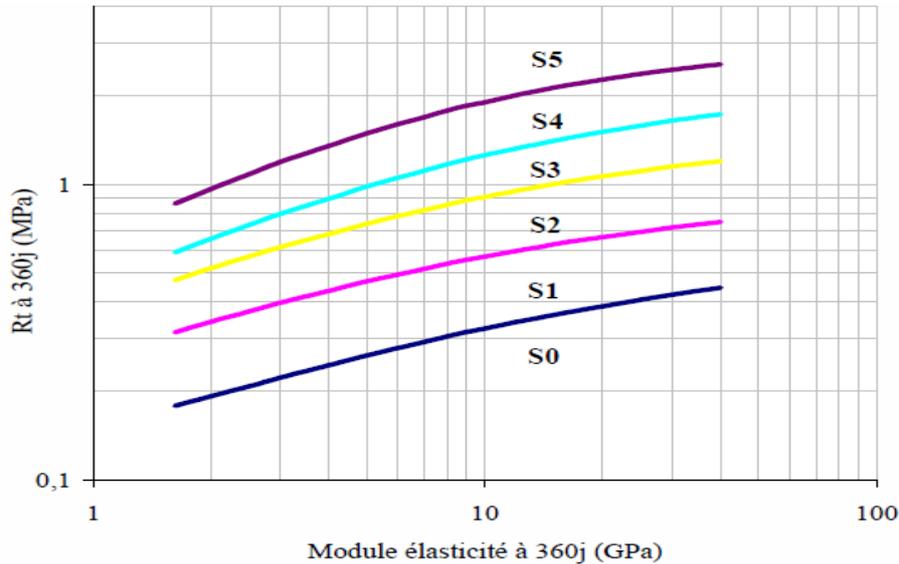


Figure 1.20 : Classification de matériaux traités aux liants hydrauliques (Norme NF P 98 113).

Le classement du couple (R_t , E) est effectué après 360 jours de conservation. Néanmoins, la détermination de ce couple est réalisée aux échéances réduites de 28, 60 ou 90 jours. L'estimation de ces résultats à 360 jours est effectuée grâce aux coefficients empiriques

indiqués dans la norme NF P98 113. Ces coefficients empiriques sont choisis en fonction de la nature du liant hydraulique (Tableau 1.13). Par contre l'effet de la matière organique présente dans les sédiments peut retarder l'hydratation du liant (TREMBLAY.H, 1998). Dans ce travail, nous allons présenter les résultats de résistance mécanique (R_{360}) et du module d'élasticité (E_{360}) à 360 jours afin de comparer les coefficients empiriques préconisés par la norme NF P98 113.

<i>Liant utilisé</i>	<i>Age (jours)</i>	<i>R/Rt₃₆₀</i>	<i>E/Et₃₆₀</i>
<i>Laitier vitrifié brut ou pré-broyé activé (seul)</i>	90	0,70	0,75
<i>Ciment normalisé (seul)</i>	28	0,60	0,65
<i>Liant spécial (routier seul)</i>	60	0,65	0,70
<i>Cendres volantes-chaux (seules)</i>	90	0,65	0,75
<i>Mélange de liants</i>	90	0,70	0,75

Tableau 1.13 : Coefficients empiriques en fonction de la nature du liant utilisé [Norme NF P98 113].

Les essais de performances mécaniques sont souvent longs à aboutir. L'essai d'aptitude au traitement, décrit dans la norme NF P 94-100, a pour but d'assurer dans un délai relativement court que le matériau compacté présente une stabilité dimensionnelle par la mesure de gonflement et par la mesure de la résistance en traction indirecte. Ces paramètres sont déterminés en fonction du produit utilisé pour le traitement. Les différentes valeurs de référence permettant d'apprécier l'aptitude du matériau au traitement sont présentées dans le Tableau 1.14.

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

Tableau 1.14 : Critères de jugement pour évaluer l'aptitude d'un sol à être traité à la chaux et/ou aux liants hydrauliques (NF P 14-100).

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

Selon la législation européenne [décret N°2002-540 du 18 avril 2002], les sédiments sont considérés comme déchets, leurs utilisations nécessitent une évaluation mécanique et environnementale. Le Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes (SETRA) a proposé un guide méthodologique visant à fournir une démarche d'évaluation de l'acceptabilité environnementale des matériaux alternatifs élaborés à partir de déchets et destinés à être utilisés en technique routière. Une version définitive a été mise en point et déclarée en Novembre 2012 « Acceptabilité de matériaux alternatifs en technique routière, Evaluation environnementale ». (AMATR-Sétra, 2012). Ce guide méthodologique est décliné en guides d'application, directement opérationnels. Il s'adresse aux professionnels des travaux publics et aux industriels qui souhaitent valoriser des déchets en technique routière. Les sédiments peuvent suivre un processus d'élaboration et devenir par la suite un matériau alternatif puis un matériau routier (Figure 1.21). Il est intéressant de définir quelques termes employés dans ce guide.

- Matériau alternatif : Tout matériau élaboré à partir d'un déchet est destiné à être utilisé, seul ou en mélange avec d'autres matériaux,
- Matériaux routier : Tout matériau alternatif ou mélange d'un matériau alternatif avec d'autres matériaux, alternatifs ou non, répondent à un usage routier.

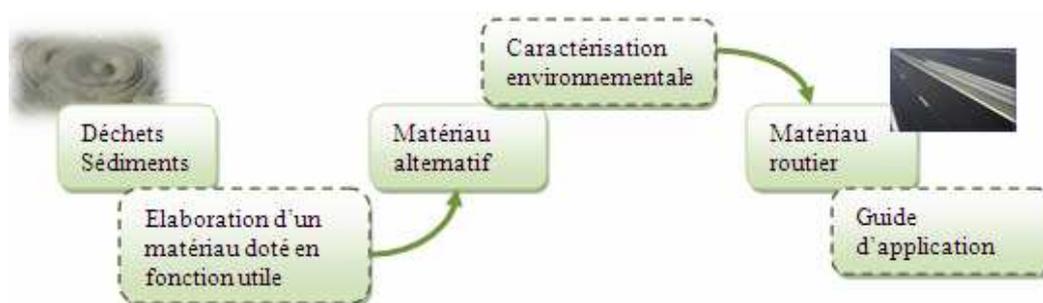


Figure 1.21 : Processus d'évaluation environnementale pour une valorisation en technique routière (ABRIAK.N-E et al, 2011).

A la pratique de ce processus, il faut s'assurer que le matériau alternatif proposé possède des caractéristiques géotechniques et mécaniques requises dans les normes d'usage en technique routière. Le guide d'acceptabilité du matériau alternatif pour un usage en technique routière repose sur trois niveaux d'investigation permettant d'évaluer le risque que présentent les matériaux alternatifs vis-à-vis de l'environnement (Figure 1.22).

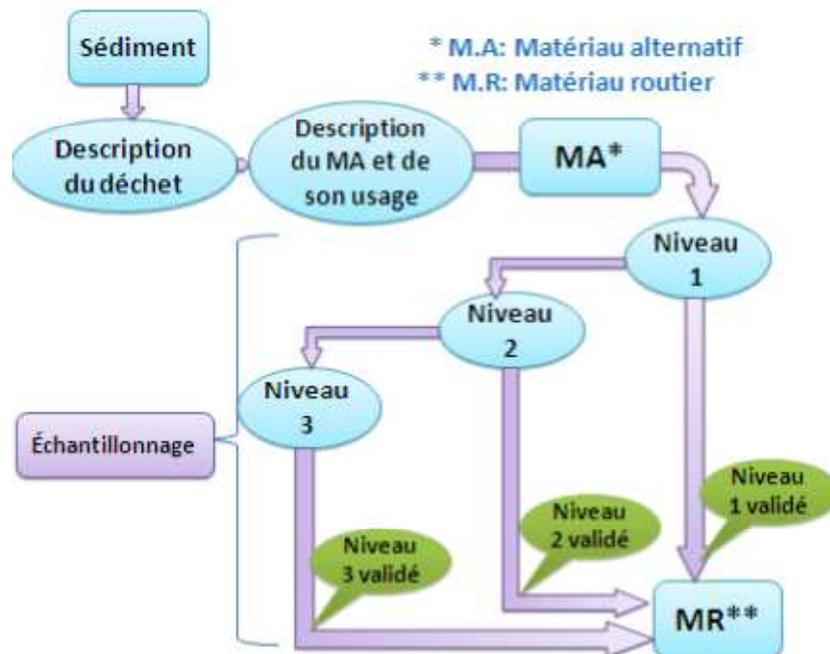


Figure 1.22 : Diagramme de caractérisation environnementale (ACHOUR.R, 2013)

❖ Caractérisation Environnementale Niveau 1

Dans le cadre du Niveau 1, il convient d'étudier la variabilité et d'évaluer le potentiel polluant du matériau étudié à travers l'essai de lixiviation NF EN 12457 «2 ou 4 selon la granulométrie du matériau» et sur l'analyse en contenu total. Lors des analyses de lixiviation ces éléments obtenus sont inférieurs ou égaux aux valeurs limites du tableau 1.15, l'acceptation en technique routière du matériau concerné est validée. Pour l'ensemble des utilisations envisagées pour un matériau alternatif, si au moins un dépassement de ces valeurs est enregistré, l'acceptabilité en technique routière est invalidée, il convient donc d'utiliser la caractérisation environnementale niveau 2 et 3.

Paramètre	Quantité relarguée cumulée à L/S = 10 l/kg (essai de lixiviation NF EN 12 457-2 ou NF EN 12 457-4)	
	Valeurs limites à ne pas dépasser en lixiviation pour être candidat à une utilisation en technique routière (mg /kg de MS)	Valeur à respecter par au moins 100% des échantillons (mg /kg de MS)
As	2	1.5
Ba	100	60
Cd	1	0.12
Cr	10	1.5
Cu	50	6
Hg	0.2	0.03
Mo	10	1.5
Ni	10	1.2
Pb	10	1.5
Sb	0.7	0.18
Se	0.5	0.3
Zn	50	12
Fluorure	150	30
Chlorure	15000	2400
Sulfate	20000	3000
Fraction soluble	60000	12000
PH		[5.5-13.0]
Valeurs limites à ne pas dépasser en contenu total pour être candidat à une utilisation en T.R (mg/kg de MS)		
COT	60000	
BTEX	6	
PCB	1	
HCT	500	
HAP	50	

Tableau 1.15 : Valeurs limites à ne pas dépasser en lixiviation et en contenu totale pour être candidat et pour justifier leur utilisation en technique routière.

❖ Caractérisation Environnementale Niveau 2

Le Niveau 2, permet de justifier l'acceptabilité en technique routière sur la base d'essais de percolation NF CEN/TS 14405. On compare les résultats des essais de percolation obtenus aux valeurs limites du tableau 1.16, qui distingue deux familles d'usages, « sous couche de chaussée ou d'accotement revêtu » et « remblai technique ou en accotement recouverts ». De la même façon s'il y a au moins un dépassement des valeurs limites enregistré, il convient d'envisager la caractérisation environnementale de niveau 3.

Paramètres	Quantité relarguée cumulée L/S=10l/kg (Essai de percolation NF CEN/TS 14405)	
	Scénario« sous couche de chaussée ou d'accortement revêtus »	Scénario« remblai technique ou accortement recouverts »
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] à respecter par au moins 5/7 des percolats [5.5-12.8] à respecter par au moins 6/7 des percolats [5.5-13.0] à respecter les 7 percolats	

Tableau 1.16 : Valeurs limites en percolation permettant de justifier certaines utilisations visées par le présent guide.

❖ Caractérisation Environnementales Niveau 3

Lorsque les niveaux de caractérisation environnementale 1 et 2 ne permettent pas de justifier l'acceptabilité du matériau élaborée en technique routière (matériau alternatif ou routier), le guide méthodologique propose un troisième niveau qui laisse la possibilité de justifier leur acceptabilité en technique routière sur la production d'une étude spécifique. Cette étude spécifique est laissée libre sous réserve que :

- L'étude de l'altération de matériaux et de l'émission des polluants est menée selon les prescriptions de la norme NFEN12920- AL ;
- Le devenir des polluants émis par l'ouvrage via leur transfert dans le sol et dans la nappe, ainsi que leurs effets sur la cible soient étudiés afin de montrer que l'usage routier envisagé permet d'assurer un niveau de protection de l'environnement.

1.7.2 Valorisation des sédiments en matériaux de construction

Les sédiments peuvent représenter une source de matières premières importantes, notamment pour un domaine consommateur de granulats. En fonction des caractéristiques physiques des sédiments, la valorisation des sédiments dans les matériaux de construction peut concerner soit le matériau brut soit après une phase de prétraitement ou de traitement. Par exemple, la partie fine des sédiments peut remplacer l'argile naturelle dans la production des briques, et les sédiments sableux peuvent être utilisés pour la fabrication de béton ou utilisés comme granulats. Des études expérimentales menées ont montré la faisabilité d'incorporation des sédiments dans la production des briques (Figure 1.23). Nous pouvons citer les travaux de SAMARA (SAMARA.M, 2007) qui a incorporé des sédiments fluviaux provenant de la région du Nord-Pas-de-Calais, traités par le procédé NOVOSOL, comme matériaux de substitution au sable et à l'argile. Le laboratoire de Génie Civil et Environnemental de l'université de Georgia aux Etats-Unis a également utilisé des sédiments fluviaux provenant du port de Savannah pour la production de Brique. (MEZENECVOVA.A et al, 2012).



Figure 1.23 : *Processus de fabrication de briques à base de sédiments (a) (MEZENECVOVA.A et al, 2012) et (b) (SAMARA .M, 2007).*

Les sédiments fins ont également fait l'objet de travaux pour la confection de granulats pouvant être utilisés comme renfort granulaire pour le béton ou pour la lutte contre l'érosion du littoral (ZRIA, 2010), (BRAKNI .S, 2008). D'autres études sur la valorisation des sédiments marins en matrice cimentaire ont été réalisées pour la construction de blocs béton à base de sédiments marins (ACHOUR.R, 2013), (Figure 1.24). D'autres applications peuvent

être citées telle que la combinaison de sédiments de dragage fluviaux, de sable de fonderie et de gravas de déconstruction pour la réalisation de mobilier urbain comme illustré sur la figure 1.25.



Figure 1.24. : Bloc de Béton a base de sédiments marins (ACHOUR.R, 2013).

Figure 1.25: Fabrication de béton à base des sédiments fluviaux (NEO-ECO, 2012).

1.7.3 Valorisation des sédiments en éco-modelé paysager

La valorisation des sédiments en éco-modelé paysager est considérée comme l'une des filières innovantes de valorisation des sédiments qui pourrait contribuer à minimiser la quantité des sédiments dragués. Cinq buttes paysagères ont été réalisées à la proximité du port de Dunkerque, faites avec plus 100 000 m³ de sédiments marins (Figure 1.26).



Figure 1.26 : Butte paysagère à base de sédiments marins de GPMD (ACHOUR.R, 2013).

La construction d'une digue a été réalisée en Belgique afin de contrôler l'inondation de la région de Dendermonde en Belgique. Cette valorisation a été réalisée sans stockages des sédiments (ou sans déshydratation) préalable avant la réalisation de l'ouvrage. Une fois le

dragage réalisé, les matériaux ont été pompés directement dans le centre de traitement (Figure 1.27). Ce centre de traitement fonctionne sur mesure, il contrôle en permanence le débit entrant des sédiments et dose automatiquement, après une validation laboratoire, les liants hydrauliques. Les sédiments traités sont transportés directement sur le site de construction. (VAN ZELE.S et al , 2014).



Figure 1.27 : Processeur de valorisation des sédiments fluviaux de la Belgique en digue (Région d'Anvers) (VAN ZELE.S et al , 2014) (PRISMA, 2014).

Il est également possible d'utiliser les sédiments en roselière. Cette valorisation permet de contribuer à la diminution de la quantité de sédiments issus du dragage, la création d'une zone d'abri pour de nombreuses espèces, l'épuration naturelle (fixation des éléments traces métalliques) et la prévention d'inondations. Les sédiments utilisés pour ce type de valorisation ne doivent pas être contaminés. Une roselière a été réalisée à base de sédiments fluviaux en Angleterre dans le cadre du projet européen PRISMA (Coulet.W, 2014) (Figure 1.28).

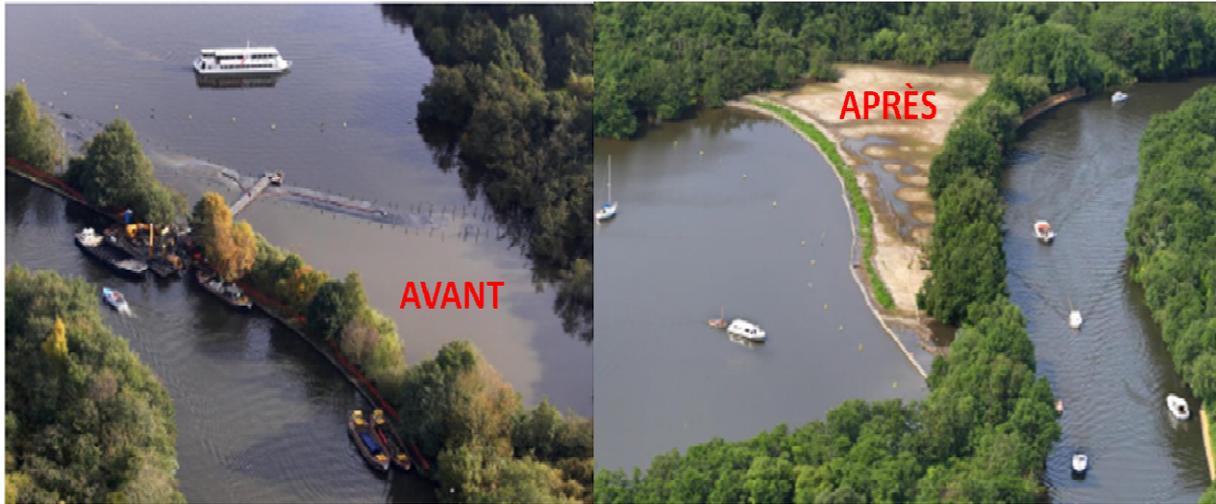


Figure 1.28 : Roselière à base de sédiments fluviaux en Angleterre (Coulet.W, 2014)

1.8 Unité mobile

Aujourd'hui, la plupart des projets de gestions de sédiments s'orientent vers la valorisation de ces matériaux. La caractérisation physico-chimique et géotechnique est une étape très importante dans le processus de gestion des sédiments et leurs valorisations. Cette identification apporte des informations sur le sédiment et permet également d'identifier les traitements et leur voie de valorisation.

Dans le cadre du projet PRISMA, Mines de Douai a développé une unité mobile afin de caractériser les sédiments in situ. L'objectif de cette unité est d'agir avec une rapidité et précision pour caractériser les sédiments et d'évaluer leurs potentiels d'utilisation. L'unité mobile devrait constituer des outils technologiques nécessaires et capables de faire une identification des sédiments dans une journée. La conception de l'unité mobile s'est faite pour tester in situ les sédiments soit à terre ou sur voie d'eau navigable (Figure 1.30). Les instruments nécessaires proposés à intégrer dans l'unité mobile, ainsi que leurs dispositions sont présentés ci-dessous et sur la figure 1.29:

- Micro-onde
- Balances
- Pistolet analyseur d'éléments chimique par fluorescence X,
- Appareil de VBS
- Tamis du 0.63µm au 4 mm
- Granulométrie laser
- Appareil de limite d'Atterberg
- pH mètre,
- GPS,
- Batterie et générateur

Les instruments utilisés pour la conception de cette unité mobile sont présentées en annexe 2.

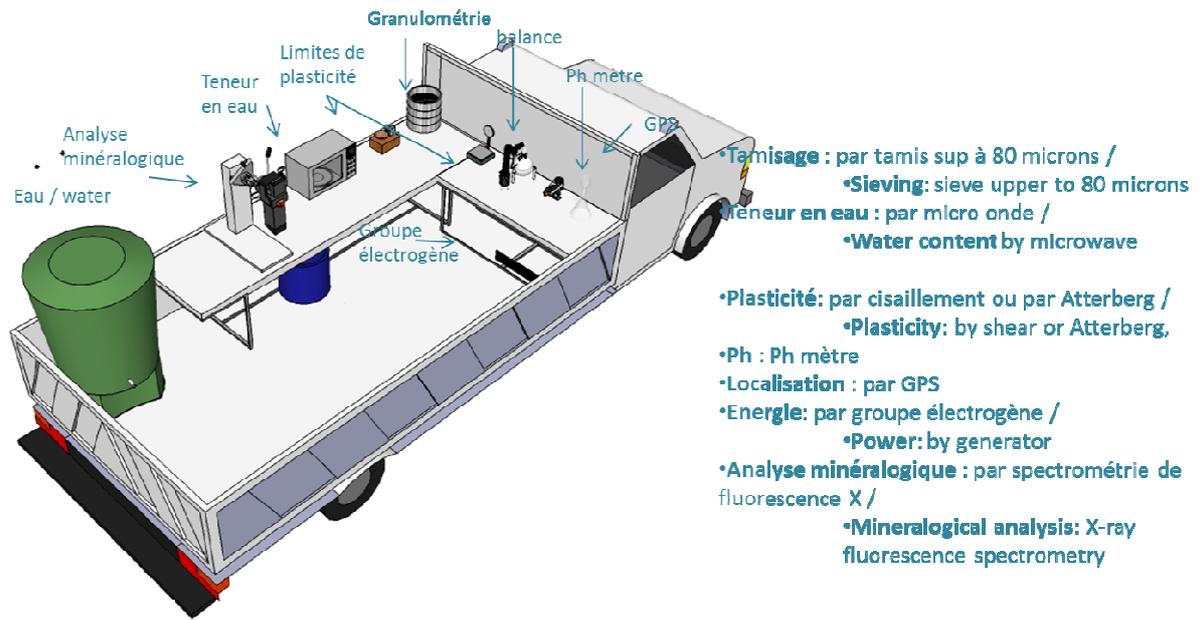


Figure 1.29 : Conception de l'unité mobile.



Figure 1.30 : Exemple d'une unité mobile de caractérisation des sédiments à terre et sur voie d'eau.

1.9 Conclusion

Le curage des sédiments accumulés au fond des rivières est indispensable pour maintenir les activités fluviales et la qualité des eaux. Environ 250 Mm³ de sédiments sont dragués chaque année en Europe (SEDNET, 2011), 50Mm³ en France dont 6 Mm³ sont des sédiments fluviaux. Ces sédiments peuvent être contaminés par des polluants organiques et inorganiques. La gestion de ces quantités importantes de sédiments est confrontée à une réglementation évolutive et souvent contraignante.

Les réglementations régissant la gestion des sédiments fluviaux propres à chaque pays européen sont dissemblables. Ces différences de réglementations sont censées être liées aux spécificités géologiques, historiques, aux apports de sédimentation et aux activités industrielles et humaines de chaque pays et enfin à des considérations politiques.

La déshydratation des sédiments est une opération indispensable afin d'entamer la valorisation de ces matériaux. La déshydratation des sédiments par l'ajout d'adjuvants de floculation (ou polymères) permet d'accélérer la diminution de la teneur en eau pour rendre le matériau exploitable (transport et valorisation). Le choix des polymères est lié aux types de matériaux et aux types d'équipements utilisés lors de l'étape de déshydratation.

Le développement d'une unité mobile pour la caractérisation des sédiments in situ permet de contribuer à l'optimisation de la gestion des sédiments et leurs valorisations par une réponse rapide de caractérisation in situ.

Afin d'évaluer le potentiel d'utilisation des sédiments comme matériaux de construction, une étude de caractérisation physique, chimique, minéralogique et environnementale est nécessaire. Ces études de caractérisation sont présentées dans le chapitre suivant.

Chapitre 2

Caractérisation des sédiments fluviaux

Chapitre 2 Caractérisation des sédiments fluviaux

2 Introduction

L'objectif des travaux présentés dans ce chapitre est l'établissement d'une fiche d'identité des sédiments étudiés. Cette fiche d'identité nous permet de déterminer les caractéristiques physico-chimiques, géotechniques, minéralogiques et environnementales des sédiments en fonction de la valorisation envisagée. Les sédiments présentés et étudiés dans ce qui suit sont ceux provenant des partenaires anglais et belge du projet PRISMA. Les sédiments provenant de la Belgique sont issus de la rivière « Durme » (Figure 2.1 (b)), affluent du fleuve d'Escaut qui se situe à 30 km du port d'Anvers. Ce port possède une position stratégique en Europe pouvant distribuer une grande quantité de marchandises transportées par voie maritime. Les sédiments fluviaux d'Angleterre proviennent de la rivière « Bure » qui est située dans le comté de Norfolk (Figure 2.1(a)). Cette zone est connue d'une forte sédimentation et un trafic de navigation important. Les deux sédiments sont dragués avec la méthode de dragage mécanique. Après l'opération de dragage, les sédiments d'Angleterre sont conditionnés dans des fûts hermétiques de 500 litres, et ceux de la Belgique dans des fûts hermétiques de 54 litres.



(a)

(b)

Figure 2.1 : Sites de prélèvement (a) sédiments de l'Angleterre, (b) sédiments de la Belgique.

2.1 Propriétés physiques des sédiments

2.1.1 Teneur en eau

La teneur en eau décrit l'état hydrique d'un matériau, elle est définie par $W(\%)$. Elle représente un rapport de la masse humide sur la masse sèche (E.q 2.1.). Notons que la concentration en matières solides (C_s) est employée de préférence lorsque l'on parle d'une suspension ou encore d'une pulpe ce qui est le cas des sédiments prélevés. Ce paramètre est désigné par C_s , et exprimé en (g/l) par le rapport de la masse sèche et le volume total (E.q 2.2). La relation qui permet de passer de la concentration en matières solides à la teneur en eau est donnée par la formule suivante :

$$W = \frac{\text{Masse eau}}{\text{masse sèche}} * 100 \quad \text{E.q 2.1}$$

$$Cs \left(\frac{g}{l} \right) = \frac{ms}{V_{eau} + V_{grains}} = \frac{\rho_s}{\frac{\rho_s * W}{\rho_e} + 1} \quad \text{E.q 2.2}$$

Les mesures de teneur en eau ont été réalisées selon la norme NF P 94-050 avec un séchage en étuve à 40°C, 60°C et 105°C jusqu'à stabilisation de la masse du sédiment. Le choix de ces différentes températures a pour but d'évaluer l'effet de la température sur les matériaux. Les résultats moyens de la teneur en eau et la concentration en matières solides sont reportés dans le Tableau 2.1. Les densités sèches calculées sont de 2.45 (g/cm³) et 2.58 (g/cm³) respectivement pour les sédiments bruts de l'Angleterre et de la Belgique (Valeurs présentées dans le Paragraphe 2.2.6).

Sédiments fluviaux	SF-Angleterre			SF-Belgique		
	40°C	60°C	105°C	40°C	60°C	105°C
Température	40°C	60°C	105°C	40°C	60°C	105°C
W(%)	120	127	130	52	56	60
Cs (g/l)	627	608	590	1105	1058	1015

Tableau 2.1 : Etat hydrique initial des sédiments étudiés

On note que les teneurs en eau initiales des sédiments étudiés sont différentes. Le sédiment fluvial de l'Angleterre présente une teneur en eau moyenne de l'ordre de 130 % contre 60% pour le sédiment fluvial de la Belgique. En outre, nous constatons une légère différence de teneurs en eau entre les températures 40°C, 60°C et 105°C pour les deux sédiments présentés précédemment. Ceci pourrait être expliqué par la dégradation de la matière organique entre 40°C et 105°C. Ceci dit, il y'a une consommation de l'eau capillaire à 105 °C.

2.1.2 Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique constitue un premier mode d'identification des sédiments (BOUTOUIL .M, 1998), et un des paramètres clé pour la classification du matériau dans le Guide Technique de Réalisation des Remblais et Couches de Forme (GTR, 1992). Dans cette étude, les distributions granulométriques ont été établies sur le sédiment de l'Angleterre et de la Belgique à l'aide de la méthode de granulométrie Laser Coulter LS230. Le principe de cet appareil est basé sur la diffraction d'un faisceau laser à la rencontre des particules. Ces

particules sont mises en suspension dans une solution de concentration 5% d'hexamétophosphate de sodium, avec une application d'ultrasons pour favoriser la défloculation. L'analyse granulométrie Laser permet d'identifier des particules de tailles comprises entre 0,04 μm et 2000 μm en assimilant des particules à des sphères. L'analyse a été réalisée sur plusieurs dizaines d'échantillons. Nous présentons ci-dessous les distributions granulométriques moyennes de chaque sédiment.

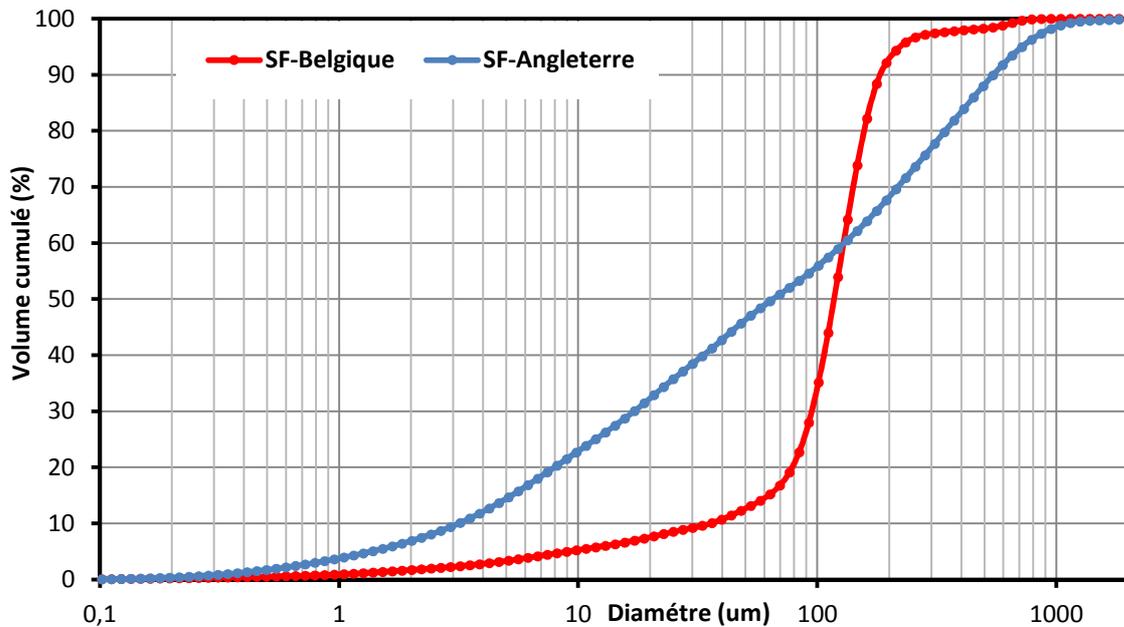


Figure 2.2 : Courbe granulométrique par granulométrie laser des sédiments fluviaux étudiés.

Les deux sédiments étudiés présentent 100% de fractions inférieures à 2 mm. Selon la Figure 2.2, la répartition de la taille des particules montre que le sédiment de l'Angleterre contient une plus forte proportion de fines que le sédiment de la Belgique. Le Tableau 2.2, résume les pourcentages des fractions granulométriques, ainsi que les résultats du coefficient d'uniformité C_u et du Coefficient de courbure C_c . Les valeurs obtenues pour le coefficient d'uniformité C_u montrent que le sédiment de l'Angleterre est supérieur à 6, ce qui nous permet de dire que la granulométrie est étalée. Par contre, le sédiment de la Belgique a une granulométrie uniforme « serrée ». Concernant le coefficient de courbure C_c , les valeurs obtenues sont comprises entre 1 et 3, ce qui correspond à une granulométrie bien graduée.

Taille des grains	Classification [GTR.1992]	SF-Angleterre	SF-Belgique
Grains < 2µm	Argile	6%	2%
2µm < Grains < 63µm	Limon	52%	20%
63µm < Grains	Sable	42%	78%
D_{10} : le diamètre du tamis pour lequel on a 10% de passant		3	30
D_{30} : le diamètre du tamis pour lequel on a 30% de passant		20	100
D_{60} : le diamètre du tamis pour lequel on a 60% de passant		120	150
C_u (Coefficient d'uniformité) = D_{60}/D_{10}		40 > 6	3.5 < 6
C_c (Coefficient de courbure) = $(D_{30})^2 / (D_{10} * D_{60})$		1 < 1,11 < 3	1 < 2,1 < 3
Type de granulométrie		étalée, bien graduée	uniforme, bien graduée

Tableau 2.2 : Distribution granulométrique des sédiments fluviaux.

Selon le diagramme triangulaire de Taylor (Figure 2.3), le sédiment de la Belgique a une texture Sableuse-limoneuse et le sédiment de l'Angleterre a une texture limoneuse – silteuse.

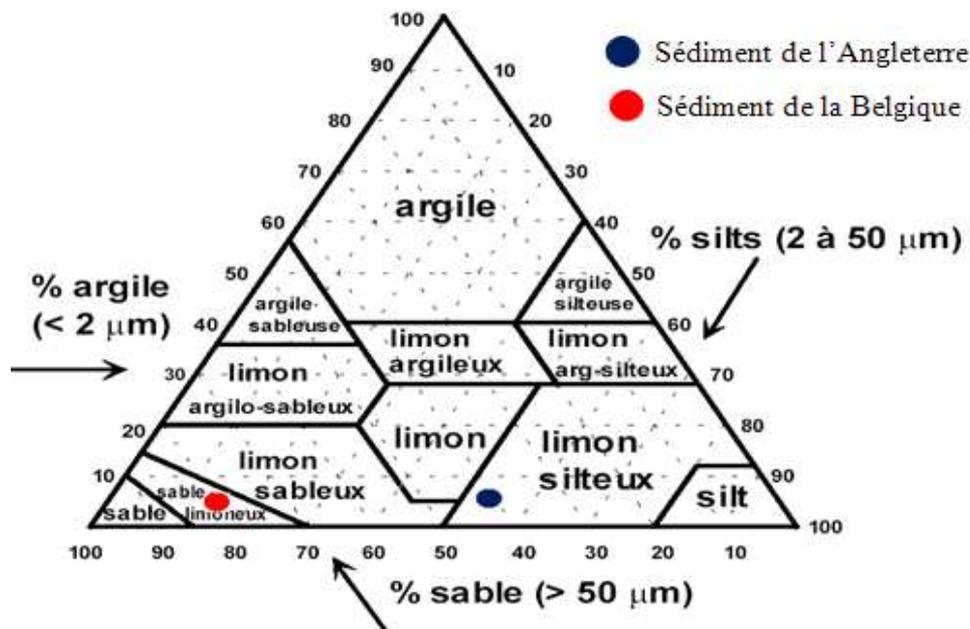


Figure 2.3: Diagramme triangulaire de Taylor de classification des sols fins.

Une comparaison des résultats issus sur les sédiments marins de Grand Maritime Port de Dunkerque (ACHOUR.R, 2013), (DIA .M, 2013) et sédiments du Port autonome de Rouen

(COLIN.D, 2003), montrent que les sédiments marins sont souvent également de type limons-silteux ou limon sableux.

2.1.3 Limites d'Atterberg

Les argiles ont une grande affinité avec l'eau, leur présence peut rendre le sol plus ou moins sensible à l'eau. Les limites d'Atterberg définissent à la fois un indicateur qualifiant la plasticité d'un sol. La détermination de ces limites d'Atterberg a été réalisée selon la norme française NF P 94-051. Le tableau 2.3, présente les moyennes de trois séries d'essais sur les sédiments étudiés.

<i>Sédiments fluviaux</i>	<i>SF-Angleterre</i>	<i>SF-Belgique</i>
<i>Limite de liquidité WL (%)</i>	85	20
<i>Limite liquide Wp (%)</i>	42	10
<i>Indice de plasticités IP (%)</i>	43	10

Tableau 2.3 : Limites d'Atterberg des sédiments étudiés.

D'après les résultats obtenus, on constate que l'indice de plasticité du sédiment de l'Angleterre est largement supérieur à celui du sédiment de la Belgique. Cette distinction pourrait être expliquée par la différence de type de matériau et par la présence de la matière organique.

2.1.4 Valeur au bleu de méthylène

L'essai au bleu de méthylène permet d'évaluer la fraction argileuse dans le sol en mesurant la capacité d'adsorption des molécules de bleu de méthylène à la surface des particules. Cet essai a été réalisé selon la norme NF P94-068 qui définit le principe et le domaine d'application.

Les résultats, présentés dans le Tableau 2.4, montrent que les valeurs mesurées de VBS sur le sédiment de la Belgique sont inférieures à celles du sédiment de l'Angleterre. Ceci confirme la présence de plus d'éléments argileux et de matière organique dans le sédiment de l'Angleterre par rapport à celui de la Belgique.

<i>Sédiments Fluviaux</i>	<i>SF-Angleterre</i>	<i>SF-Belgique</i>
<i>Valeur du bleu de méthylène</i>	2,9	0,75

Tableau 2.4 : Valeur des VBS pour les sédiments Bruts.

Selon 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 2.4. D'après les résultats obtenus, le sédiment de la Belgique est classé dans la catégorie des Sols sableux, le sédiment de l'Angleterre fait partie des Sols limoneux-argileux. En faisant la comparaison des valeurs mesurées sur les sédiments fluviaux du Port autonome de Rouen (COLIN.D, 2003), et celles de Grand Maritime de Port de Dunkerque (DIA .M, 2013), ainsi que les sédiments fluviaux du nord de la France (TRAN.N-T, 2009), on constate que ces derniers sont classés dans la catégorie des Sols limoneux-argileux également.



Figure 2.4 : Classification des sols en fonction VBS.

2.1.5 Teneur en matières organique & Perte au feu

La présence de la matière organique dans les sédiments est une source d'instabilité considérable. Elle peut engendrer une résistance mécanique faible mais surtout un caractère évolutif. Certains chercheurs ont remarqué que la matière organique exerce une influence sur les propriétés géotechniques des sols. En outre, elle peut modifier le comportement de compressibilité et empêche la réaction d'hydratation. (TREMBLAY.H, 1998) ; (ZENTAR .R et al, 2009) (COLIN.D, 2003)). L'estimation du taux de matière organique dans le sédiment est indispensable pour une valorisation en technique routière. La détermination de la teneur en matière organique a été réalisée selon la norme XP P94-047 par calcination à 450°C, et la Perte au feu selon la norme NF EN 12879 à 550°C. Ces essais ont été réalisés sur les deux sédiments étudiés.

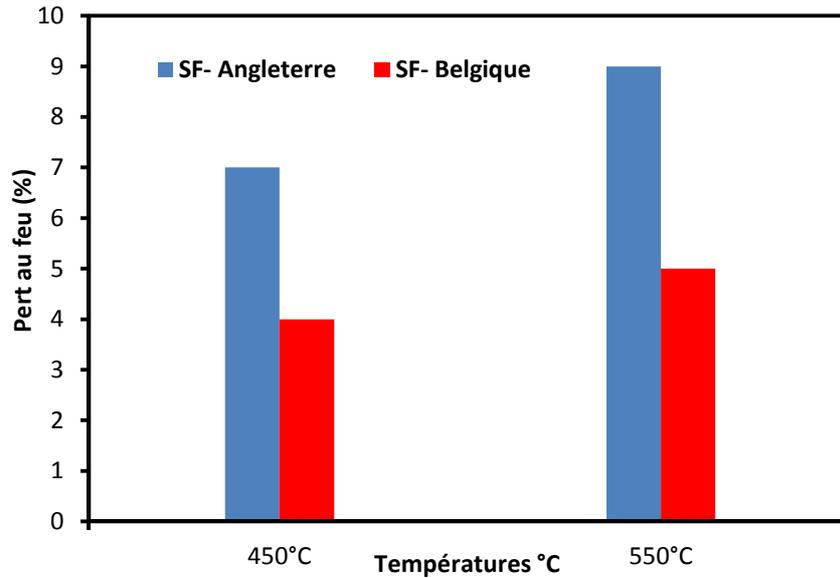


Figure 2.5 : Perte au feu des sédiments fluviaux bruts en fonction de la température pendant 3h.

Les résultats obtenus montrent que la teneur en matière organique par méthode de calcination à 450°C, des sédiments Belgique et Anglais est respectivement de 4% et 7% (Figure 2.5). Les résultats de perte au feu à 550°C suivent la même tendance. Selon le GTR, les sédiments étudiés sont classés comme Sols faiblement organiques F11.

2.1.6 Masse volumique des particules solides (ρ_s)

La masse volumique des particules solides « masse volumique absolue » a été mesurée par un pycnomètre à hélium « MICROMERTICS » de type Accupyc 1330 (Figure 2.6), dont le principe repose sur la loi des gaz parfaits. Cet appareil permet de déterminer le volume des grains contenus dans le pycnomètre à partir d'une masse broyée et séché à 40°C.



Figure 2.6 : Pycnomètre à hélium « MICROMERTICS-ACCUPYC1330 »

L'étude a été menée sur les sédiments fluviaux de la Belgique et de l'Angleterre séchés à 40°C et 450°C. Nous avons enregistré que le sédiment de la Belgique possède une masse volumique absolue plus importante que celle du sédiment de l'Angleterre, et des valeurs inférieures à celle de matériaux standards ($2.65 \text{ g/cm}^3 < \rho_s < 2.7 \text{ g/cm}^3$). Cette différence est liée à la présence de la matière organique dans les deux sédiments. Pour évaluer l'effet de la matière organique sur la densité des grains solides, nous avons effectué la mesure de la masse volumique absolue pour les deux sédiments calcinés à 450°C pendant 3h. Les résultats obtenus montrent une augmentation de la masse volumique des grains solides après calcination (Tableau 2.5).

<i>Sédiments Fluviaux</i>	<i>SF-Angleterre</i>		<i>SF-Belgique</i>	
	<i>Brut</i>	<i>Calciné 450°C</i>	<i>Brut</i>	<i>Calciné 450°C</i>
ρ_s , masse volumiques de solide (g/cm^3)	2,45	2,60	2,56	2,63

Tableau 2.5 : Masse volumique des grains solides des sédiments étudiés bruts et calcinés à 450°C.

2.2 Caractérisation de compactage

2.2.1 Essai Proctor & Indice de Portance Immédiat (IPI).

L'essai Proctor Modifié permet de déterminer la densité volumique sèche maximale ρ_d et la teneur en eau optimale W_{OPM} pour un sol. Le compactage permet de resserrer la texture du sol, réduire les vides, les déformations et d'améliorer sa portance et sa résistance. Le principe de l'essai Proctor consiste à humidifier les sédiments à plusieurs teneurs en eau, et les compacter selon un procédé et une énergie conventionnelle (Figure 2.8(a)). Pour chacune des valeurs de teneur en eau considérée, on détermine la masse volumique sèche du sol, et on établit la courbe des variations de masse volumique en fonction de la teneur en eau, $\rho_d=f(w)$. La masse volumique sèche ρ_d est obtenue à partir de la formule suivante :

$$\rho_d = \frac{P_2 - P_1}{(1+W) * V_{\text{moule}}} \quad \text{E.q 2.3}$$

Avec

- P_2 : Poids du moule avec le matériau arasé compacté
- P_1 : Poids du moule
- W : Teneur en eau
- V_{moule} : Volume du moule

On associe chaque essai de compactage à l'essai de l'Indice Portant Immédiat (IPI(%)). Ce paramètre permet d'évaluer l'aptitude d'un matériau à supporter les charges engendrées par les engins de chantier pendant les travaux. Le principe de l'essai consiste à mesurer la force à appliquer sur un poinçon cylindrique de 19.3 cm² de section. Ce poinçon pénètre à une vitesse constante de 1,27 mm/min dans une éprouvette de matériau compactée. Les mesures d'IPI(%) sont réalisées à l'aide d'une presse hydraulique (Figure 2.7(b)). L'IPI est alors définis par le maximum des deux valeurs suivantes (E.q 2.4) :

$$\frac{\text{effort de pénétration } 2.5 \text{ mm d'enforcement (kN)} * 100}{13.35}$$

E.q 2.4

$$\frac{\text{effort de pénétration } 5 \text{ mm d'enforcement (kN)} * 100}{19.93}$$



(a) Machine de compactage



(b) Presse pour mesurer l'IPI(%)

Figure 2.7 : Appareil Proctor – IPI(%)

Les résultats de l'essai Proctor et de l'indice de portance immédiats IPI(%) des sédiments de l'Angleterre et de la Belgique sont présentés sur les figures 2.8 et 2.9. le Tableau 2.6, indique que le sédiment de l'Angleterre présente une densité sèche à l'optimum plus faible que le sédiment de la Belgique (Figure 2.8 et Figure 2.9). En revanche, la teneur en eau optimale de sédiment du l'Angleterre est plus importante que le sédiment de la Belgique. Ce qui peut s'expliquer d'une part par la différence de leurs masses absolues et d'autre part par la présence de la matière organique comme présenté dans les paragraphes précédents. En ce qui

concerne l'Indice de Portance Immédiat, les valeurs mesurées montrent que le sédiment de la Belgique (IPI(%) = 26%) et sédiments de l'Angleterre (IPI= 19 % ≤ 35%) possèdent des difficultés à supporter la circulation des engins sur chantier à court terme.

Sédiments fluviaux	W_{OPM} (%)	ρ (g/cm ³)	IPI à W_{OPM} (%)
Sédiments Fluviaux de l'Angleterre	18	1,64	19
Sédiments Fluviaux Belgique	14	1,75	26

Tableau 2.6 : Résultats de l'essai Proctor-IPI sur les sédiments bruts

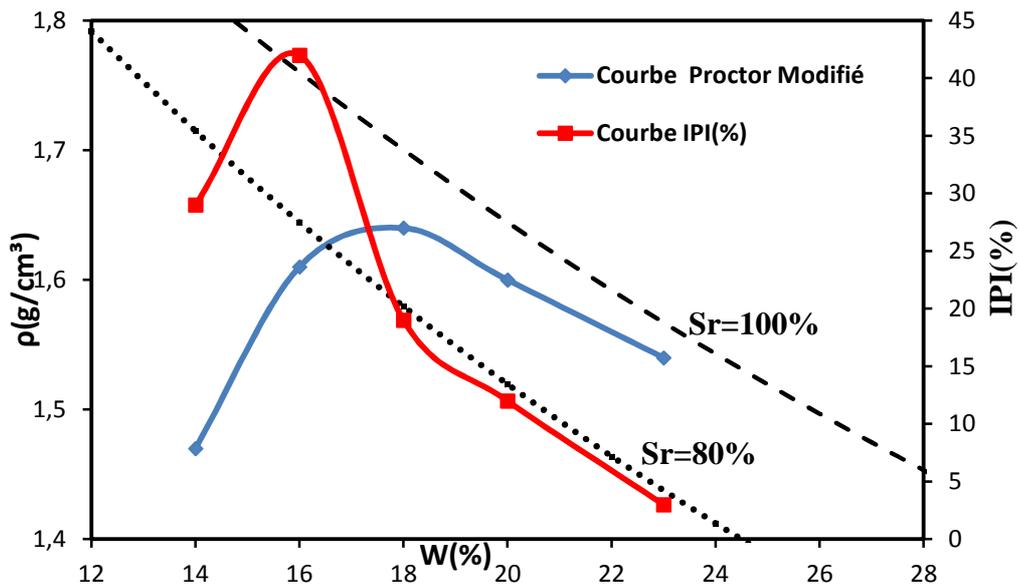


Figure 2.8 : Courbe Proctor – IPI des sédiments bruts de l'Angleterre.

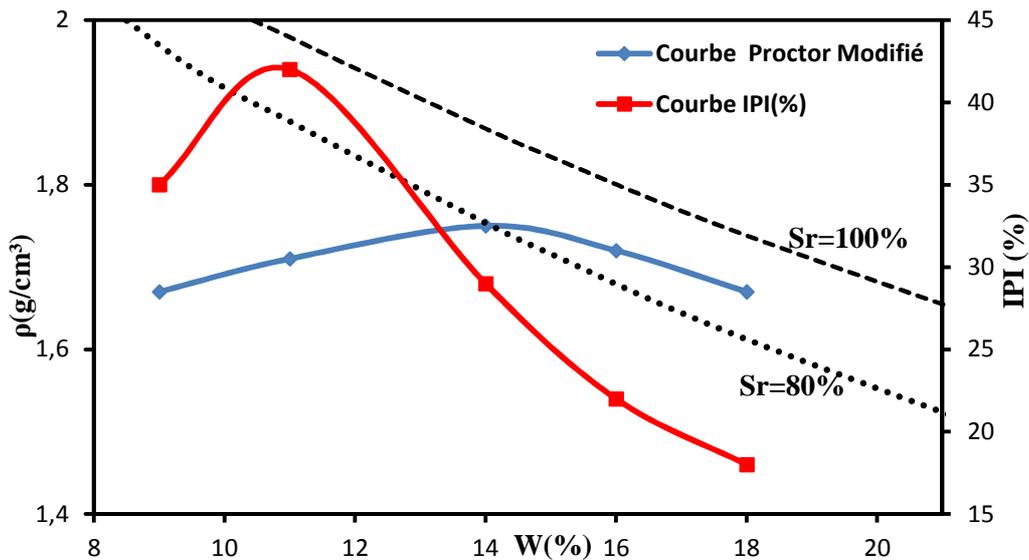


Figure 2.9 : Courbe Proctor – IPI des sédiments bruts de la Belgique.

2.3 Analyse minéralogique et chimique

L'analyse minéralogique a pour but d'identifier et de quantifier les phases cristallisées, ainsi que les composés chimiques contenus dans les sédiments. La bonne connaissance de la composition minéralogique des matériaux de curage est nécessaire afin d'anticiper les phénomènes qui pourraient être provoqués lors du processus de traitement ou de valorisation. Cette analyse a été réalisée selon deux méthodes complémentaires : fluorescence des rayons X et par diffraction des rayons X. Par contre, le carbone est difficile à détecter par fluorescence des rayons X. Pour cela, il est nécessaire de déterminer la teneur en carbone totale, afin d'associer les valeurs de carbone aux valeurs des autres éléments mesurés par fluorescence des rayons X.

2.3.1 Teneur en carbone total

En général, le carbone se trouve sous deux formes : carbone organique et carbone inorganique.

Le C_{org} est produit par des organismes vivants et est lié à d'autres carbones ou à des éléments comme l'hydrogène (H), l'azote (N) ou le phosphore (P) dans les molécules organiques ou les hydrocarbures.

Le C_{inorg} est associé à des composés inorganiques, c'est-à-dire des composés qui n'ont pas été vivants, et qui ne contiennent pas de lien C-C ou C-H, tels que le dioxyde de carbone, l'acide carbonique, l'hydrogénocarbonate et le carbonate. La détermination de la teneur en carbone total se fait par la relation suivante : $C_{total} = C_{inorg} + C_{organ}$

La teneur en carbone organique a été déterminée par le laboratoire Eurofins de Lille sur les deux sédiments, ces teneurs sont respectivement de 2,34 % et 1,20 % pour le sédiment de l'Angleterre et de la Belgique.

Le carbone minéral ou inorganique, a été mesuré sur les sédiments étudiés à travers les analyses thermogravimétriques. L'analyse thermogravimétrique (ATG) est une technique d'analyse thermique qui consiste à mesurer la variation de masse d'un échantillon en fonction de la température. Cet essai est réalisé sur les deux sédiments étudiés. Les analyses sont effectuées sous air avec une vitesse de 3°C/min allant de 20°C jusqu'à 1000°C. Le pourcentage de carbone inorganique est obtenu donc par la relation suivante (E.q 2.5) :

$$C_{inorganique} = \frac{M_c}{M_{CO_2}} * \frac{Perte\ de\ masse}{Masse\ d'échantillon} * 100 \quad E.q\ 2.5$$

La perte de carbone minéral est mesurée entre 600°C et la phase de stabilisation. Selon la Figure 2.10, nous déterminons les pertes de masses qui sont respectivement de 10,62 % et 4,11 % pour le sédiment de l'Angleterre et de la Belgique.

❖ Pour le sédiment de l'Angleterre : $C_{inorganique} = 0,272 * 10,62 = 2,80 \%$

❖ Pour sédiment de la Belgique : $C_{inorganique} = 0,272 * 3,97 = 1,07 \%$.

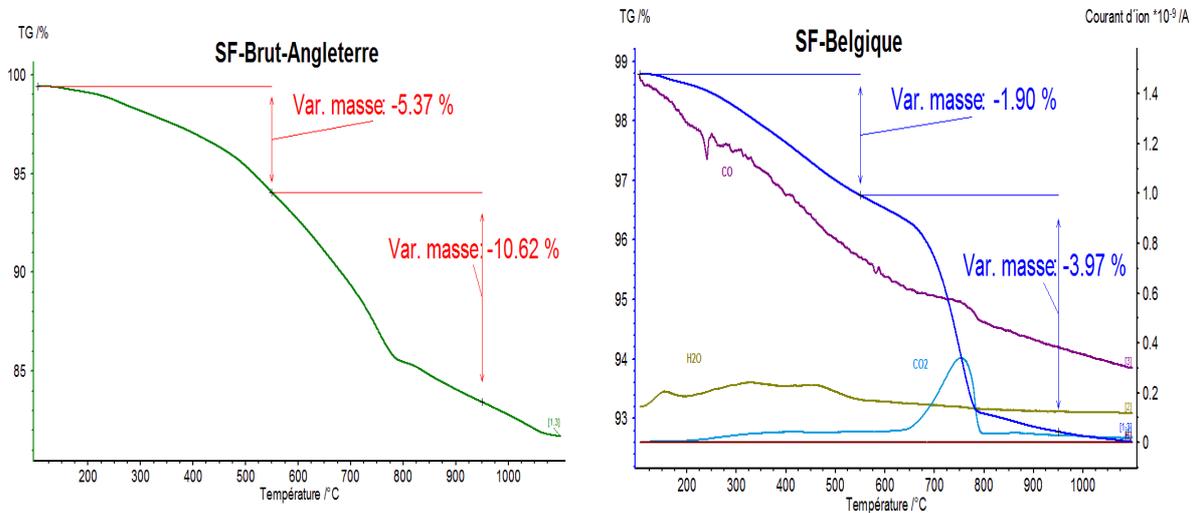


Figure 2.10 : Analyses thermogravimétrique sur sédiment d'Angleterre et de la Belgique.

A partir des résultats du carbone organique et l'analyse thermodynamique ATG, nous pouvons déterminer la teneur en carbone total présent dans les deux sédiments :

❖ Teneur en carbone total du sédiment de l'Angleterre : $C_{total} = 2,80 + 2,30 = 5,10 \%$

❖ Teneur en carbone total du sédiment de la Belgique : $C_{total} = 1,07 + 1,20 = 2,27 \%$

2.3.2 Analyse par Fluorescence des rayons X (FRX)

La spectrométrie de fluorescence des rayons X est une technique d'analyse élémentaire qui permet de qualifier et quantifier les éléments chimiques présents dans un matériau.

Les analyses de fluorescence par rayons X ont été effectuées sur les sédiments de l'Angleterre et de la Belgique. Le Tableau 2.7 présente les résultats de l'analyse par fluorescence X. Les éléments chimiques présents dans les deux sédiments étudiés sont similaires, et les constituants principaux sont l'oxygène, le silicium, le calcium, le fer et l'aluminium.

<i>Eléments</i>	<i>Sédiment d'Angleterre</i>	<i>Sédiment de la Belgique</i>
<i>C</i>	5,10	2,27
<i>O</i>	49	52
<i>Na</i>	1,00	0,55
<i>Ca</i>	1,20	4,80
<i>Mg</i>	7,10	0,50
<i>Al</i>	20,20	3,00
<i>Si</i>	5,00	34,00
<i>P</i>	2,65	0,40
<i>Fe</i>	0,84	2,10
<i>S</i>	0,65	0,50
<i>K</i>	1,98	1,40
<i>Cl</i>	7	Traces
<i>Ti</i>	0,46	Traces
<i>Mn</i>	Traces	Traces
<i>Ba</i>	Traces	Traces
<i>Cu</i>	Traces	Traces
<i>Zn</i>	Traces	Traces
<i>Sr</i>	Traces	Traces

Tableau 2.7 : Composition élémentaire des sédiments fluviaux.

2.3.3 Analyse par diffraction de rayons X

L'analyse minéralogique par diffraction des rayons X a été utilisée dans le but de déterminer les phases cristallines présentes dans les sédiments fluviaux de l'Angleterre et de la Belgique. L'appareillage utilisé est un diffractomètre SIEMENS D 8. L'échantillon de sédiment est broyé, tamisé à 40µm et bombardé par un faisceau de rayons X. On mesure l'angle par rapport au rayonnement incident des rayons X diffractés ainsi que l'intensité des rayonnements X diffractés.

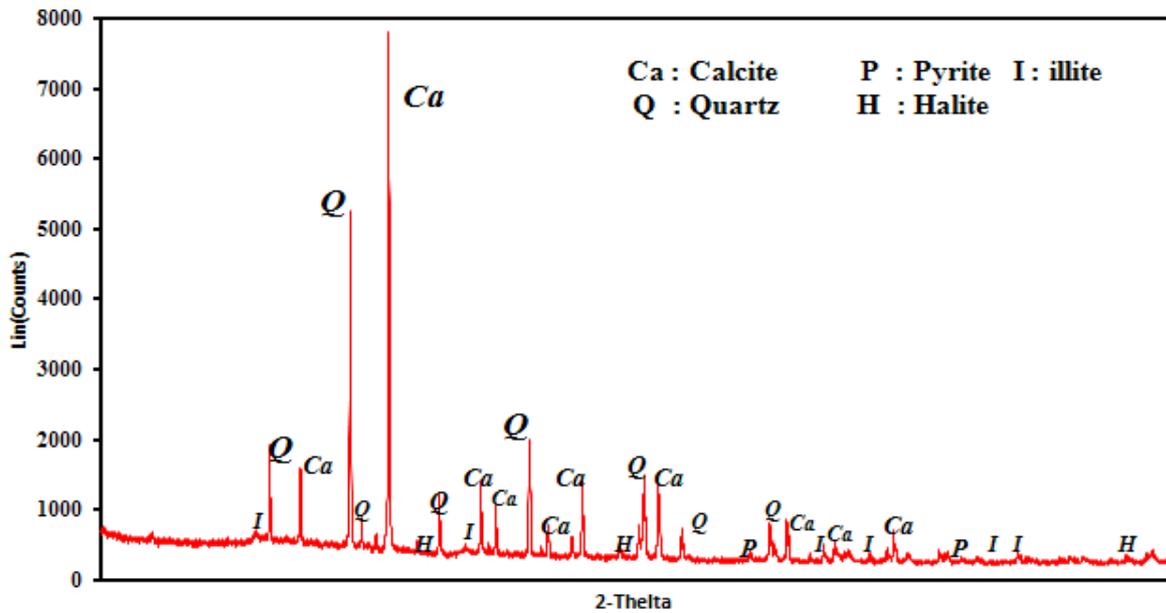


Figure 2.11 : Diffractogrammes des rayons X des sédiments fluviaux de l'Angleterre.

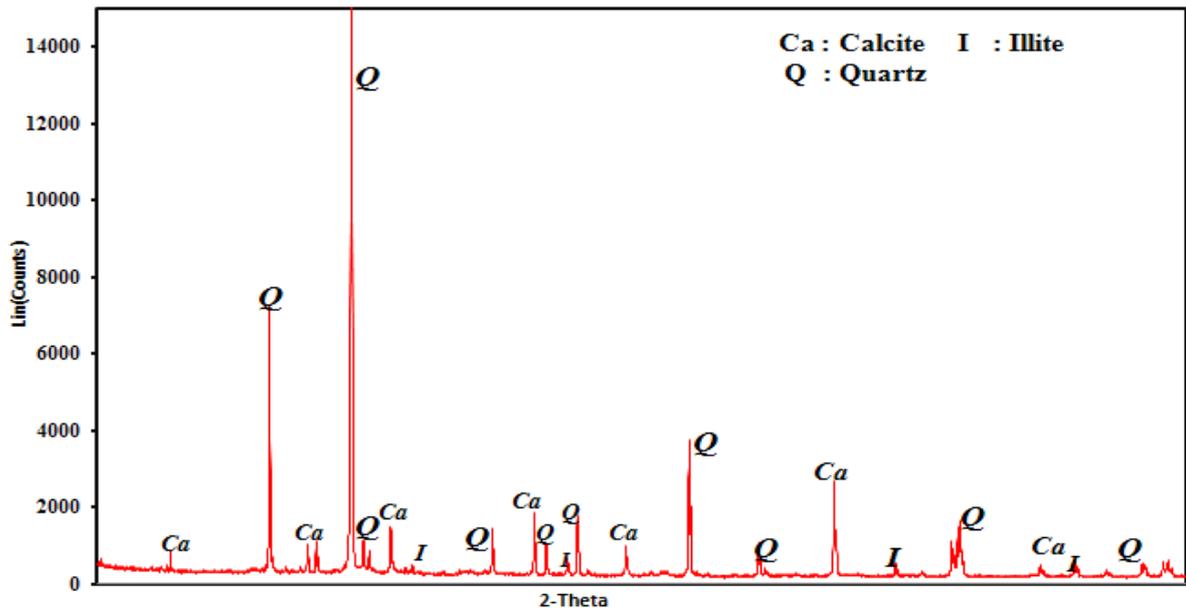


Figure 2.12 : Diffractogrammes des rayons X des sédiments fluviaux de la Belgique.

L'analyse du diffractogramme (Figure 2.11, Figure 2.12) obtenue permet de mettre en évidence les principales phases minéralogiques des sédiments étudiés qui sont la calcite (CaCO_3) et le quartz (SiO_2). La calcite est majoritaire vis-à-vis du quartz dans le sédiment de l'Angleterre ce qui n'est pas le cas pour le sédiment de la Belgique.

2.4 Classification des sédiments fluviaux

Les caractéristiques physiques, chimiques et géotechniques mesurées dans cette étude ont été utilisés pour apprécier le potentiel d'utilisation ces sédiments en technique routière. Les résultats obtenus sont synthétisés dans le tableau 2.8.

<i>Paramètres</i>	<i>Sédiments fluviaux de l'Angleterre</i>	<i>Sédiments fluviaux de la Belgique</i>
<i>Matière organique (%) à 450°C</i>	7	4
<i>Pert au feu (%) à 550°C</i>	9	5
<i>Limite de Liquidité (WL%)</i>	85	20
<i>Limite de Plasticité (Wp%)</i>	42	10
<i>Indice de plasticité (Ip%)</i>	43	10
<i>Bleu de méthylène (VBS)</i>	2,90	0,75
<i>Grains < 2µm (Argile)</i>	6%	1%
<i>2µm < Grains < 63 µm (limon)</i>	52%	16%
<i>63 µm < Grains (Sable)</i>	42%	83%
<i>WOPM (%)</i>	20	13
<i>ρd OPM (g/cm³)</i>	1,66	1,75
<i>IPI (%)</i>	19	26
<i>Minéraux principaux</i>	Quartz, Calcite	

Tableau 2.8 : Synthèse des caractéristiques des sédiments fluviaux.

Selon le GTR, le taux de la matière organique (Pert au feu) est supérieur à 3% pour les deux sédiments. Ce résultat nous permet de classer ces matériaux comme sols faiblement organiques F et plus précisément dans la sous classe F11. En se basant sur les valeurs des données géotechniques, d'un point de vue granulométrique, le sédiment de l'Angleterre est un matériau à caractère fin (passant à 80µm > 35%). Ce sédiment a un comportement assimilable à celui de la classe A. La sous-classe est déterminée selon l'indice de plasticité Ip et la valeur de VBS. Le sédiment de l'Angleterre peut être classé en sous-classe A4F11 (Figure 2.13). Le sédiment de la Belgique se positionne dans la classe B dont le diamètre maximal est inférieur à 50 µm et le passant à 80µm est compris entre 12% et 35%. La sous classe a été réalisée selon les résultats de VBS, donc il est possible de classer le sédiment de la Belgique en sous-classe B5F11 (Figure 2.13). D'autre part, selon le GTR, les sédiments de l'Angleterre et de la Belgique sont normalement inutilisables en technique routier dans l'état. Il est indispensable

d'atténuer les paramètres de nature tels que l'argilosité, la teneur en matière organique (M.O.) et la teneur en eau initiale, pour une utilisation en technique routière.

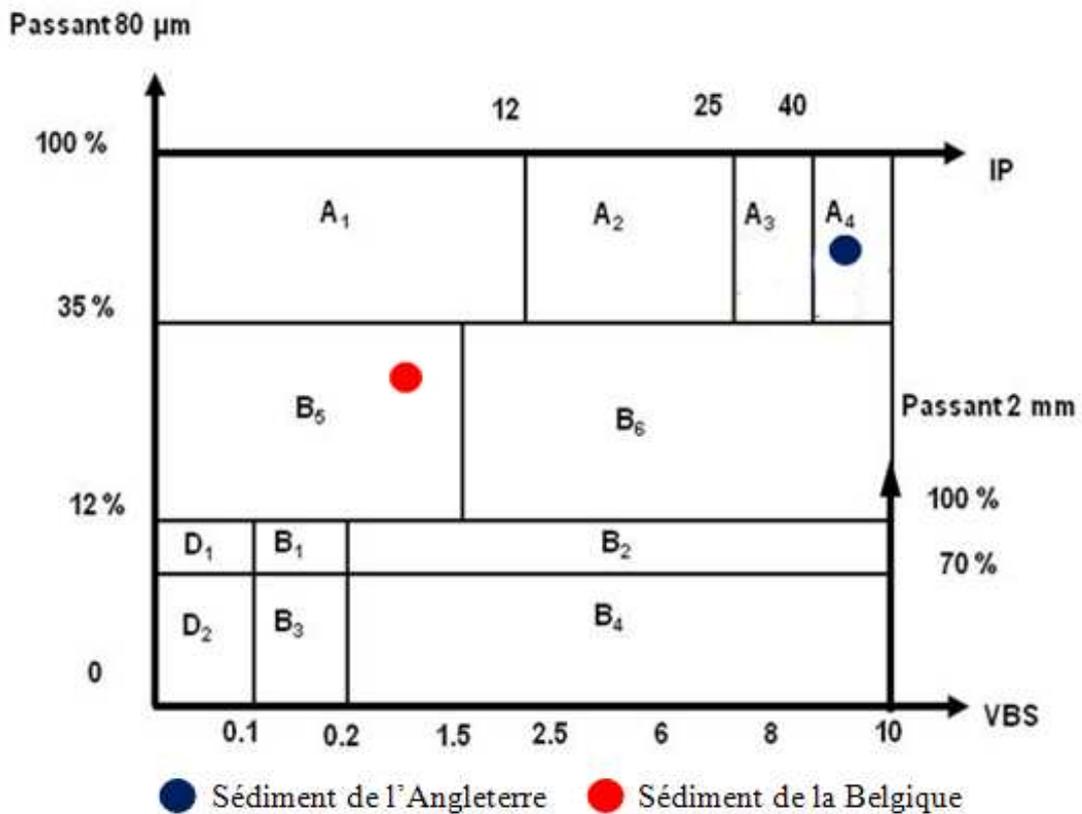


Figure 2.13 : Classification des sédiments Bruts selon GTR.1992.

En faisant la comparaison avec les résultats précédents des études menées sur les sédiments marins du Dunkerque GPMD (ACHOUR.R, 2013) et sédiments marins du Port autonome de Rouen (COLIN.D, 2003), nous constatons que tous les sédiments cités sont de classe A. (Tableau 2.9)

Paramètres	Sédiment Marin De Haver		Sédiment GPMD	Sédiment fluviaux Nord de France
	A001	B001		
Matière organique (%) à 450°C	10,30	4,80	9,20	7,20
Pert au feu (%) à 550°C	-	-	-	8,30
Limite de Liquidité (WL%)	71	36	111	49
Limite de Plasticité (Wp%)	36	21	51,8	28
Indice de plasticité (Ip%)	35	15	59	21
Bleu de méthylène (VBS)	3,30	1,20	3,20	4,20
Grains < 2µm (Argile)	7,30	20,20	10	20
2µm < Grains < 63 µm (limon)	38,00	67,40	55	70
63 µm < Grains (Sable)	54,70	12,40	35	9
WOPM (%)	W _{OPN} = 23	W _{OPN} = 20	20,80	17
ρd OPM (g/cm ³)	1,51	1,59	1,55	1,81
IPI (%)	13	5	17	22
Minéraux principaux	Quartz- Calcite			
Classification GTR	A3-F12	A4-F11	A4-F11	A2-F11

Tableau 2.9 : Etude comparative des caractéristiques physiques des différentes sédiments

2.5 Analyse environnementale

L'Analyse environnementale des sédiments concerne essentiellement les métaux lourds, les PCBs et les hydrocarbures HAP. Dans le cadre de cette étude, et en fonction de la valorisation envisagée, l'évaluation de l'impact environnementale des sédiments bruts a été étudiée selon le guide d'acceptabilité des matériaux alternatifs en technique routière, qui se base sur l'essai de lixiviation (NF EN 12457-2). L'essai de lixiviation a été réalisé sur un échantillon de 100 g de sédiments sec de granulométrie inférieure à 4 mm, et mis dans un 1L d'eau déminéralisée. Le mélange (L/S =10 l/kg) est soumis à une agitation constante de 60 cycles par minute pendant 24h. Au terme de cette opération, l'éluât est séparé du matériau résiduel par centrifugation, puis filtré avec un filtre de 0,45 µm. Les solutions récupérées de sédiments sont analysées par l'ICP (Inductively Coupled Plasma-Atomic) pour les métaux lourds (As, Ba, Cd, Cr, Cu, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Zn), et par chromatographie ionique pour les concentrations en chlorures, en sulfates et en fluorures. Enfin, les analyse BTEX, PCB, HCT, HAP ont été faites à l'Institute Pasteur sur la masse solide brute. Les résultats des essais de

lixiviation sont présentés dans le Tableau 2.10. Les valeurs des éléments traces dans la fraction extraite de l'éluât sont exprimées en mg/kg de matière sèche. Les paramètres organiques qui sont exprimés en mg/kg de MS sont obtenus par des essais sur matériaux solides présentés dans le Tableau 2.11.

<i>Éléments</i>	<i>SF- Angleterre (mg/kg)</i>	<i>SF- Belgique (mg/kg)</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</i>
<i>As</i>	0,19	0,31	1,50	2
<i>Ba</i>	0,55	0,43	60	100
<i>Cd</i>	0,01	0,01	0,12	1
<i>Cr</i>	0,02	0,07	1,5	10
<i>Cu</i>	0,34	0,17	6	50
<i>Hg</i>	<0,001	<0,001	0,03	0.2
<i>Mo</i>	0,17	0,29	1,50	10
<i>Ni</i>	0,08	0,08	1,20	10
<i>Pb</i>	0,06	0,03	1,50	10
<i>Sb</i>	0,05	0,10	0,18	0,70
<i>Se</i>	0,07	0,05	0,30	0,50
<i>Zn</i>	0,13	0,61	12	50
<i>fluorures</i>	15	20	30	150
<i>Chlorures</i>	8140	36	2400	15000
<i>sulfates</i>	1540	270	3000	20000
<i>fraction soluble</i>	18886	4300,00	12000	60000
<i>PH</i>	7,95	8,5	-	[5.5-13]

Tableau 2.10 : Analyses des éluâts de sédiments bruts et valeurs limites de lixiviation pour être candidat à une utilisation en technique routière (Guide Sétra, 2012).

<i>Eléments</i>	<i>SF- Angleterre (mg/kg)</i>	<i>SF- Belgique (mg/kg)</i>	<i>Valeurs limites à ne pas dépasser en contenu total pour être candidat à une utilisation en T.R</i>
<i>COT</i>	23400	12000	60000
<i>PCB</i>	<0,07	<0,07	1
<i>BETX</i>	<0,25	<0,25	6
<i>HCT</i>	241	350	500
<i>HAP</i>	1,18 < x < 1,21	-	50

Tableau 2.11 : Analyse chimique sur le contenu total des sédiments bruts (mg/Kg de MS).

Selon le guide Acceptabilité de matériaux alternatifs en technique routière (AMATR-Sétra, 2012), les deux sédiments peuvent être candidats pour utilisation en technique routière. Les analyses des lixiviations sur le sédiment brut de la Belgique ne dépassent pas le seuil de Niveau 1 fixé par le guide, par conséquent leur acceptabilité environnementale est validée. Concernant le sédiment de l'Angleterre, la concentration du Chlorures et la fraction soluble dépassent le seuil de Niveau 1.

2.6 Conclusion

La valorisation des sédiments en technique routière nécessite une connaissance de leurs caractéristiques physico-chimiques, géotechniques, minéralogiques et environnementales.

Ce chapitre, nous a permis d'établir une fiche d'identité des sédiments provenant de l'Angleterre et de la Belgique. Selon le guide GTR, la répartition granulométrique, le VBS et l'indice de plasticité nous permettent de classer les sédiments de l'Angleterre en classe A4 (matériau argileux très plastique), et le sédiment de la Belgique en classe B5 (Sols sableux très silteux). La teneur en matière organique a été déterminée par la méthode de calcination à 450°C et 550°C, ce ci nous a permis de classer les deux sédiments comme sols faiblement organique. Les minéraux présents sont principalement le Quartz et la Calcite.

Selon le guide méthodologique d'acceptabilité des matériaux alternatifs en technique routière, nous avons déterminé l'impact environnemental des sédiments. La concentration des éléments traces des sédiments provenant de la Belgique est inférieure au seuil N1 préconisé par le guide. Pour le sédiment de l'Angleterre, hormis le taux de Chlorures et de la Fraction soluble, ce matériau pourrait être validé environnemental, pour une éventuelle utilisation en technique routière.

Pour employer les sédiments de l'Angleterre et de la Belgique en technique routière, il est indispensable d'améliorer les paramètres de nature de ces sédiments tels que la teneur en eau,

la teneur en matière organique (M.O.) et la composition granulométrique, par un traitement aux liants hydrauliques et par l'ajout de correcteurs granulaires. Il est également nécessaire de réduire la teneur en eau du matériau. Pour réduire cette teneur en eau et accélérer le processus de déshydratation, l'ajout d'adjuvant de floculation (polymères) est envisagé. Cette étude de déshydratation est présentée dans le chapitre suivant.

.

Chapitre 3

Prétraitement et séparation des phases solides –liquides des sédiments fluviaux

Chapitre 3 : Prétraitement et Séparation des phases solides –liquides des sédiments

3 Introduction

Les sédiments de curage contiennent généralement une teneur en eau initiale élevée liée aux méthodes de dragage et au type de sédiment dragué. Cette forte quantité d'eau pose des problèmes de stockage, de transport et de valorisation. La diminution de cette quantité d'eau est indispensable pour simplifier la gestion des sédiments. Plusieurs techniques existent pour diminuer la teneur en eau des sédiments pouvant s'opérer par voie de séchage naturel à moindre coût, par voie chimique et/ou thermique (LEVACHER .D & DHERVILLY.P, 2010). Cette partie expérimentale est consacrée à la diminution de la teneur en eau des sédiments par voie de séchage naturel, avec et sans l'addition des polymères. L'objectif consiste, d'une part à évaluer les performances de conditionnement par l'ajout de flocculants /polymères afin de diminuer la teneur en eau, et d'autre part, d'estimer leurs influences sur les propriétés physico-chimiques et environnementales des sédiments. Pour parvenir à ces objectifs, d'abord nous nous intéressons à la sédimentation des sédiments bruts de l'Angleterre et de la Belgique à travers les essais de décantation. Ensuite, nous avons analysé un processus de floculation des sédiments qui consiste principalement à sélectionner le polymère le plus efficace avec un dosage optimal. Également, une étude de sédimentation des sédiments flocculés a été réalisée. Par la suite, nous avons entrepris le suivi des teneurs en eau des sédiments (flocculés et bruts) et analysé les qualités des eaux percolées respectives. Enfin, nous avons étudié les propriétés physico-chimiques, géotechniques et environnementales des sédiments déshydratés par l'ajout des polymères.

3.1 Sédimentation du matériau

3.1.1 Courbe de sédimentation

La décantation est une opération de sédimentation des particules solides dans un liquide obéissant à loi de Stokes sous l'action de la pesanteur. Les facteurs principaux qui réagissent sur la séparation solide-liquide sont : la taille des particules solides et leurs distributions, la concentration en solides, la différence de densité entre solide-liquide et la viscosité du liquide (Svarovsky, 1977). L'objectif général de la décantation est de mener une séparation solide-liquide qui donne une phase liquide sans particules colloïdales, et un solide plus dense avec

une teneur en solide plus élevée. La sédimentation d'une suspension est représentée par la variation temporelle de la hauteur de l'interface (h) qui sépare la phase solide-liquide. La courbe $h=f(t)$ présente quatre domaines (Voir la figure 3.1).

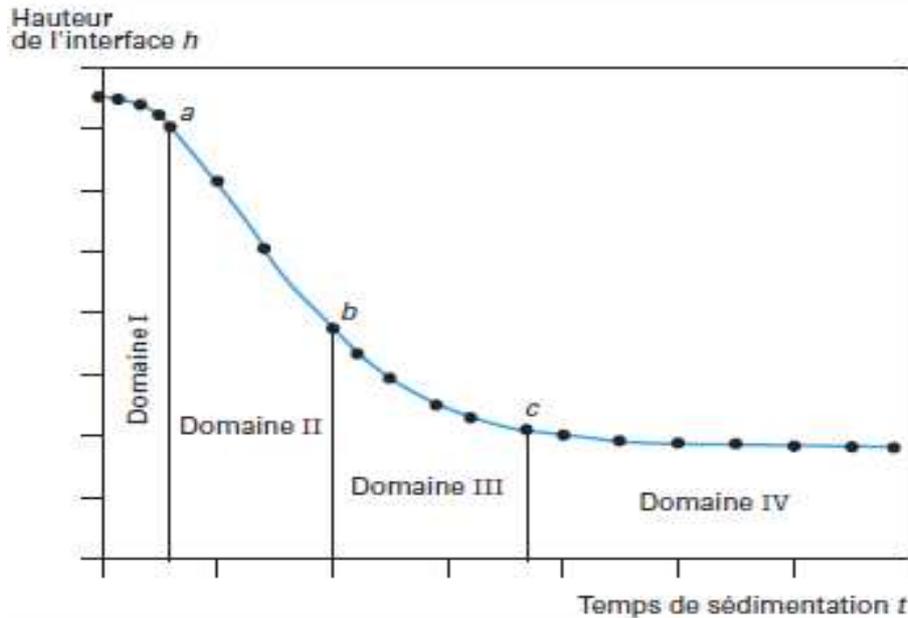


Figure 3.1 : Courbe générale de sédimentation.

Le Domaine I : correspond à la durée initiale de la floculation et souvent inexistant si la floculation est rapide ;

Le Domaine II : illustre la phase où les floes commencent le rassemblement en flocons. La vitesse de la décantation est constante. Elle s'écrit sous la forme :

$$V = \frac{hb-ha}{tb-ta} = CSt \quad \text{E.q 3.1}$$

Le Domaine III représente une perturbation des floes-particules qui apparaissent à partir du point b. Il s'agit d'une diminution progressive de la vitesse qui signifie une augmentation de la concentration en surface en cours du temps.

Le Domaine IV est appelé zone de compression. Le point C est le début de la consolidation et d'apparition des contraintes effectives.

3.1.2 Etude expérimentale sur les sédiments fluviaux: méthode de Kynch

La méthode de Kynch permet d'étudier l'évolution temporelle de la sédimentation de suspension. Ainsi, nous pouvons déterminer la vitesse de sédimentation et la concentration en surface en chaque instant. Cette théorie est basée sur une méthode graphique permettant de déterminer de la concentration en surface et la vitesse de la sédimentation. La pente des tangentes à la courbe représente la vitesse de la sédimentation, tandis que leurs intersections avec l'axe des ordonnées permettent de déduire la concentration locale en solide. La concentration à l'interface solide-liquide et la vitesse de la sédimentation au point (a) s'expriment ainsi :

$$C_a = \frac{C_i \cdot H_i}{x_a} \quad \text{et} \quad V_a = \frac{H_a - h_i}{t_a - t_i} \quad \text{E.q 3.2}$$

C_i : Concentration initiale de la suspension (g/l).

H_i : Hauteur initiale de la suspension.

3.1.3 Sédimentation libre des sédiments fluviaux

Les essais de décantation en colonne ont été effectués sur les sédiments de l'Angleterre et de la Belgique. Cet essai consiste à la mise en œuvre du sédiment à concentration C_i dans un tube transparent d'une hauteur de 50 cm et d'un diamètre de 9 cm (Figure 3.2). Les suivis des décantations ont été réalisés sur deux concentrations différentes, une concentration à 300 g/l et une concentration initiale (lors de la sortie du drague). Les choix de ces concentrations servent à comparer la vitesse de sédimentation libre entre les deux sédiments et évaluer l'effet de la concentration sur cette vitesse. Les concentrations initiales retenues et les hauteurs initiales sont présentées dans le tableau 3.1.

<i>Sédiments fluviaux</i>	<i>SF –Angleterre</i>		<i>SF-Belgique</i>	
<i>Concentration (g/l)</i>	300	590	300	1015
<i>Hauteur initiale (mm)</i>	400	300	400	300

Tableau 3.1 : Hauteurs et concentration initiales des sédiments étudiés.

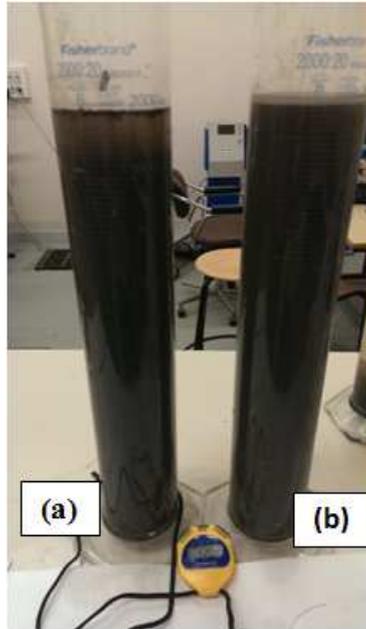


Figure 3.2 : Colonnes des sédimentations des sédiments de la Belgique (a) et de l'Angleterre (b) dont la concentration est à 300 g/l.

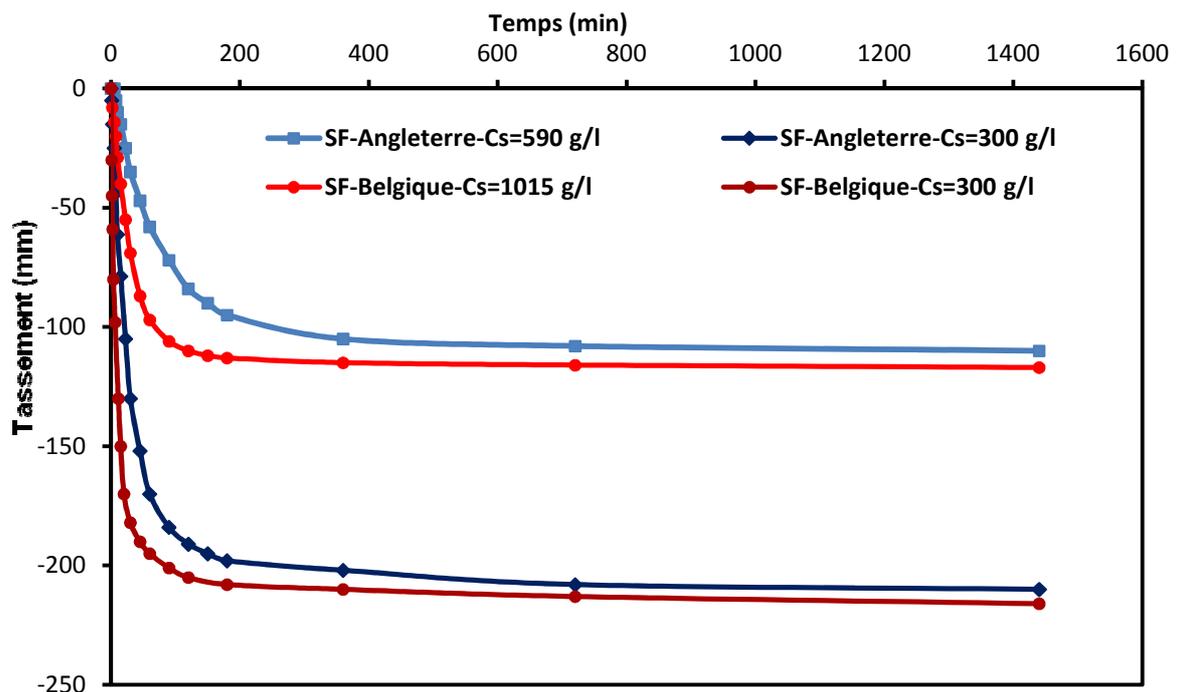


Figure 3.3 : Tassement des sédiments étudiés à différentes concentrations au bout de 24h.

Les courbes de tassement des sédiments étudiés, des différentes concentrations, relatives à une période de 24h sont présentées dans la Figure 3.3 (période de 3 jours présentées dans l'annexe 3) et leurs vitesses de sédimentation libre sont présentées dans le Tableau 3.2.

Nous remarquons que l'évolution du tassement des sédiments de la Belgique est plus rapide que ceux de l'Angleterre. La vitesse de tassement a diminué avec l'augmentation de la concentration des sédiments. Nous pouvons conclure que les sédiments de l'Angleterre sont plus fins que les sédiments de la Belgique. Ces résultats sont confirmés par les résultats d'analyses granulométriques. Les vitesses de sédimentation libre des sédiments étudiés sont présentées dans le tableau 3.2.

<i>Sédiments fluviaux</i>	<i>SF-Angleterre</i>		<i>SF-Belgique</i>	
<i>Concentration (g/l)</i>	300	590	300	1015
<i>Temps (min)</i>	60	180	30	90
<i>Vitesse libre (mm/min)</i>	3	0,70	5,80	1,25

Tableau 3.2 : Caractérisation de sédimentation libre des sédiments pour des concentrations à 300 g/l et lors de la sortie de drague.

A la fin de chaque essai de sédimentation, nous avons déterminé les concentrations finales en utilisant les mesures des teneurs en eau et nous les avons comparés avec les concentrations calculées à partir de la méthode de Kynch. Pour cela, nous avons siphonné l'eau surnagée de chaque tube et nous avons prélevé les sédiments à l'aide d'une spatule afin de mesurer les teneurs en eau et déduire la concentration à partir de la relation $C_s = f(W(\%))$ (Eq 2.2). Les résultats sont présentés dans le Tableau 3.3 et montrent une bonne concordance entre les concentrations obtenues à partir de la mesure de la teneur en eau et celles calculées à partir de la méthode de Kynch.

<i>Sédiments fluviaux</i>	<i>Teneur en eau au bout de 3 jours (%)</i>	<i>Concentration calculée à partir de W mesuré (g/l)</i>	<i>Concentration calculée par la méthode de Kynch (g/l)</i>
<i>SF-Angleterre – 590 g/l</i>	58%	1011	985
<i>SF-Angleterre – 300 g/l</i>	120%	621	631
<i>SF-Belgique - 1015 g/l</i>	24%	1593	1645
<i>SF-Belgique - 300 g/l</i>	118%	638	648

Tableau 3.3 : Comparaison entre les concentrations mesurées et calculées.

3.2 Etude de la floculation des sédiments

3.2.1 Protocole d'essai

A l'échelle industrielle, le choix de polymère et son dosage est réalisé d'une manière empirique avec une simple constatation visuelle sur la qualité de floc, la limpidité d'eau ainsi que sur la consommation de réactifs pour obtenir une siccité élevée. Les floculants testés sont

des polymères anioniques nommés (EM 533, EM430), cationiques (EM340CT, EM440 CT) et non-anioniques (FAM 4351, FAM 4802). La forme physique des polymères anioniques et cationiques correspond à un liquide visqueux et le polymère non-anionique est similaire à un solide pulvérulent. Ils ont été fournis par la société SNF Florger (Figure 3.4).



Figure 3.4 : Les types des polymères utilisés.

L'objectif de ces essais est de sélectionner et ainsi que déterminer le dosage optimal de chaque polymère testé sur les sédiments étudiés. En général, Le dosage du polymère est mentionné par sa masse (kilogramme par tonne de la masse sèche du matériau).

Le protocole d'essai consiste alors à déterminer l'efficacité de polymères en fonction des dosages injectés sur une concentration de sédiments C_i prédéfinis et mis dans des bécjers de 100 ml (Figure 3.5). Les dosages des polymères injectés ont été fixés de 1, 2, 4 et 6 kg/Tonnes pour les polymères cationiques et amorphes, et de 0.5, 1, 2, 3 et 4kg/Tonnes pour les polymères anioniques, dont les concentrations des polymères ont été fixées à 5g/l. Une phase d'agitation a été effectuée à 200 tours/min pour disperser les polymères dans le sédiment. Lorsque nous observons des agglomérations des particules, nous diminuons la vitesse d'agitation à 50 tour/min pendant deux minutes afin de favoriser la floculation du matériau. Une fois la floculation terminée, le sédiment floculé est égoutté avec un papier filtre pendant 5 minutes. Ensuite, il est séché à l'étuve à 105°C pour déterminer sa teneur en eau. Les séries des essais ont été réalisées pour deux concentrations (des sédiments lors de la sortie de la drague et à 300g/l). Les résultats obtenus correspondent à la moyenne des trois essais par sédiment et par type de polymère. L'ensemble des résultats est récapitulé dans l'annexe 3. Le tableau 3.4 présente le dosage efficace de chaque type de polymère des sédiments étudiés pour la concentration initiale.

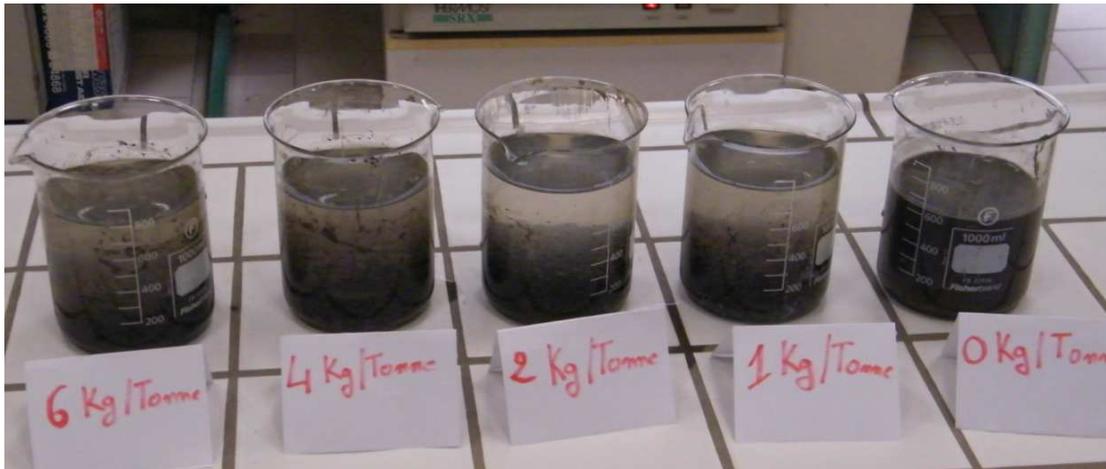


Figure 3.5 : Exemple d'essai d'optimisation de dosage de polymères cationique EM 340 CT pour les sédiments de l'Angleterre.

Sédiments fluviaux	SF-Belgique		SF-Angleterre	
	W(%)	C (kg/tonnes)	W(%)	C (kg/tonnes)
Polymères Cationiques EM340 CT	60	2	96	4
Polymères Cationiques EM440 CT	57	4	117	4
Polymères anioniques EM 533	55	2	100	2
Polymères anioniques EM430	50	2	118	3
Polymères amorphes FAM 4351	55	2	123	4
Polymères amorphes FAM 4802	53	4	123	2

Tableau 3.4 : Dosage optimale de différents polymères pour les sédiments étudiés avec une concentration solide lors de dragage.

➤ Résultats :

- Les polymères anioniques conduisent à une séparation solide-liquide très claire et une floculation plus efficace sur le sédiment de la Belgique que celui de l'Angleterre.
- L'effet des polymères cationiques nécessite une grande quantité pour la floculation des sédiments et qui confèrent des floes importants de la limpidité claire. Nous constatons une meilleure efficacité pour le sédiment de l'Angleterre que celui de la Belgique.
- Les polymères amorphes permettent une floculation moyenne pour les deux sédiments.
- Pour l'effet des polymères sur la concentration solide, nous constatons qu'une faible concentration solide conduit à une floculation efficace et à une diminution importante de la teneur en eau par rapport à une concentration solide élevée.

Ces résultats permettent d’apporter des réponses sur la sélection des polymères et leurs dosages pour les deux sédiments. La performance du polymère cationiques EM 340 CT de dosage de 4 kg/Tonnes apparaît évidente pour le sédiment de l’Angleterre sur la taille des floccs, de la limpidité et de la siccité finale. Par contre, nous enregistrons une supériorité du floculant anionique de type EM 430 de dosage 2kg/tonne par rapport au sédiment de la Belgique.

3.2.2 Essai de sédimentation sur les sédiments floculés

En tenant compte des résultats de sélection du dosage optimal de chaque polymère pour les sédiments étudiés, nous avons effectué des essais de sédimentation sur ces sédiments floculés au dosage optimal. Ceci permettra de faire une comparaison de sédimentation du sédiment floculé et de sédiment naturel. Les essais de sédimentation des sédiments floculés ont été réalisés avec le même protocole que celui présentés dans le paragraphe (3.1.3). Les concentrations des sédiments ont été fixées à 300 g/l et celles du floculant à 5 g/l. En faisant floculer les sédiments étudiés par le dosage optimal de chaque polymère, on les met dans des tubes transparents. Les tassements sont suivis au bout d’une heure et sont exposés dans les courbes des figures 3.6 et 3.7.

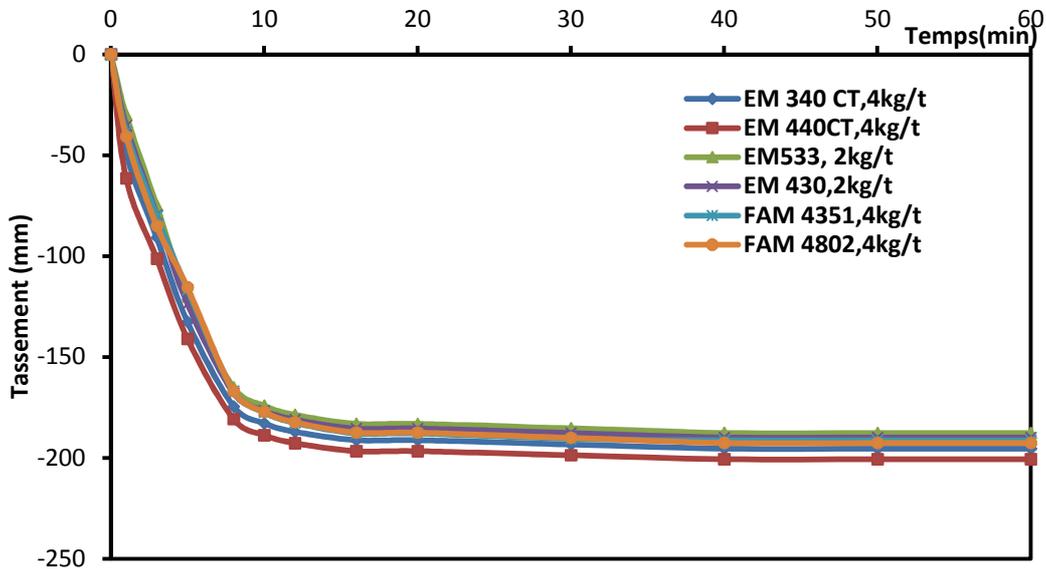


Figure 3.6 : Evolution des tassements de sédiments de l’Angleterre floculés avec différents types de polymères.

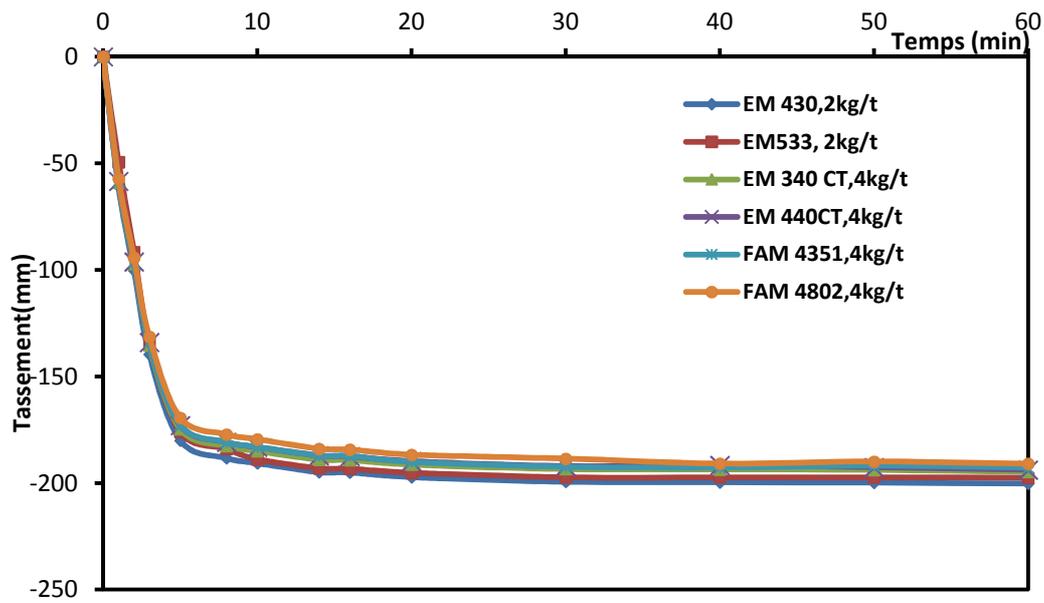


Figure 3.7 : Evolution des tassements de sédiments de la Belgique floclés avec différents types de polymères.

Selon ces courbes (Figure 3.6 et Figure 3.7), nous avons constaté que les sédiments floclés de l'Angleterre et de la Belgique ont les mêmes tendances de sédimentation pour les différents types de polymères. Nous avons également constaté que la vitesse de sédimentation des sédiments floclés de la Belgique est plus rapide que ceux de l'Angleterre. En revanche, ces sédiments floclés présentent la même phase de sédimentation libre que celle des sédiments naturels, mais avec une vitesse de sédimentation libre plus rapide et une eau surnageant plus claire (Figure 3.8).



Figure 3.8 : Colonnes des sédimentations de sédiments de la Belgique Bruts et floclés.

La vitesse de sédimentation libre des sédiments floculés croît avec plusieurs dizaines de millimètres par minute par rapport aux sédiments naturels. Cette phase est réduite et dure d'environ une heure pour les sédiments naturels ($C_s = 300\text{g/l}$), à quelques minutes pour les sédiments floculés. Le Tableau 3.5, présente les caractéristiques de sédimentation libre des sédiments floculés.

Sédiments fluviaux	SF-Angleterre		SF-Belgique	
	Durée (min)	Vitesse (mm/min)	Durée (min)	Vitesse (mm/min)
Sédiments naturels $C_s=300\text{g/l}$	60	3	30	5.8
Sédiments floculés $C_s=300\text{g/l}$	[10-11]	[16-17.8]	[3-6]	[25-28]

Tableau 3.5 : Caractéristiques de sédimentation des sédiments floculés.

3.3 Déshydratation des sédiments par l'ajout de polymères

La déshydratation des sédiments est l'un des points clés de toute valorisation. Pour aboutir à une teneur en eau permettant l'utilisation de ces sédiments en technique routière en peu de temps, la plupart des méthodes de déshydratation envisagées sont coûteuses et ont une efficacité relative. L'objectif principal de cette partie est de faire un suivi temporel de la teneur en eau des sédiments bruts et des sédiments déshydratés par l'ajout de polymères.

La méthode choisie pour cette déshydratation est la technique de lit de séchage. Cette technique se pratique à l'air libre et combine à la fois les mécanismes d'évaporation et de filtration. Elle se favorise par une couche drainante de gravier recouverte par un géotextile et un récipient de récupération de l'eau drainée (Figure 3.9). Le dimensionnement de ce bac est de 1 m de largeur, 1,2 m de longueur, et 75 cm de hauteur.

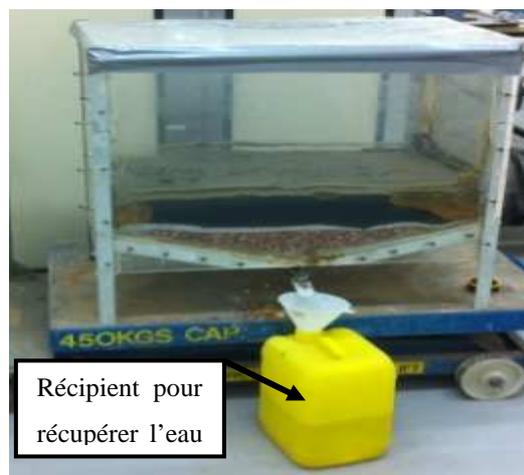


Figure 3.9 : Lit de séchage utilisé.

Le protocole des essais est le suivant: nous avons préparé le dosage de polymères sélectionnés à une concentration de 5g/l. Les sédiments sont placés dans un malaxeur homogène avec le dosage efficace de polymères sélectionné dans le paragraphe 3.2.1 (EM 340CT à 4kg/tonnes pour les sédiments de l'Angleterre et EM 430 à 2kg/tonnes pour les sédiments de la Belgique). A la floculation, nous avons déposé 15 cm du sédiment dans le bac de lit de séchage. Ces bacs ont été réalisés dans les travaux de Dubois 2006 (DUBOIS.V, 2006). La mesure des teneurs en eau a été effectuée à l'aide d'une spatule, par trois prélèvements dans chaque bac. Les moyennes des mesures sont présentes dans les figures 3.10 et 3.11.

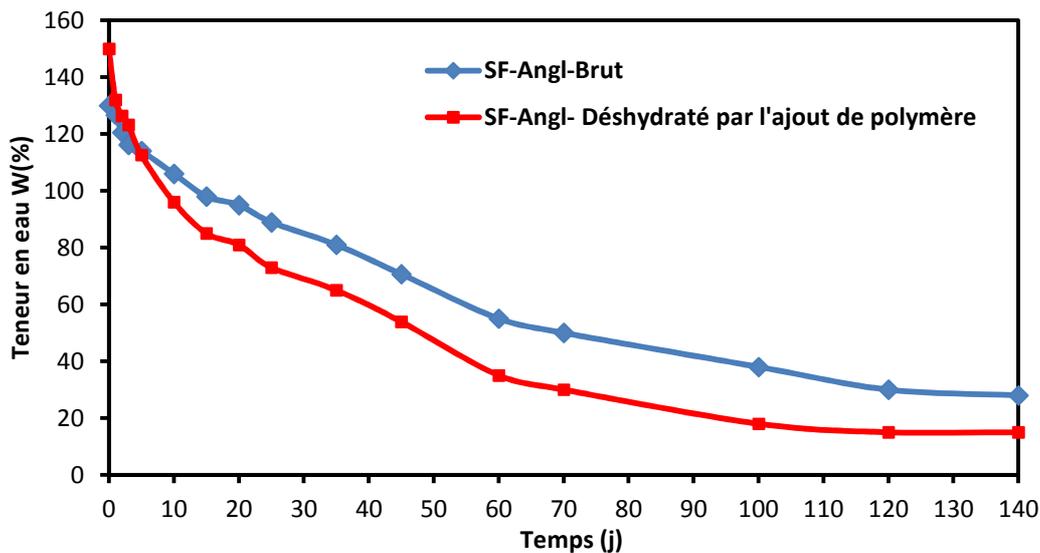


Figure 3.10 : Evolutions de la teneur en eau en fonction du temps pour les sédiments de l'Angleterre bruts et déshydratés par l'ajout de polymère.

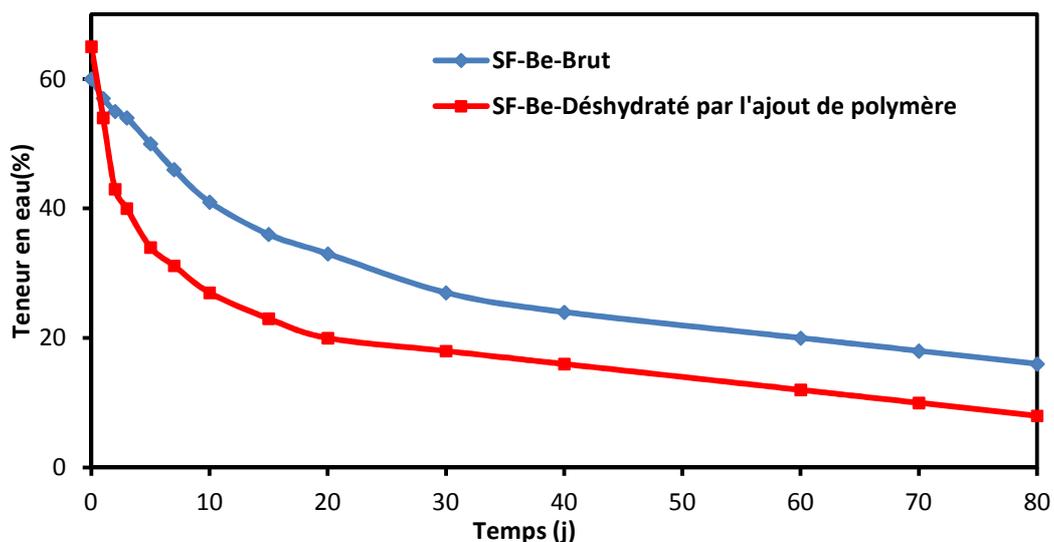


Figure 3.11 : Evolutions de la teneur en eau en fonction du temps pour les sédiments de la Belgique bruts et déshydratés par l'ajout de polymère.

Le sédiment de la Belgique présente une vitesse de séchage plus rapide que celui de l'Angleterre. Cela peut être expliqué par la différence de texture entre les deux matériaux (confirmé au paragraphe du granulométrique laser) qui est liée à l'effet de drainage. En revanche, une diminution de la teneur en eau est observée pour les sédiments floculés par rapport aux sédiments bruts, avec une différence de 30 à 40 jours pour obtenir la même teneur en eau. Ceci peut s'expliquer par la formation des floes amenant des matériaux poreux et engendrant un relarguage d'eau facilement éliminable et drainable. Egalement, nous pouvons constater un changement de la pente au bout de 10-20 jours pour les sédiments étudiés. Ce changement est expliqué par l'effet de drainage à court terme, le phénomène prédominant pour la réduction de la teneur en eau (MIRAOUIM, 2010).

En parallèle de cette étude, des essais d'analyses chimiques ont été réalisés sur l'eau filtrée par les sédiments bruts et sédiments floculés. Deux prélèvements ont été réalisés à 5 et 10 jours. Ces résultats sont exposés dans le Tableau 3.6.

Eléments chimiques ($\mu\text{g/l}$)	SF-Brut- Angleterre		SF-Brut+polymères Angleterre		SF-Brut Belgique		SF- Brut+polymères- Belgique		Loi sur l'eau ($\mu\text{g/l}$) National (Déc 2008)
	5j	10j	5j	10j	5j	10j	5j	10j	
As	10	9	7,4	6	<4,5	<4,5	<4,5	<4,5	10
Ba	90	80	70	50	48	45	35	28	700
Cd	1,9	2	1,8	1	2	1,8	1,9	1	50
Cr	3,1	3	2	1	2	2	1,5	1	50
Cu	6,9	6,5	1,8	1	3	4	11	8	2000
Mo	12	10	4	3,8	<3,5	<3,5	<3,5	<3,5	30
Ni	<6,5	<6,5	3,6	3,5	5	5	2,5	1,5	20
Pb	<6,2	<6,2	<6,2	<6,2	<6,2	<6,2	<6,2	<6,2	10
Sb	11,5	11	5	4	3	3	2,2	2	5
Se	<8,8	<8,8	<8,8	<8,8	<8,8	<8,8	<8,8	<8,8	10
Zn	70	71	35	30	90	90	50	33	5000
Chlorure (mg/l)	588	500	256	260	52	50	40	35	250
Sulfate (mg/l)	603	550	266	275	620	600	463	300	250

Tableau 3.6 : Taux des métaux lourds dans l'eau filtrée par les sédiments étudiés.

L'ensemble des résultats présentés montre une diminution de la concentration de quelques substances chimiques dans l'eau de la percolation du sédiment floculé par rapport à celle du sédiment brut. Nous observons également un dépassement de concentration du chlorure et du sulfate pour les sédiments d'Angleterre et un dépassement de concentration du sulfate pour le sédiment de la Belgique par rapport au seuil établis par la loi sur l'eau (Loi sur l'eau, 2012). En revanche, une légère diminution de la concentration des éléments chimiques a été observée

pour le prélèvement à 5 jours par rapport à 10 jours pour les différents sédiments. Nous avons également remarqué un fort abattement pour le Chlorure et le Sulfate pour les sédiments floculés.

3.4 Carte d'identité des sédiments floculés

Après les conditionnements des sédiments par l'ajout des polymères, nous avons observé une différence remarquable entre les sédiments bruts et les sédiments floculés (par l'ajout de polymères). Les sédiments bruts ont une couleur noire et une forte turbidité à leur état initial. Tandis que les sédiments floculés ont un changement considérable sur leur structure. Ces changements impliquent une formation des floccs, un volume réduit, une cohésion importante entre les particules et une eau plus limpide (Figure 3.12). Après le séchage à l'étuve de 40°C, nous avons remarqué que les sédiments floculés sont constitués de particules de dimensions très variables et des grains plus ou moins friables.

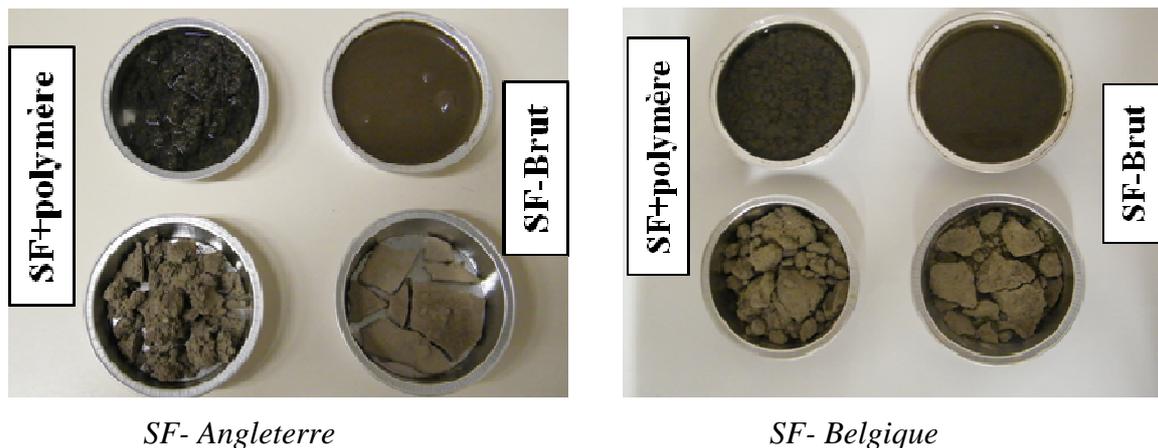


Figure 3.12 : Aspect visuel du sédiment brut et sédiment floculé par l'ajout de polymères.

Selon les constatations visuelles des sédiments bruts et des sédiments floculés, nous pouvons prédire l'effet de la déshydratation par l'ajout des polymères sur les caractéristiques des sédiments. L'objectif de cette partie est de déterminer les caractéristiques physico-chimiques, géotechniques et environnementales des sédiments floculés afin d'évaluer l'influence des polymères sur ces caractéristiques.

3.4.1 Analyse granulométrique du sédiment floculés

Les analyses granulométriques ont été réalisées sur les sédiments floculés à l'aide d'une granulométrie Laser (Coulter LS230). Ces sédiments constituent des agglomérats de

dimensions variables et de plus ou moins fiables. Nous avons donc préparé des échantillons déshydratés par l'ajout de polymères subissant une agitation pendant cinq et vingt minutes respectivement en intégrant de hexametaphosphate pour une meilleure désagrégation des particules. Les courbes des figures 3.13 et 3.14, représentent la granulométrie des sédiments en % volumique et les tableaux 3.7 et 3.8 récapitulent leurs teneurs en argile, limon et sable selon la classification du guide technique routier pour les sédiments étudiés.

D'après les résultats obtenus, nous pouvons observer une nette différence de la distribution granulométrique entre les sédiments bruts et les sédiments déshydratés par polymères. L'ajout de polymères provoque une agglomération des particules formant des floccs de taille millimétrique. Ceci augmente le tamisât entre 10 et 200 μm pour le sédiment de l'Angleterre et entre 50 et 400 μm pour le sédiment de la Belgique. En revanche et après l'agitation pendant 20 minutes, les analyses granulométriques de ces sédiments ont les mêmes distributions de granulométrie que celles des sédiments bruts. En effet, l'agitation pendant 20 minutes provoque la rupture des liaisons entre les particules agglomérées et engendrent la défloculation du matériau. En générale, le polymère conduit à une modification de structure et de morphologie, qui joue le rôle d'une colle entre les particules par l'adsorption par pontage ou par différentes interactions. Ces actions peuvent se réaliser d'une manière réversible. (GREGORY. J, 1988), (KRAPF.M-E, 2012).

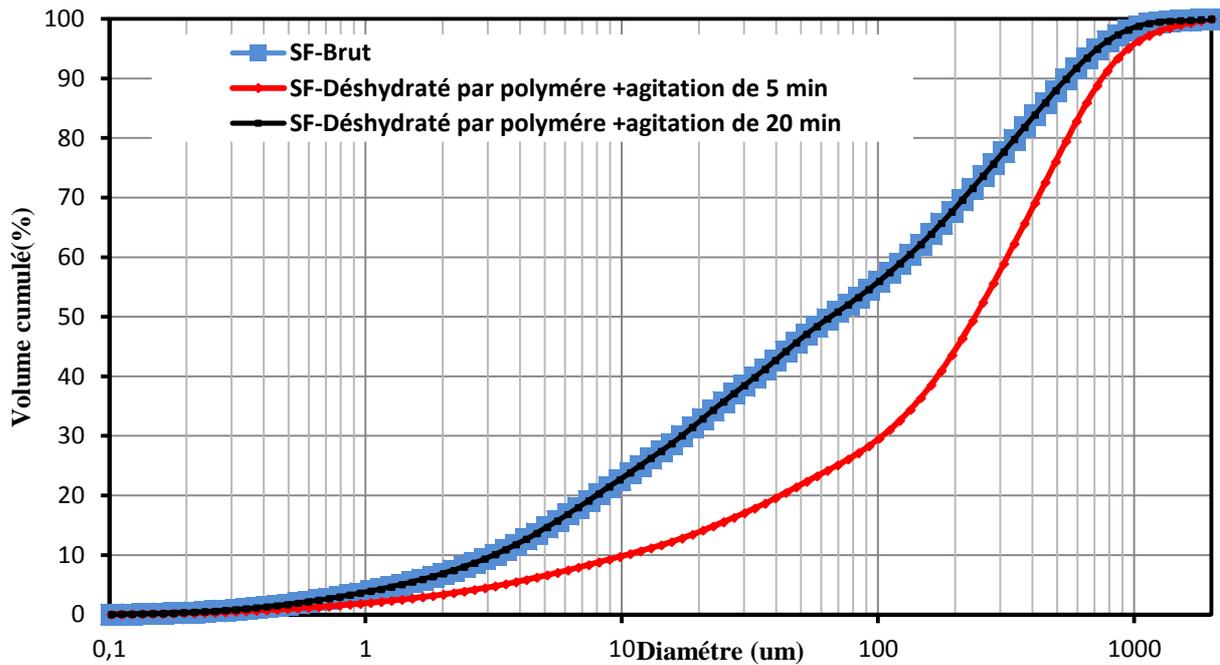


Figure 3.13 : Courbes comparatives du sédiment déshydraté par l'ajout de polymères et sédiment Brut de l'Angleterre.

Taille des grains	Classification [GTR.1992]	SF-Brut	SF- déshydraté par polymères+5min d'agitation	SF- déshydraté par polymères+20min d'agitation
Grains < 2 μ m	Argile	6	4	6
2 μ m < Grains < 63 μ m	Limon	50	22	50
63 μ m < Grains	Sable	44	74	44
D10 (μ m)		3	10	3
D30 (μ m)		20	100	20
D60 (μ m)		105	120	105
Cu		35 > 6	12 > 6	35 > 6
Cc		1 < 1,30 < 3	8,34	1 < 1,30 < 3
Type de granulométrie		étalée, bien graduée	étalée, mal graduée	étalée, bien graduée

Tableau 3.7 : Distribution granulométrique : granulométrie Laser de sédiments d'Angleterre déshydratés par l'ajout de polymères.

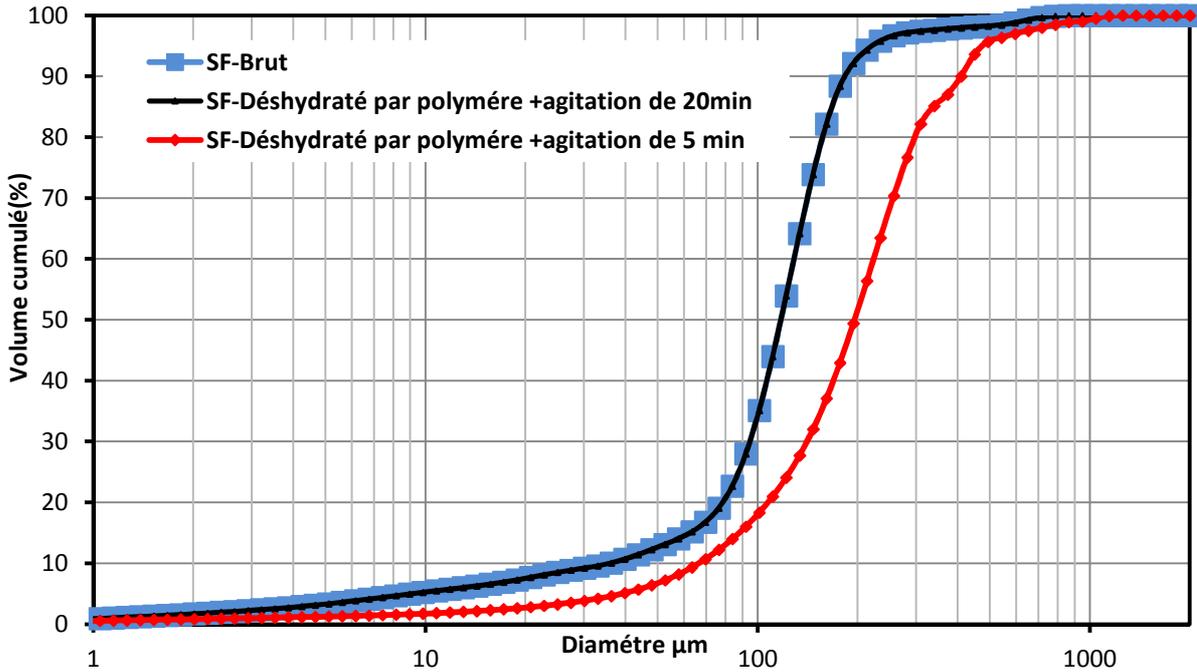


Figure 3.14 : Courbes comparatives du sédiment déshydraté par l'ajout de polymère et sédiment Brut de la Belgique.

Taille des grains	Classification [GTR.1992]	SF-Brut	SF- déshydraté par polymères +5 min d'agitation	SF- déshydraté par polymères+20min d'agitation
Grains < 2 μ m		1%	3%	1%
2 μ m < Grains < 63 μ m		16%	10%	16%
63 μ m < Grains		83%	87%	83%
D_{10} (μ m)		30	70	30
D_{30} (μ m)		95	150	95
D_{60} (μ m)		130	220	130
Cu		4,5 < 6	3,1 < 6	4,5 < 6
Cc		1 < 2,3 < 3	1 < 1,4 < 3	1 < 2,3 < 3
Type de granulométrie		Serré, bien graduée	Serré, bien graduée	Serré, bien graduée

Tableau 3.8 : Distribution granulométrique : granulométrie Laser de sédiments de la Belgique déshydratés par l'ajout de polymère.

3.4.2 Caractérisation physique

Les caractéristiques physico-chimiques des sédiments étudiés, après la déshydratation par l'ajout de polymères, sont synthétisées dans le tableau 3.9. Le but de cette étude est d'évaluer

l'effet de la déshydratation des sédiments par l'ajout de polymères sur leurs caractéristiques physico-chimiques.

Caractérisations	SF-Angleterre		SF- Belgique	
	Brut	Déshydraté par polymères	Brut	Déshydraté par polymères
Matière organique (%) à 450°C	7,00	8,00	4,00	5,40
Pert au feu (%) à 550°C	9,00	10,00	5,00	6,50
Limite de Liquidité (WL%)	85,00	93,00	20,00	24,00
Limite de Plasticité (Wp%)	42,00	48,00	10,00	13,00
Indice de plasticité (Ip%)	43,00	45,00	10,00	11,00
Bleu de méthylène (VBS)	2,90	3,20	0,75	0,90
Masse volumique des particules solide (ρ_s)	2,47	2,40	2,58	2,55

Tableau 3.9 : Caractérisations des sédiments déshydratés par l'ajout de polymères.

Selon le tableau 3.9, nous pouvons constater une légère augmentation de la matière organique des sédiments après la déshydratation par l'ajout des polymères. Cette augmentation est liée à la présence des composés organiques de la chaîne polymère et/ou aux mécanismes d'élimination des fractions organiques solubles présente dans les sédiments. Ces mécanismes se traduisent par l'adsorption (ou l'enroulement) du polymère autour des particules organiques (acides humiques et acide fulvique) et par l'interaction entre les charges négatives des acides humiques (MO) et par la structures de la longue chaîne de polymère (BAUDIN.I et al, 2005) (BAUDIN.I , et al 2006) (HARRAT.N, 2013). En conséquence, le polymères augmente la teneur en matière organique dans le sédiment et confère un liquide bien limpide. En ce qui concerne, les limites d'Atterberg (Indice de plasticité) et Valeur Bleu Méthylène VBS des sédiments déshydratés par l'ajout de polymères, on enregistre une légère augmentation de ces derniers vis-à-vis des sédiments bruts. Ces résultats pourraient être expliqués par l'augmentation de la matière organique. Plusieurs chercheurs ont montré que la matière organique augmente les limites d'Atterberg (ZENTAR.R et al ,2008) (Odell.RT, et al 1960). Par ailleurs l'augmentation de la Valeur bleu Méthylène VBS, est expliquée par la présence de la matière organique qui va augmenter la capacité des fixations par le phénomène d'adsorption (MUSTIN M., 1987,).

3.4.3 Caractérisation de compactage

Les essais de compactage et de portance ont été effectués sur les sédiments floculés par l'ajout du polymère de l'Angleterre et de la Belgique selon la norme NF P 94 093.

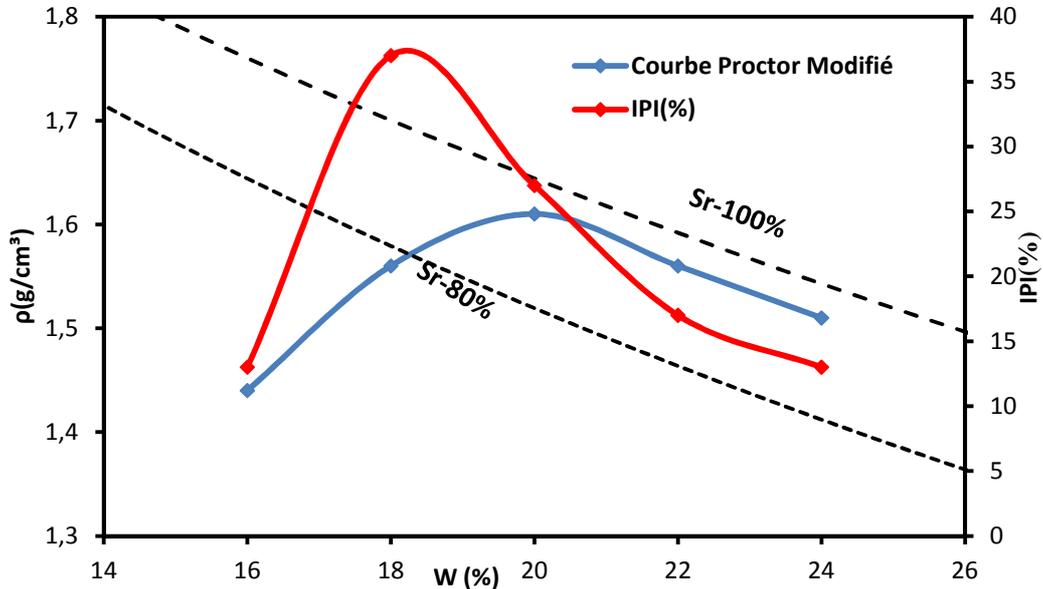


Figure 3.15 : Courbe Proctor modifié–IPI du sédiment de l'Angleterre déshydraté par l'ajout de polymères.

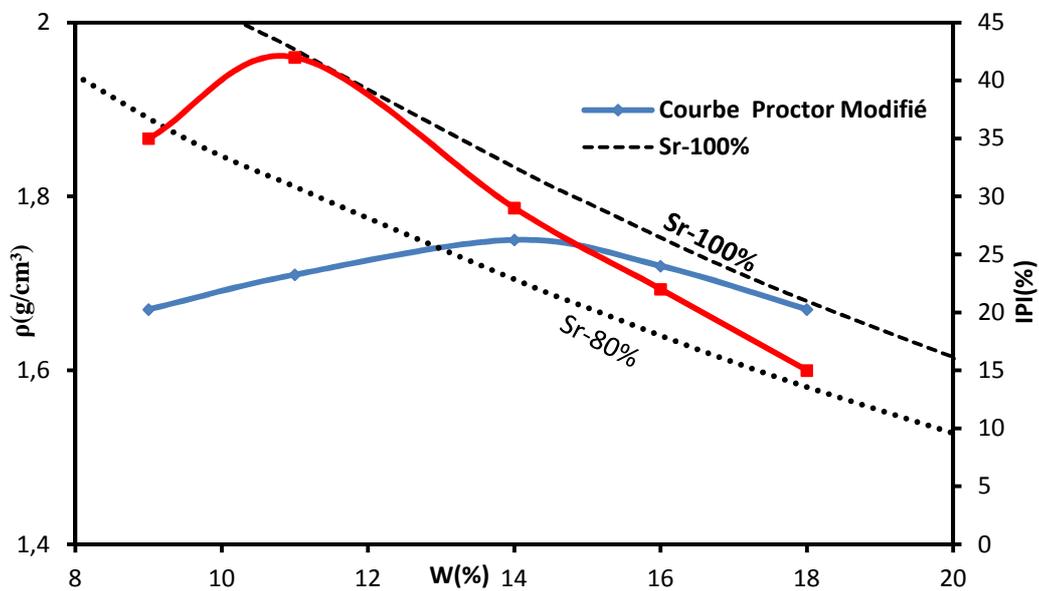


Figure 3.16 : Courbe Proctor modifié–IPI du sédiment de la Belgique déshydraté par l'ajout de polymères.

Les résultats de l'essai Proctor modifié et de l'indice de portance IPI (%) pour les sédiments étudiés floclés sont présentés sur les figures 3.15 et 3.16 et le tableau 3.10 synthétise les résultats.

<i>Sédiments fluviaux</i>	<i>Sédiments de l'Angleterre</i>		<i>Sédiments de la Belgique</i>	
	<i>Bruts</i>	<i>Déshydratés par polymères</i>	<i>Bruts</i>	<i>Déshydratés par polymères</i>
<i>WOPM(%)</i>	18	20	15	16
<i>ρ_d (g/cm³)</i>	1,64	1,61	1,74	1,73
<i>IPI à WOPM(%)</i>	19	25	26	29

Tableau 3.10 : Résultats de l'essai Proctor – IPI sur les sédiments déshydratés par l'ajout de polymères et les sédiments bruts

L'allure générale des courbes Proctor modifié et d'IPI(%) de sédiments floclés sont un peu différentes de celle des sédiments bruts. Nous avons noté une translation de l'optimum Proctor Modifié vers une densité volumique sèche faible pour une teneur en eau plus élevée. Après la déshydratation par l'ajout de polymères, la densité sèche maximale des sédiments de l'Angleterre passe de 1,64 g/cm³ à 1,61 g/cm³ et celle de la Belgique passe de 1,74 g/cm³ à 1,73 g/cm³. Les teneurs en eau optimale des sédiments bruts et sédiments floclés de l'Angleterre sont respectivement de 18 % et 20 %. Pour les sédiments de la Belgique, la teneur en eau a été déplacée de 15% à 16% après la déshydratation par l'ajout de polymères. En ce qui concerne l'IPI, nous constatons une légère augmentation de ce dernier après la déshydratation des deux sédiments. La diminution de la densité sèche et l'augmentation de la teneur en eau pourraient être expliquées par l'augmentation de la matière organique et aussi par l'emploi de polymères conduisant à la production de boues hydrophiles (CRINI.G & BADOT.P.M, 2007). Egalement, l'augmentation de l'IPI pourrait être expliquée par l'effet de pontage des particules ou par liaisons inter-particulaires qui colle les particules les unes aux autres afin de créer un réseau des particules coalescées (BOEGLIN. J-C, 1974).

3.4.4 Analyse minéralogique

Les analyses minéralogiques ont été réalisées afin d'identifier les phases cristallines présentes dans les sédiments floclés de l'Angleterre et de la Belgique. Tout d'abord nous avons réalisé une analyse élémentaire par fluorescence X et nous avons mesuré la teneur en carbone totale. Ensuite, nous avons identifié la composition minérale de ces matériaux par diffraction des rayons X.

❖ Teneur en carbone

La teneur en carbone organique des sédiments floculés de l'Angleterre et de la Belgique est respectivement de 2,45 % et 1,30 % (déterminé à l'Eurofins de Lille).

Le carbone inorganique des sédiments floculés est déterminé à travers les analyses thermogravimétriques (Figure 3.17). Les pertes de masse sont respectivement de 10,70 % et de 4,11 % pour les deux sédiments floculés.

➤ Sédiments floculés de l'Angleterre Cinorganique = 2,92 %.

➤ Sédiments floculés de la Belgique Cinorganique = 1,12 %.

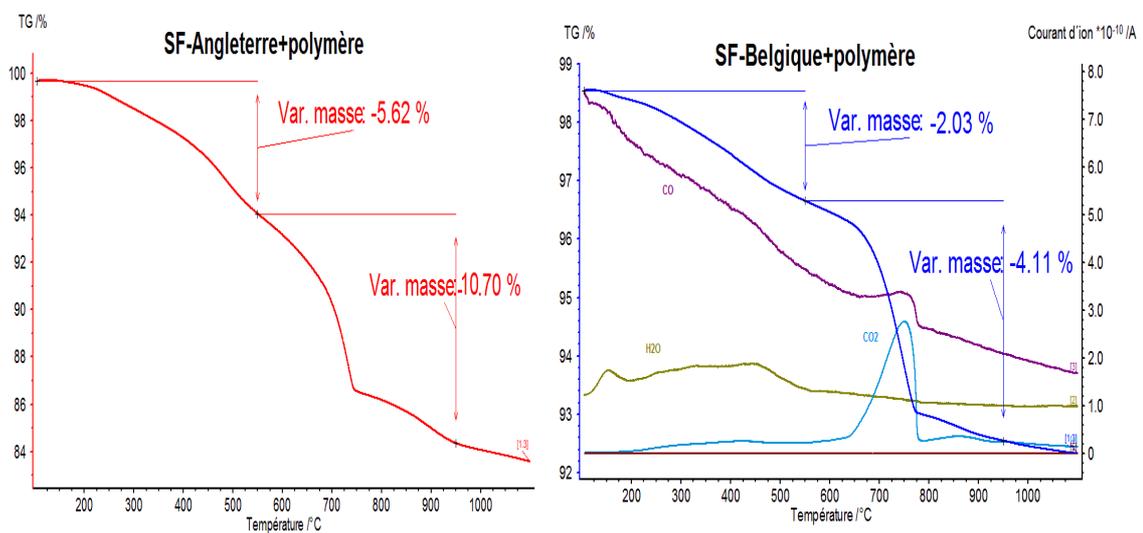


Figure 3.17 : Analyses thermogravimétriques sur sédiments déshydratés par l'ajout de polymères d'Angleterre et de la Belgique.

Teneur en carbone total du sédiment de l'Angleterre après l'ajout de polymères est $C_{\text{total}} = 5,37 \%$ et pour le sédiment de la Belgique après l'ajout de polymères est $C_{\text{total}} = 2,42 \%$.

❖ Analyse par Fluorescence des rayons X (FRX)

<i>Eléments</i>	<i>Sédiments de l'Angleterre déshydratés par l'ajout polymères(%)</i>	<i>Sédiments de la Belgique déshydratés par l'ajout polymères(%)</i>
<i>C</i>	5,36	2,42
<i>O</i>	47,00	52,00
<i>Na</i>	0,93	0,55
<i>Ca</i>	7,00	4,80
<i>Mg</i>	1,20	0,50
<i>Al</i>	6,00	3,00
<i>Si</i>	19,00	34,00
<i>P</i>	0,09	0,40
<i>Fe</i>	3,00	2,10
<i>S</i>	0,84	0,40
<i>K</i>	1,96	1,40
<i>Cl</i>	6,00	Traces
<i>Ti</i>	0,46	Traces
<i>Mn</i>	Traces	Traces
<i>Ba</i>	Traces	Traces
<i>Cu</i>	Traces	Traces
<i>Zn</i>	Traces	Traces
<i>Sr</i>	Traces	Traces

Tableau 3.11 : Composition élémentaire des sédiments deshydratés par l'ajout de polymères.

❖ Analyse par diffraction de rayons X

L'analyse du diffractogramme, réalisée sur les sédiments déshydratés par l'ajout des polymères, donne les mêmes phases minéralogiques que les sédiments étudiés bruts (Figure 3.18). Par ailleurs, la déshydratation par les polymères n'a pas d'effet sur les phases minéralogique des sédiments.

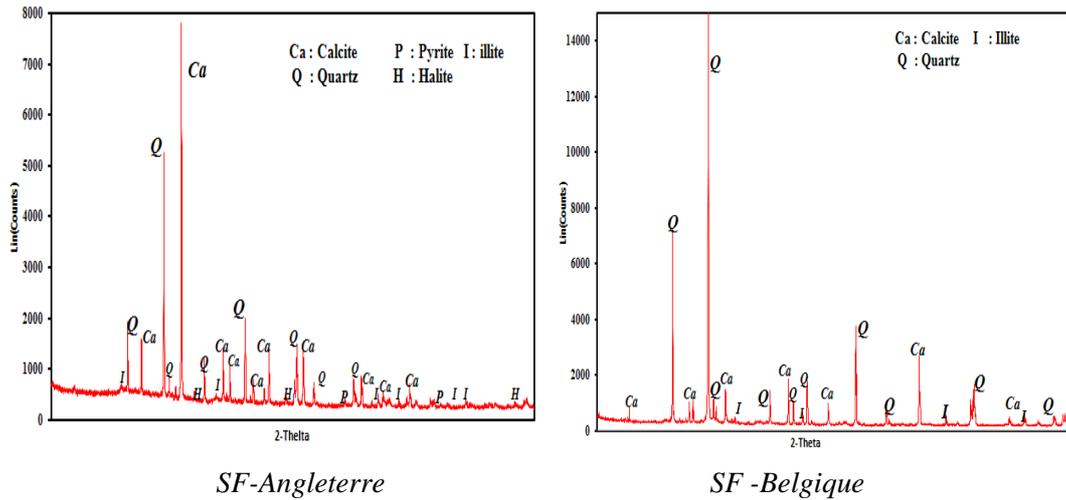


Figure 3.18 : Diffractogrammes des rayons X des sédiments fluviaux deshydratés par l'ajout de polymères.

3.4.5 Analyse environnementale

L'évaluation de l'impact environnemental des sédiments floculés de l'Angleterre et de la Belgique a été réalisée à travers l'essai de lixiviation (NF EN 12457-2), afin d'estimer les relargages des éléments chimiques et l'effet environnemental des polymères sur ces sédiments. Les analyses sur les lixiviats des sédiments floculés sont présentées dans le Tableau 3.12 et sur la matrice solide dans le Tableau 3.13.

Paramètre	SF-Angleterre + polymères (mg/kg)	SF-Belgique + polymères (mg/kg)	Valeur à respecter par au moins 100% des échantillons (mg/kg, MS)
As	0,14	0,04	1,50
Ba	0,46	0,64	60
Cd	0,01	0,01	0,12
Cr	0,02	0,04	1,5
Cu	0,25	0,03	6
Hg	0,01	0,01	0,03
Mo	0,16	0,32	1,5
Ni	0,08	0,16	1,2
Pb	0,06	0,03	1,5
Sb	0,05	0,07	0,18
Se	0,07	0,09	0,3
Zn	0,08	0,75	12
Fluorure	18	21	30
Chlorure	6900	39	2400
Sulfate	1100	250	3000
Soluble fraction	14200	2000	12000
PH	8,20	8,70	[5,5-13]

Tableau 3.12 : Analyses des éluât de sédiments de l'Angleterre et de la Belgique déshydratés par l'ajout de polymères.

Eléments	SF- Angleterre (mg/kg)	SF- Belgique (mg/kg)	Valeurs limites à ne pas dépasser en contenu total pour être candidat à une utilisation en T.R
COT	24500,00	13000,00	60000
PCB	<0,07	<0,07	1
BETX	<0,25	<0,25	6
HCT	306,00	220,00	500
HAP	1,4<x<1,42	1,6<x<1,65	50

Tableau 3.13 : Analyses chimiques sur le contenu total des sédiments déshydratés par l'ajout de polymères (mg/Kg de MS).

➤ Résultats

Selon le guide d'acceptabilité des matériaux alternatifs en technique routière, le sédiment floculé de l'Angleterre a des valeurs de concentrations inférieures aux valeurs limites du N1 prédéfinies par le guide Sétra 2012, sauf pour le Chlorure et la fraction soluble. Pour les sédiments floculés de la Belgique, tous les éléments mesurés sont sous les seuils du N1 établis par le même guide.

Par rapport aux sédiments bruts, nous remarquons une diminution considérable des concentrations du Chlorure, du Sulfate et de la fraction soluble pour le sédiment floclé de l'Angleterre, et une diminution de la fraction soluble pour le sédiment floclé de la Belgique. Cependant, les métaux lourds des deux sédiments floclés restent globalement inchangés par rapport à ceux bruts.

3.5 Conclusion

La déshydratation des sédiments constitue une phase essentielle dans les processus de valorisation. En général, les sédiments bruts contiennent une teneur en eau élevée posant une contrainte majeure pour la valorisation des ces sédiments dans le domaine du génie civil. Dans ce chapitre, nous avons exploré une étude de déshydratation par la technique du lit de séchage sur les sédiments bruts et les sédiments floclés par les polymères (ou adjuvants de floculation). Le premier résultat montre que la vitesse de sédimentation du sédiment brut de la Belgique est plus rapide que celui de l'Angleterre, ce résultat est expliqué par la différence de texture des sédiments. De plus, la durée de la sédimentation des sédiments floclés est 5 fois plus courte que la sédimentation des sédiments bruts. Globalement, les polymères ont une action immédiate permettant une agglomération rapide des sédiments et donnant des eaux surnageants limpides. L'ajout des polymères a permis l'obtention d'une diminution appréciable de la teneur en eau et une diminution considérable des éléments chimiques dans l'eau relargué.

Concernant les caractéristiques physiques des sédiments après déshydratation par l'ajout de polymères, la formation des flocs modifie la distribution granulométrique du matériau d'une manière réversible (défloculation des particules). D'autre part, une légère augmentation de la matière organique après la déshydratation des sédiments floclés a été observée. Cette augmentation engendre une légère modification du comportement physique et géotechnique par rapport aux sédiments bruts. Par contre, et en s'appuyant sur les valeurs des données géotechniques, limites d'Atterberg et valeur au bleu méthylène (VBS), ces sédiments floclés ont pratiquement les mêmes classifications GTR que les sédiments bruts. Les sédiments floclés de l'Angleterre et de la Belgique sont donc respectivement classés A4F11 et B5F11. Les essais de lixiviation ont permis une évaluation environnementale des deux sédiments floclés (de l'Angleterre et de la Belgique). Ces essais ont montré que les valeurs d'éluât obtenues sur le sédiment floclé de la Belgique sont inférieures au niveau 1 établi par le guide Sétra (AMATR-Sétra, 2012), contrairement à celles du sédiment de l'Angleterre qui dépasse

ce seuil à cause des concentrations en chlorure et en fraction soluble. Par ailleurs, la déshydratation par les polymères ne modifie pas l'état environnemental du sédiment.

Cette partie du travail nous a permis de caractériser l'effet de la déshydratation des sédiments par l'ajout des polymères. Pour répondre aux exigences de comportement à long terme et afin de valoriser ces sédiments (bruts et flocculés) dans les couches de fondation, il est nécessaire d'améliorer les propriétés mécaniques de ces matériaux par des traitements hydrauliques et d'ajout granulaires. Cette étude fait l'objet du chapitre suivant.

Chapitre 4

Traitement et Valorisation des sédiments fluviaux

Chapitre 4 : Traitement et Valorisation des sédiments

4 Introduction

Ce chapitre est consacré au traitement des sédiments fluviaux en vue d'une valorisation en technique routière et plus particulièrement en couche de fondation. Le but est de réaliser différentes formulations à bases de sédiments bruts et sédiments déshydratés par l'ajout de polymères, afin d'apprécier l'effet du traitement sur les matériaux élaborés. Comme nous l'avons précisé dans les chapitres 2 et 3, les sédiments bruts ne peuvent pas être utilisés en l'état en raison d'une teneur en eau élevée, une teneur en matière organique supérieure à 3%, et une fraction non négligeable de particules fines. L'ajout d'adjuvant de floculation permet de réduire la teneur en eau, d'agglomérer les particules sous forme de floes très poreux, d'augmenter de la teneur en matière organique et de rendre l'eau interstitielle plus limpide. L'ajout de ce réactif pourrait donc altérer les caractéristiques des sédiments en vue d'utilisation en technique routière. L'évaluation de l'impact environnemental des sédiments a montré que les sédiments bruts peuvent être candidats pour une utilisation en technique routière. D'autre part, l'ajout d'un polymère pourra contribuer à la diminution de la mobilité des polluants. Pour pouvoir utiliser ces matériaux en couche de fondation, il est indispensable d'améliorer leurs performances mécaniques à court et long termes. Pour cela, nous avons effectué, dans un premier temps un traitement au liant hydraulique du type Rolac645 et à la chaux. Dans un second temps, nous avons fait appel au correcteur granulaire, en se basant sur le Modèle d'Empilement Compressible (MEC) pour déterminer la compacité maximale du mélange à base de sédiments et du sable Boulonnais. La compacité maximale a été déterminée par les méthodes expérimentales et numériques en utilisant le logiciel *RENE-LCPC*. Après la détermination du pourcentage des sédiments dans les formulations élaborées, les comportements mécaniques (court et long termes) et le comportement environnemental ont été analysés. Enfin une planche expérimentale a été réalisée pour étudier la faisabilité in situ et de faire un suivi mécanique et environnemental. La méthodologie adoptée afin de répondre aux exigences pour une utilisation en couche de fondation est résumée sous la forme d'un organigramme présenté dans la Figure 4.1.

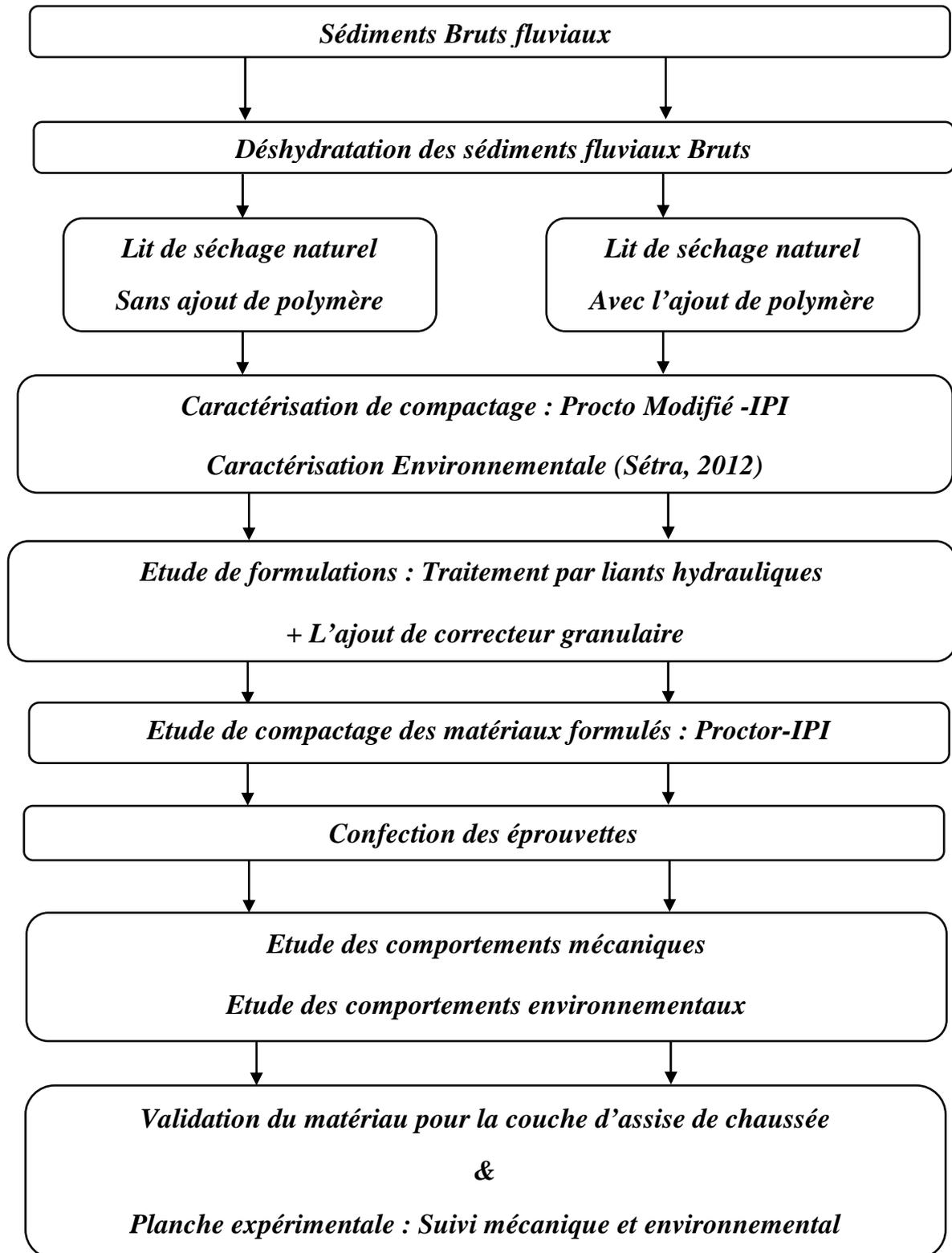


Figure 4.1 : Organigramme de la méthodologie de valorisation des sédiments fluviaux.

4.1 Préparation des matériaux

La déshydratation est une opération indispensable pour aboutir à une teneur en eau efficace afin de l'utiliser en technique routière. La déshydratation des sédiments dans ce chapitre a été réalisée par la méthode de lit de séchage présentée à la section 3.3 (Chapitre 3). Afin de diminuer la teneur en eau et d'avoir une quantité suffisante de sédiments, des lits de séchage de grandes dimensions ont été utilisés. Cette technique ne permet pas de diminuer la teneur en eau à seuil souhaitable pour les utiliser dans les formulations. Au bout de cinq semaines le séchage a été finalisé dans l'étuve réglée à 40°C. Le choix de cette température a été choisi afin d'éviter toutes les modifications des caractéristiques physico-chimiques, et la dégradation de la matière organique. ((DUBOIS, 2006) ; (NT.TRAN , 2009); (MIRAOUIM, 2010) ; (DIA .M, 2013)). A la suite de la phase de déshydratation les sédiments (bruts et floclés) ont été émiettés à l'aide d'un concasseur à lamelles (Figure 4.2).



Figure 4.2 : Appareillage utilisé pour le concassage des sédiments.

4.2 Caractérisation des liants

Pour satisfaire aux critères requis pour utiliser les sédiments en couche de fondation, un traitement mixte à la chaux et au liant hydraulique Rolac 645 a été effectué. Ce traitement a été réalisé pour les sédiments bruts et les sédiments floclés par l'ajout de polymères.

4.2.1 La chaux

La chaux vive utilisée est produite par le groupe Lhoist (Belgique). Elle contient 90% de CaO et moins de 2% de MgO. La granulométrie a été déterminée par la méthode de la granulométrie laser (Figure 4.4). La limite de fixation de la chaux est définie par la quantité

suffisante de chaux pour atteindre un milieu basique de $\text{pH} = 12.4$. Ce milieu est fortement nécessaire pour l'hydratation du ciment et de la chaux. Cet essai consiste à mesurer le pH d'un mélange d'eau déminéralisée et de sédiments avec un ratio d'eau/sédiment égal 5 (DUBOIS.V, 2006). Le pourcentage de la chaux est incorporée jusqu'à atteindre un pH égal à 12,4. Cet essai est réalisé sur les sédiments de la Belgique et de l'Angleterre déshydratés avec et sans polymères.

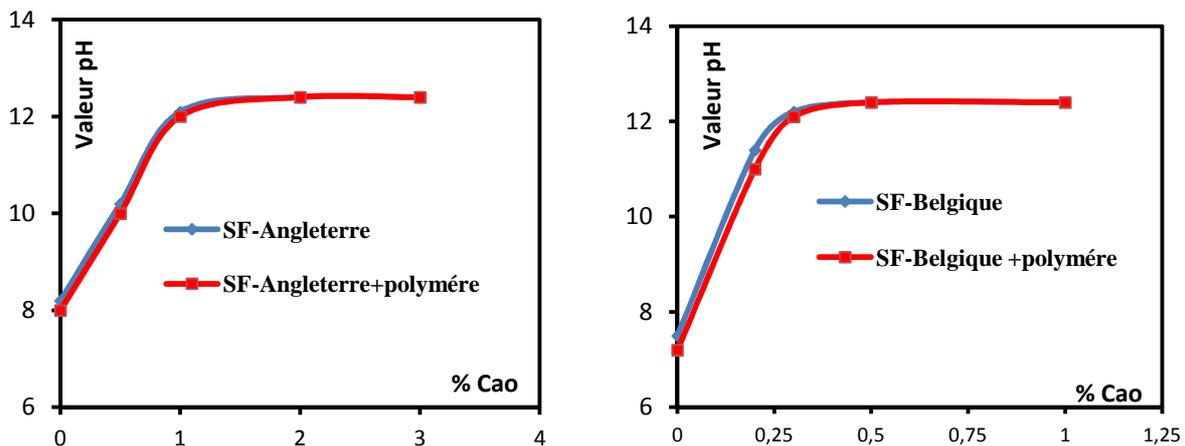


Figure 4.3 : Evolution du pH en fonction du dosage de chaux.

La Figure 4.3, présente les résultats de la limite de fixation de la chaux des sédiments étudiés. Nous pouvons remarquer que les sédiments de l'Angleterre nécessitent une quantité élevée de chaux pour atteindre la stabilité par rapport aux sédiments de la Belgique. Ces différences pourraient être expliquées par la différence de taux de matières organiques entre les deux sédiments. Il faut environ 2% de la chaux pour stabiliser le pH à 12.4 pour le sédiment de l'Angleterre, et de 0.5% pour le sédiment de la Belgique. En revanche, nous ne constatons pas de différences entre les sédiments bruts et les sédiments déshydratés par l'ajout de polymères.

4.2.2 Liant hydraulique

Le liant hydraulique utilisé dans cette étude est de type Rloac 645. Ce liant est produit à l'usine du Havre. Il est constitué de 65% de laitier, 35% de Clinker Portland et d'une faible quantité de sulfate de calcium inférieur à 3%. Ce produit est spécifiquement adapté pour le traitement des granulats et des sols pour la réalisation d'assises de chaussées, de couches de forme, et de terrassements. La quantité de liant hydraulique Rolac 645 a été fixée à 6% en masse de mélange, ce qui est similaire au dosage habituellement utilisé pour un traitement des

sols en technique routière. La composition chimique de liant hydraulique et sa courbe granulométrique sont exposées respectivement dans le tableau 4.1 et la figure 4.4.

SO3(%)	Clinker K(%)	Calcaire (%)	Masse volumique absolue $\rho_s(\text{g.cm}^{-3})$	Masse volumique apparente $\rho_d(\text{g.cm}^{-3})$	Surface spécifique ($\text{cm}^2.\text{g}^{-1}$)
< 3	35±10	65 ±10	2.9	1	≥ 4000

Tableau 4.1 : Caractéristiques du LHR ROLAC 645.

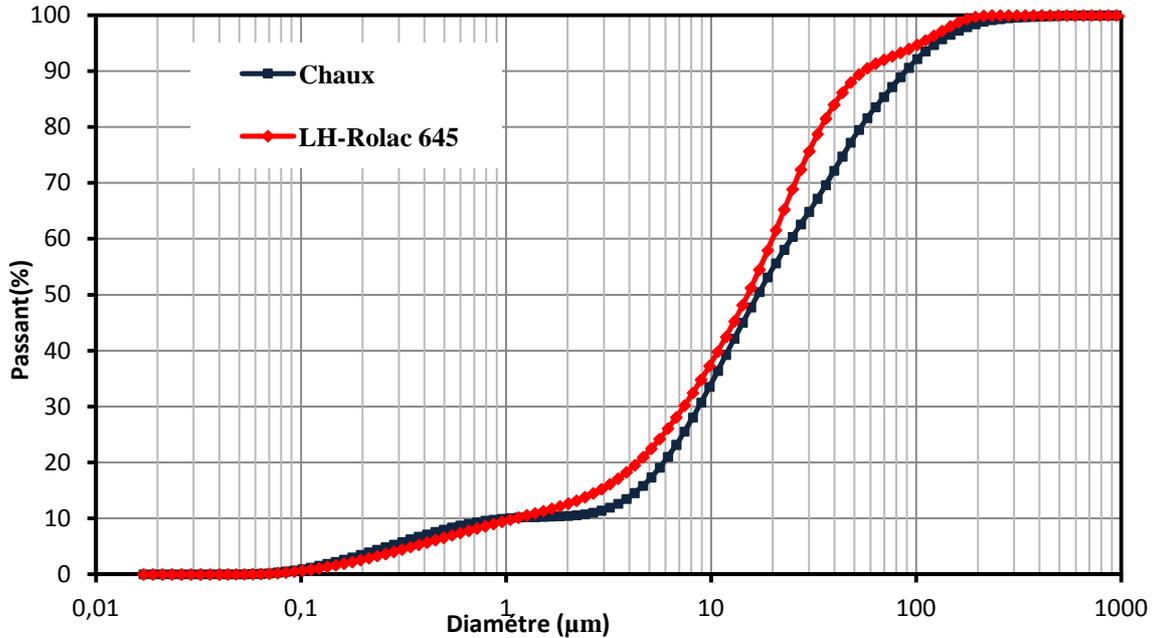


Figure 4.4 : Distributions granulométriques de la chaux et LH-Rolac645.

4.3 Comportement des sédiments traités à la chaux et au LH- ROLAC 645.

Un traitement mixte de la chaux et au ciment est entrepris pour explorer leur efficacité sur les sédiments bruts et les sédiments floculés par l'ajout de polymères. Ces essais ont pour but d'établir une comparaison entre ces différents sédiments et d'évaluer leurs potentiels pour une utilisation en couche de fondation.

4.3.1 Performance mécanique à court terme

Cette étude permet d'observer l'influence du traitement aux liants hydrauliques sur les propriétés en termes de compacité et de portance, sur les sédiments bruts et les sédiments déshydratés par l'ajout de polymères. Les différents mélanges sont présentés dans le tableau 4.2. Les courbes Proctor et d'IPI(%) de mélanges proposés sont exposés dans les figures 4.5 et 4.6.

Sédiments fluviaux	Formulation	Chaux (%)	Rolac 645 (%)
Traitement-SF-Angleterre	TSFA	2	6
Traitement-SF-Angleterre déshydraté par l'ajout de polymères	TSFA+Poly	2	6
Traitement-SF-Belgique	TSFB	0,5	6
Traitement-SF-Belgique déshydraté par l'ajout de polymères	TSFB+Poly	0,5	6

Tableau 4.2 : Proportion de la chaux et du liant hydraulique Rolac 645.

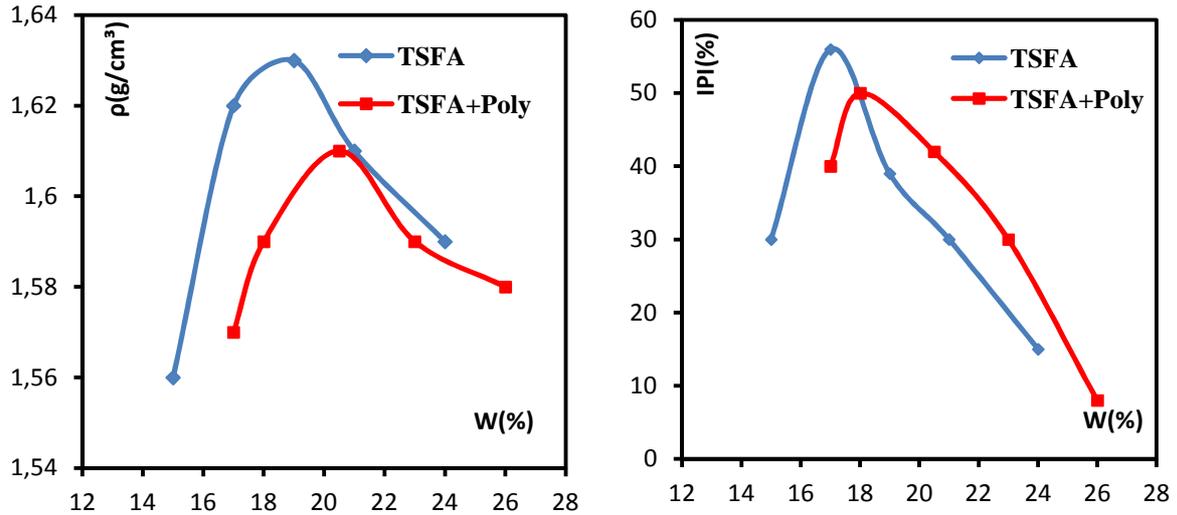


Figure 4.5 : Courbe de compactage et d'IPI(%) des sédiments de l'Angleterre (bruts, déshydratés par polymères) traités par l'ajout de la chaux et du ciment.

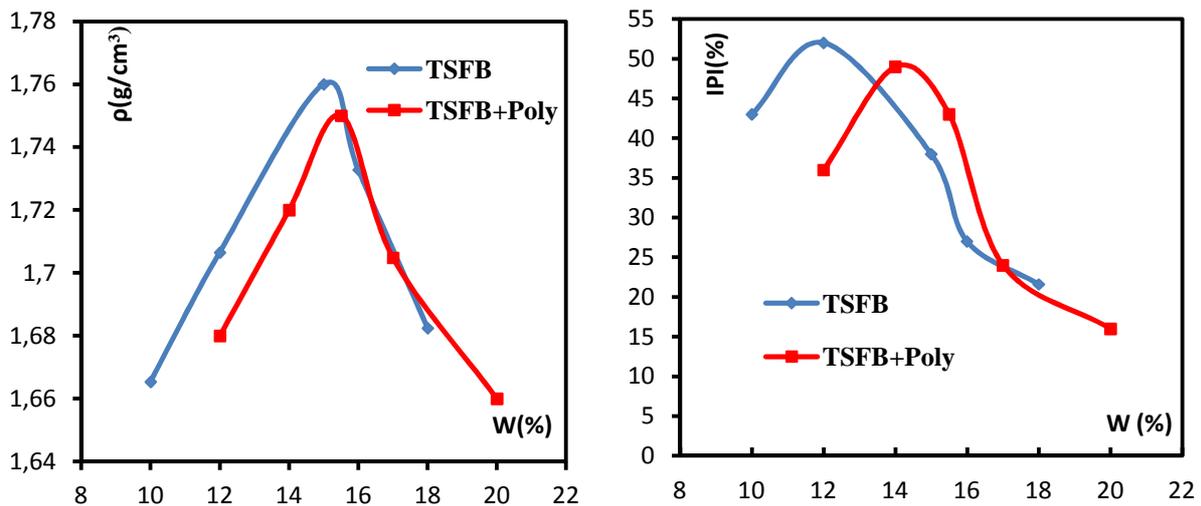


Figure 4.6 : Courbe de compactage et d'IPI(%) des sédiments de la Belgique (bruts, déshydratés par polymères) traités par l'ajout de la chaux et du ciment.

Selon ces figures (Figure 4.5 et Figure 4.6), on enregistre une diminution de la densité sèche optimale, et un déplacement de la teneur en eau vers la droite pour les sédiments traités à la chaux et au liant hydraulique. Cela pourrait être expliqué par la consommation de l'eau par liant hydraulique. On remarque également une diminution de la densité sèche et une augmentation de la teneur en eau pour les sédiments déshydratés par l'ajout de polymères après traitement. Cette observation pourrait être expliquée par la présence de matière organique. Les valeurs d'IPI(%) des sédiments déshydratés par l'ajout de polymères après les traitements (liants hydrauliques) restent supérieures à celles des sédiments bruts traités (liants hydrauliques).

Nous pouvons constater que le traitement réalisé améliore légèrement les performances mécaniques à court terme (Tableau 4.3). Néanmoins cette amélioration ne répond pas aux critères pour les utiliser en couche de fondation.

<i>Formulations</i>	<i>TSFA</i>	<i>TSFA+POLY</i>	<i>TSFB</i>	<i>TSFB+POLY</i>
W_{OPM} (%)	19,00	20,50	15,00	15,50
ρ_{OPM} (g/cm ³)	1,63	1,62	1,76	1,75
<i>IPI</i> (%) à W_{OPM} (%)	26,00	28,00	32,00	33,00

Tableau 4.3 : Synthèse des résultats des sédiments étudiés.

4.3.2 Confection des éprouvettes

Le mode de confection des éprouvettes dépend de la dimension maximale des plus gros éléments contenus dans le matériau. Pour cette étude, on se base sur la norme NF P 98114 3 relative à l'étude des matériaux traités aux liants hydrauliques. Les essais mécaniques sont réalisés sur des éprouvettes cylindriques d'élanement 2 (5 cm de diamètre et 10 cm de longueur). Les modalités de confection des éprouvettes sont décrites dans la norme NF P 98 230 2. Tout d'abord il s'agit de définir la densité sèche et la teneur en eau des sédiments traités obtenus à travers l'essai de compactage, on peut ensuite déterminer la masse humide nécessaire pour l'introduire dans le moule selon l'équation comme suit :

$$M = \frac{V * \rho_{OPM} * (100 + W_{OPM})}{100} \quad E.q 4.1$$

Avec :

- M : Masse théorique de l'éprouvette à la confection (g)
- ρ_d : Masse volumique sèche fixée à la confection de l'éprouvette (g/cm^3)
- V : Volume de l'éprouvette (cm^3)
- w : Teneur en eau fixée à la confection de l'éprouvette (%)

Après la confection des éprouvettes, elles sont conservées dans des boîtes en plastique hermétique, et puis sont stockées dans une salle de conservation à 20°C.

4.3.3 Résistance à la compression

Le critère de traficabilité est jugé satisfaisant dès lors que la résistance à la compression simple R_c est supérieure à 1MPa. L'objectif de cet essai consiste tout d'abord, à déterminer l'âge autorisant la circulation des engins sur les sédiments traités (Tableau 4.2), ainsi que pour apprécier la cinétique de prise des liants. L'essai est réalisé par avec une presse mécanique de type Instron[®] d'une capacité de 150 kN (Figure 4.7).



Figure 4.7 : Dispositif de mesure résistance en compression.

L'évolution de critère de traficabilité (R_c) a été déterminée à 7, 14, 28, 60, 90 et 180 jours pour les sédiments étudiés. Les résultats sont présentés dans la figure 4.8. Trois échantillons ont été testés pour chaque formulation et chaque échéance.

On observe pratiquement aucune différence au niveau de la résistance à la compression entre les sédiments bruts et les sédiments déshydratés par l'ajout de polymères. En revanche, l'incorporation de liants hydrauliques provoque une augmentation remarquable des

résistances à la compression par rapport aux sédiments non traités (liants hydrauliques). Les résistances à la compression des formulations TSFA et TSFB sont élevées respectivement par rapport au TSFA+POLY et TSFB+POLY dont l'augmentation est de l'ordre de 16% à 20%. De plus, on peut observer également que les résistances à la compression des formulations TSFA et TSFB sont quasi constantes à partir de 90 jours de cure, et que la résistance à la compression des formulations de TSFA+POLY et TSFB+POLY s'accroît progressivement (de façon non linéaire) en fonction de la période de cure. Il faut noter également que les résistances à la compression des formulations de TSFA et TSFA+POLY sont supérieures à 1MPa pour toutes les périodes de cure, la formulation TSFB est supérieure à 1MPa à partir de 28 jours de cure et pour la formulation TSFB+POLY est supérieure à 1MPa à partir de 90 jours de cure. L'ajout de la chaux et du ciment (Rolac 645) aux sédiments étudiés conduit à la formation de phases hydratées CAH et CSH, provoquant généralement une amélioration des résistances mécaniques. Cependant, la formation des phases hydratées est liée à la nature minéralogique, à la présence de la matière organique dans les sédiments, et aux types de liants hydrauliques.

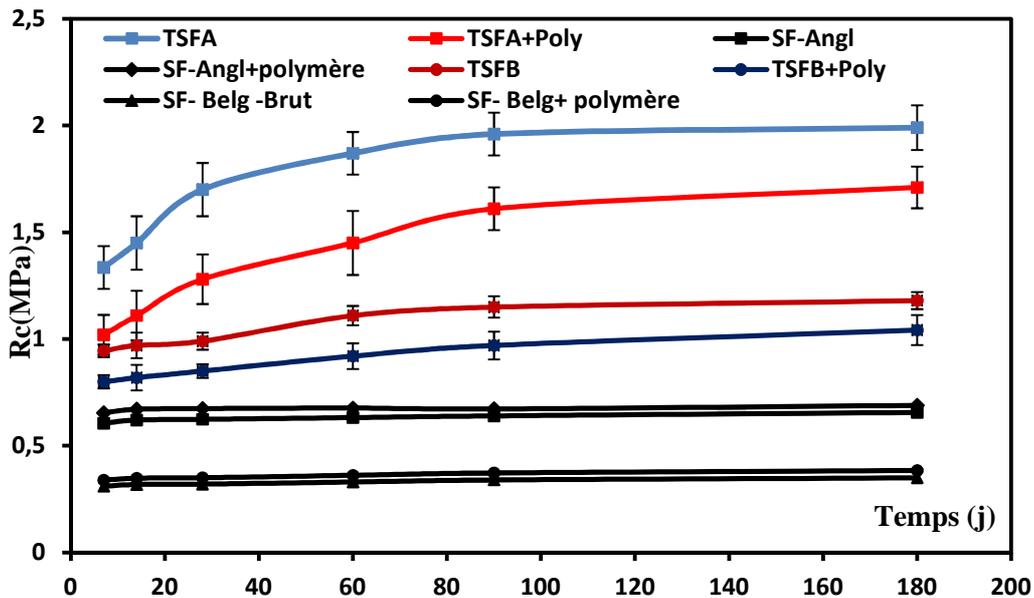


Figure 4.8 : Evolution des résistances à la compression des matériaux élaborés en fonction du temps.

4.3.4 Résistance à la traction indirecte & module d'élasticité

La résistance à la traction se détermine à travers l'essai de traction indirecte ou essai de traction brésilienne (R_{tb}) selon la norme NF EN 1328. La résistance diamétrale est mesurée à

partir de la force appliquée par la presse, en appliquant une charge linéique sur deux génératrices diamétralement opposées de l'éprouvette (Figure 4.9).



Figure 4.9 : Dispositif de mesure résistance en traction (R_t) et module d'élasticité(E).

Après avoir déterminé la résistance à la traction indirecte (figure 4.8), les mesures du module d'élasticité sont effectuées à l'aide de deux extensomètres qui permettent de mesurer les variations du diamètre horizontal de l'éprouvette grâce à quatre capteurs. Deux capteurs sont positionnés à 0° et deux autres à 60° par rapport à l'axe de l'échantillon. Ces mesures sont réalisées à 30% de la charge de rupture qui est située dans le domaine de déformation élastique des matériaux. Le dispositif d'essai de détermination du R_t et E_t est représenté sur la Figure 4.9.

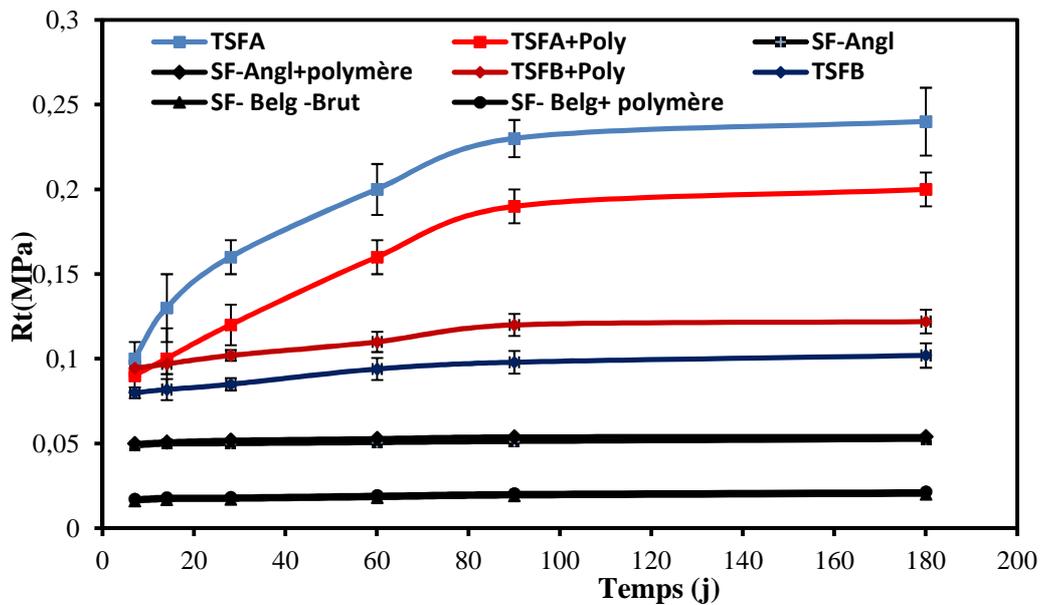


Figure 4.10 : Evolution des résistances à la traction des matériaux élaborés en fonction du temps.

Selon la figure 4.10, nous avons remarqué que les résistances en traction de toutes les formulations sont quasi constantes à partir de 90 jours de cure, avec des valeurs élevées pour les formulations TSFA par rapport à TSFA+POLY et de TSFB par rapport à TSFB+POLY. Nous pouvons constater que les résistances mécaniques des sédiments bruts traités sont supérieures aux sédiments flocculés traités. Ceci pourrait être expliqué par la présence de matière organique dans les sédiments déshydratés par polymère, qui peut empêcher la prise des liants hydrauliques. Concernant les modules d'élasticité (Figure 4.11), les liants hydrauliques contribuent à une l'augmentation en cours du temps du module d'élasticité.

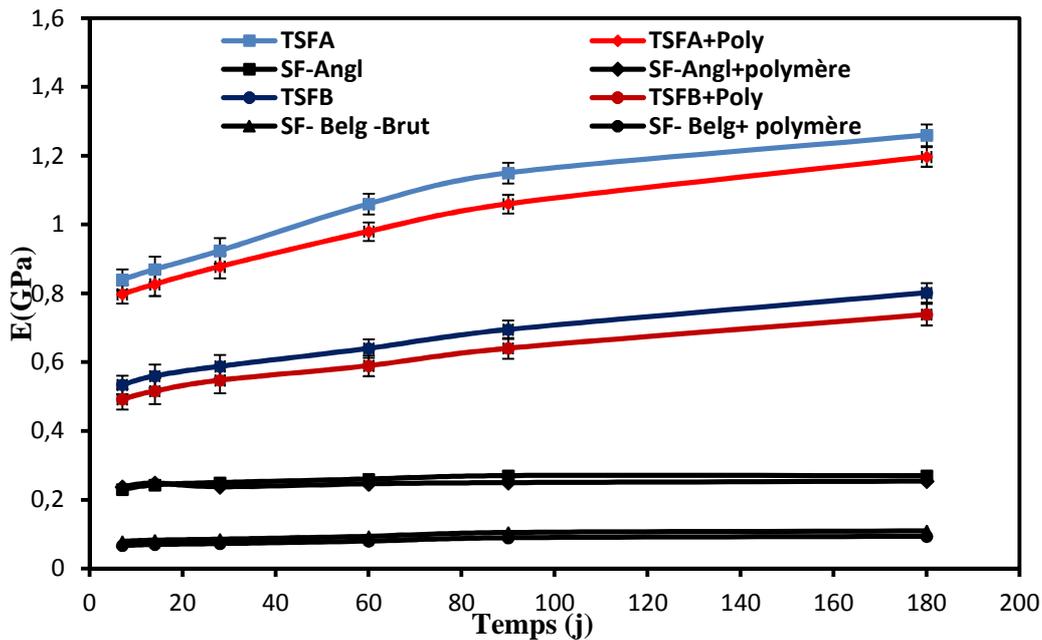


Figure 4.11 : Evolution des modules d'élasticité des matériaux élaborés en fonction du temps.

4.3.5 Aptitude au traitement

L'essai d'aptitude au traitement permet de vérifier qu'un matériau traité aux liants hydrauliques présente la stabilité dimensionnelle et le comportement mécanique envisagé.

L'essai d'aptitude au traitement est décrit dans la norme NF P 94-100. L'objectif de cet essai est d'accélérer les phénomènes de prise hydraulique se produisant dans les formulations étudiées (TSFA, TSFA+POLY, TSFB et TSFB+POLY) afin de mesurer les valeurs de gonflement et de résistance en compression diamétrale. Il s'effectue sur des éprouvettes d'élanement 1 ($\phi \cdot h = 5 \cdot 5$) dont les modalités de conservation particulières suivant le type de traitement et les critères du jugement (Chapitre 1).

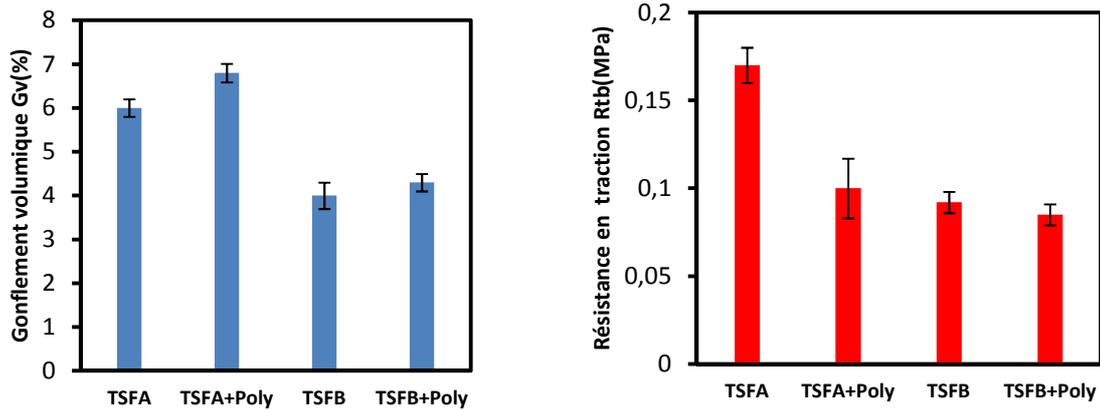


Figure 4.12 : Aptitude au traitement- Gonflement volumique $G_v(\%)$ et résistances diamétrales R_{tb} (MPa) pour les formulations élaborées.

Formulations	TSFA	TSFA+POLY	TSFB	TSFB+POLY
$G_v(\%)$	6±0.5	6.8±0.7	4±0.8	4.3±0.7
$R_{tb}(MPa)$	0,17±0.06	0,1±0.05	0,092±0.06	0,085±0.08
Aptitude du sol	Douteux	Douteux	Douteux	Douteux

Tableau 4.4 : Aptitude au traitement- Gonflement volumique $G_v(\%)$ et résistances diamétrales R_{tb} (MPa) pour les formulations élaborées.

Les résultats obtenus d'essai d'aptitude des formulations élaborées (TSFA, TSFA+POLY, TSFB, TSFB+POLY) sont présentés sur la figure 4.12 et dans le Tableau 4.4. On peut constater que les valeurs des résistances en compression diamétrale obtenues sont inférieures à 0.2MPa et les valeurs des gonflements volumiques sont supérieures à 5 %. Selon les valeurs des seuils préconisées par GTS (GTS-LCPC-SETRA, 2000), le critère de jugement pour évaluer l'aptitude de ces matériaux élaborés est douteux. En revanche, nous constatons une différence des valeurs de gonflement volumique et des résistances en compression diamétrale entre les formulations TSFA et TSFA+POLY, et entre les formulations de TSFB et TSFB+POLY. Ceci pourrait être expliqué par la présence d'éléments chimiques susceptibles d'interférer dans les réactions de l'hydratation, tels que la matière organique, sulfates, sulfures, chlorures et nitrates. (GTS-LCPC-SETRA, 2000).

4.3.6 Performances mécaniques des matériaux traités

Afin d'évaluer la faisabilité d'utilisation des mélanges élaborés en couche de fondation, il est indispensable de déterminer le module d'élasticité et la résistance mécanique à la traction

pour la classification de ces matériaux. Le couple E-Rt doit être défini à une période de cure de 360 jours. Lorsque la période ne permet pas de mesures à 360 jours, on peut déduire le couple d'E-Rt à partir de mesures effectuées à 28, 60 ou 90 jours, en général selon le traitement adapté. Pour le classement de ces matériaux, nous avons utilisé les coefficients empiriques proposés par la norme NF-P98-114-2 (Chapitre 1).

A partir des résultats obtenus de Rt et E à 60 et 90 jours de cure, nous avons positionné les formulations TSFA, TSFA+POLY, TSFB et TSFB+POLY sur l'abaque de classement (Figure 4.13 et Figure 4.14).

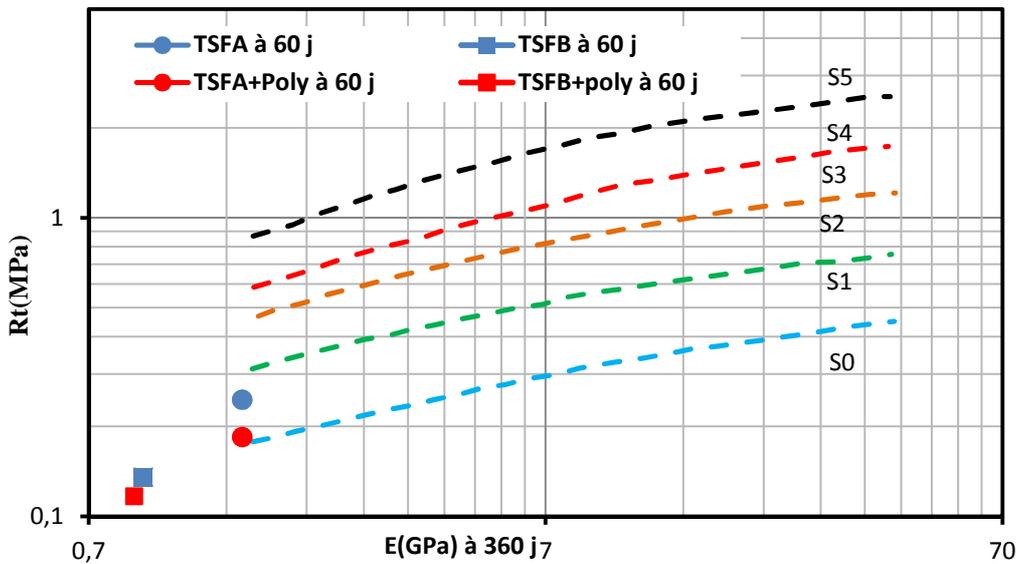


Figure 4.13 : Classification des matériaux élaborés à 60 jours de cure.

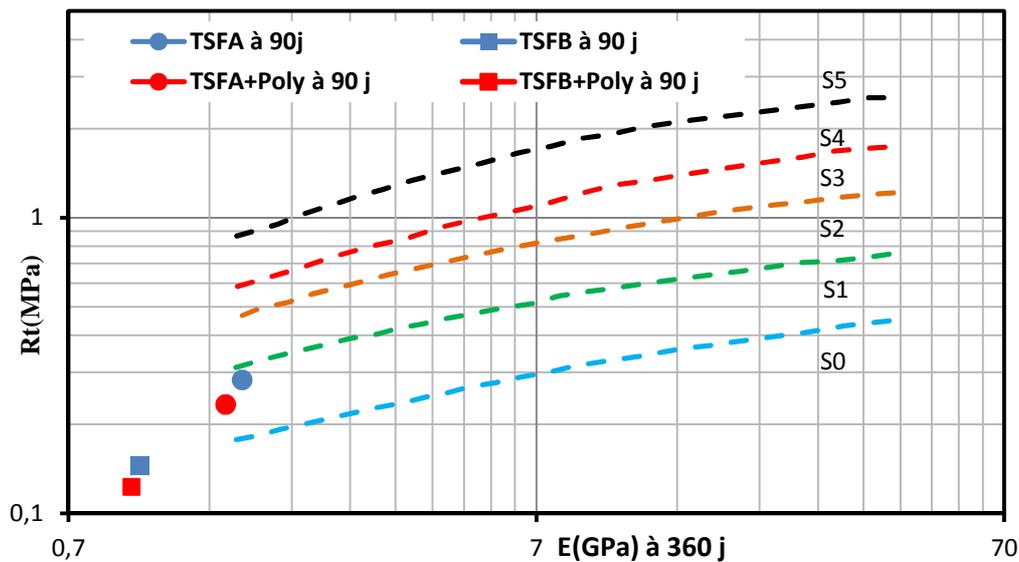


Figure 4.14 : Classification des matériaux élaborés à 90 jours de cure

Les formulations TSFA et TSFA+POLY possèdent des valeurs similaires au niveau des résistances mécaniques R_t et des modules d'élasticité, de même pour les formulations TSFB et TSFB+POLY. En revanche, les formulations TSFA et TSFA+POLY appartiennent à la classe S1 et les formulations de TSFB et TSFB+POLY appartiennent à la classe S0 pour les périodes de 60 jours et de 90 jours de cure. Les formulations TSFA, TSFA+POLY, TSFB et TSFB+POLY ne possèdent pas les caractéristiques suffisantes pour une utilisation en couche de fondation. Comme mentionné, les dosages en chaux et en ciment sont habituellement limités pour des raisons économiques. Plusieurs travaux de recherche menés pour valoriser les sédiments fins sont dirigés vers une utilisation de faible dosage de liants hydrauliques (DUBOIS, 2006) (MIRAOUIM, 2010) (ACHOUR.R, 2013) (NT.TRAN, 2009). L'ajout des correcteurs granulaires est nécessaire pour améliorer les textures des mélanges, en diminuant la teneur en eau et la matière organique afin d'atteindre des performances mécaniques souhaitées pour l'utiliser en couche de fondation.

4.4 Apport d'un correcteur granulaire

L'ajout d'un correcteur granulométrique dans les sédiments a pour but d'augmenter la compacité et d'atténuer les paramètres d'état des sédiments comme, la teneur en eau, la fraction fine, la matière organique et les polluants. L'ajout d'un correcteur associé aux liants hydrauliques contribue à une amélioration des performances mécaniques pour une utilisation en technique routière. ((COLIN.D, 2003), (DUBOIS, 2006) (TRAN.N-T, 2009) (MIRAOUIM, 2010); (MIRAOUIM, 2010) (MAHERZI.W, 2013); (ACHOUR.R, 2013)). Le choix des correcteurs granulaires doit satisfaire à la fois des contraintes économiques, techniques et environnementales. Dans cette étude le correcteur granulométrique choisi est du sable Boulonnais de 0/4mm de diamètre. L'utilisation du sable Boulonnais est avantageuse en raison de son inertie (TRAN.N-T, 2009) et de sa grande disponibilité dans la région. La figure 4.15 présente la courbe granulométrique du sable Boulonnais utilisés.

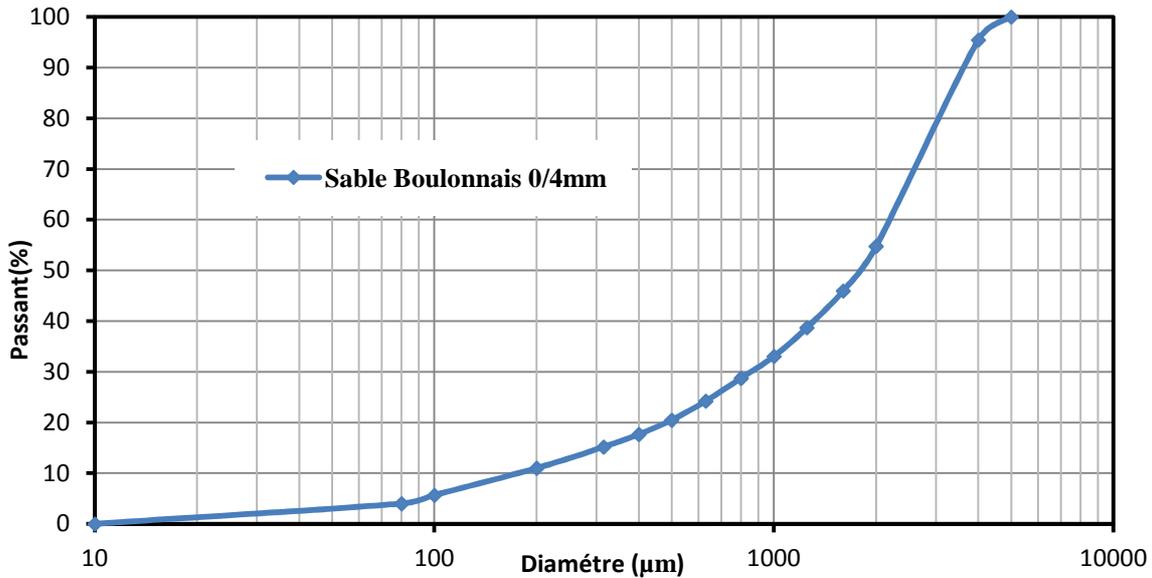


Figure 4.15 : Distributions granulométriques du sable Boulonnais.

4.4.1 Compacité des mélanges : Modèle d'Empilement Compressible (MEC)

L'objectif de cette étude est de déterminer la compacité maximale en fonction des pourcentages des matériaux étudiés (sédiments – correcteur granulaire). Pour cela, on se base sur le Modèle d'Empilement Compressible (MEC) qui a été développée pour l'optimisation du squelette granulaire du béton (LARRARD.F, 2000). Le choix des proportions de correcteurs granulaires a été déterminé par les méthodes expérimentales et théoriques (René LCPC).

- Première étape : Détermination expérimentale de la compacité des mélanges.

On prépare chaque mélange d'1 kg avec la proportion donnée de sédiments et de sable boulonnais. Une quantité de 400g de mélange doit être employée pour la réalisation d'une éprouvette cylindrique (5 cm x 10 cm). La pression moyenne de 10 MPa a été appliquée par la presse sur celle-ci. La compacité de chaque mélange est calculée en divisant la masse de l'échantillon par la masse volumique absolue moyenne du granulat, puis par son volume total. Chaque valeur expérimentale prise en compte dans le modèle est la moyenne des trois mesures.

➤ Deuxième étape : Détermination théorique de la compacité des mélanges

Un logiciel de calcul a été utilisé au préalable afin de déterminer la compacité théorique des mélanges. Ce logiciel a été développé au laboratoire central des ponts et chaussées, et est nommé René LCPC. L'indice de serrage utilisé dans les calculs était égal à 7. Cette valeur a été obtenue par TRAN (NT.TRAN, 2009) en faisant un rapprochement entre les résultats de la compacité obtenus expérimentalement et les valeurs théoriques obtenues avec différentes valeurs de l'indice de serrage.

➤ Résultats

Les tableaux 4.5 et 4.6 présentent les résultats expérimentaux et théoriques de compacité des sédiments étudiés (Sédiments Bruts et Sédiments floculés) et de sable Boulonnais. Ces résultats sont exposés dans les figures 4.16 et 4.17. On observe une concordance entre les résultats expérimentaux et théoriques pour une valeur de l'indice de serrage K égal à 7. Cela confirme parfaitement que l'indice de serrage égal à 7 correspond bien à l'énergie de compactage d'une pression statique de 10MPa.

<i>Constituant fine %</i>	<i>Compacité Théorique</i>	<i>Compacité Expérimentale-SF-Angl</i>	<i>Compacité Expérimentale-SF+Polymères-Angl</i>
0	0,760	0,757	0,753
10	0,768	0,760	0,756
20	0,773	0,765	0,761
30	0,778	0,770	0,766
40	0,773	0,765	0,761
50	0,768	0,760	0,756
60	0,763	0,755	0,754
70	0,750	0,745	0,741
80	0,730	0,722	0,721
90	0,710	0,702	0,702
100	0,687	0,680	0,679

Tableau 4.5 : Compacité des mélanges binaires du sédiment de l'Angleterre et du sable Boulonnais.

Constituant fine %	Compacité Théorique	Compacité Expérimentale-SF-Bel	Compacité Expérimentale-SF+Polymères-Bel
0	0,760	0,761	0,756
10	0,776	0,747	0,743
20	0,776	0,747	0,744
30	0,766	0,740	0,734
40	0,690	0,650	0,646
50	0,640	0,600	0,596
60	0,543	0,480	0,476
70	0,458	0,430	0,427
80	0,417	0,402	0,399
90	0,358	0,330	0,328
100	0,311	0,280	0,278

Tableau 4.6 : Compacité des mélanges binaires du sédiment de la Belgique et du sable Boulonnais.

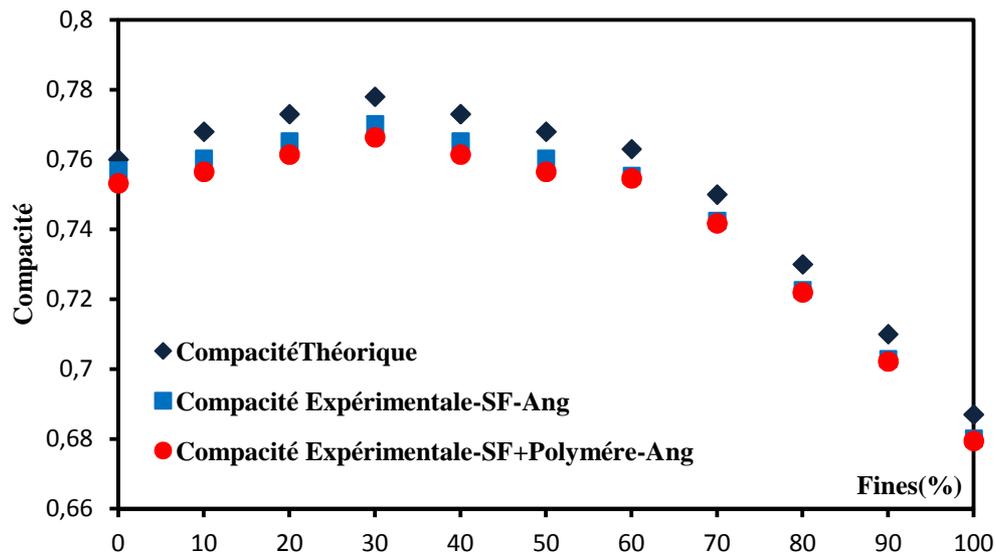


Figure 4.16 : Compacité des mélanges Sédiment de l'Angleterre et du Sable Boulonnais.

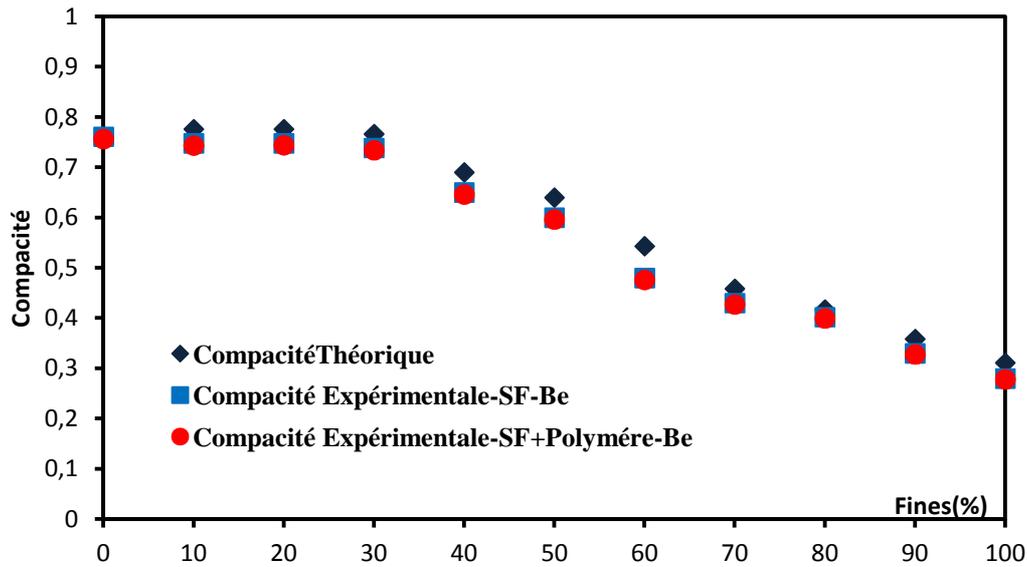


Figure 4.17 : Compacité des mélanges Sédiment de la Belgique et du Sable Boulonnais.

4.4.2 Caractérisation des matériaux élaborés

Sur la base des résultats obtenus par la Méthode d'Empilement Compressible (MEC), les compacités maximales des mélanges ont été fixées à une portion de 30 % de sédiments. On remarque également que les compacités des sédiments de l'Angleterre (Sédiments bruts et Sédiments floculés) sont similaires jusqu'à environ 70% de portion fine, et environ 50 % pour les sédiments de la Belgique (Sédiments bruts et Sédiments floculés) par rapport à la compacité maximale. À l'issue de cette constatation, les constituants des matériaux élaborés pour cette étude sont présentés dans tableau 4.7 dont le but d'étudier l'effet de la variation de la compacité sur le comportement mécanique et de valoriser une quantité importante des sédiments. Le pourcentage de la chaux incorporé dans les formulations élaborées a été fixé à 2 % pour les formulations à base de sédiments d'Angleterre et à 0,5 % pour les formulations à base de sédiments de la Belgique (basé sur les résultats obtenus par la limite de fixation de la chaux (Section 4.2.1)), ainsi que le liant hydraulique Rolac 645 à 6% pour toutes les formulations.

Formulation	SF(%)	SB(%)	LH-Rolac 645	Chaux	Cu	Cc
SF-Angl- SFA-30%	30%	70%	6%	2%	21	0,75
SF-Angl-SFA-70%	70%	30%	6%	2%	25	2,80
SF-Angl+ polymères-SFAP-30%	30%	70%	6%	2%	18	0,75
SF-Angl+polymères -SFAP-70%	70%	30%	6%	2%	20	2,80
SF-Bel-SFB-30%	30%	70%	6%	0,5%	18	0,20
SF-Bel-SFB-50%	50%	50%	6%	0,5%	8	0,35
SF-Bel+polymères-SFBP-30%	30%	70%	6%	0,5%	18	0,20
SF-Bel+polymères-SFBP-50%	50%	50%	6%	0,5%	8	0,30

Tableau 4.7 : Compositions des formulations étudiées.

Les distributions granulométriques des formulations proposées à base des sédiments de l'Angleterre et de la Belgique sont présentées respectivement sur la figure 4.18 et la figure 4.19. Le pourcentage des fractions fines est compris entre 10 % et 20% pour l'ensemble des mélanges. Cependant le coefficient d'uniformité est supérieur à 6 pour toutes les formulations, et le coefficient de courbure est inférieur à 1 sauf pour la formulation de SFA-70%. (Tableau 4.7).

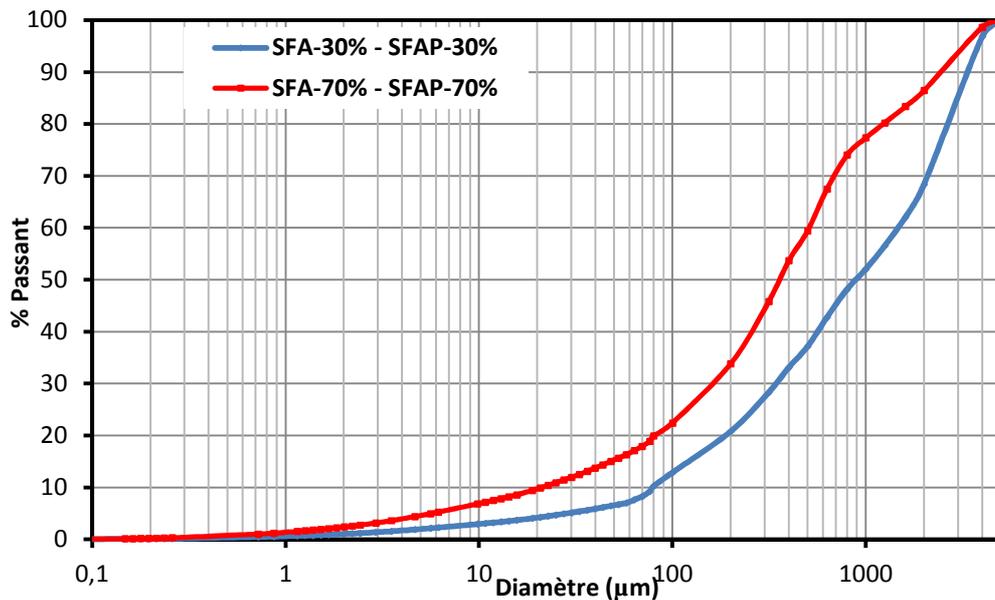


Figure 4.18 : Distribution granulométrique des formulations proposées à base de sédiments de l'Angleterre.

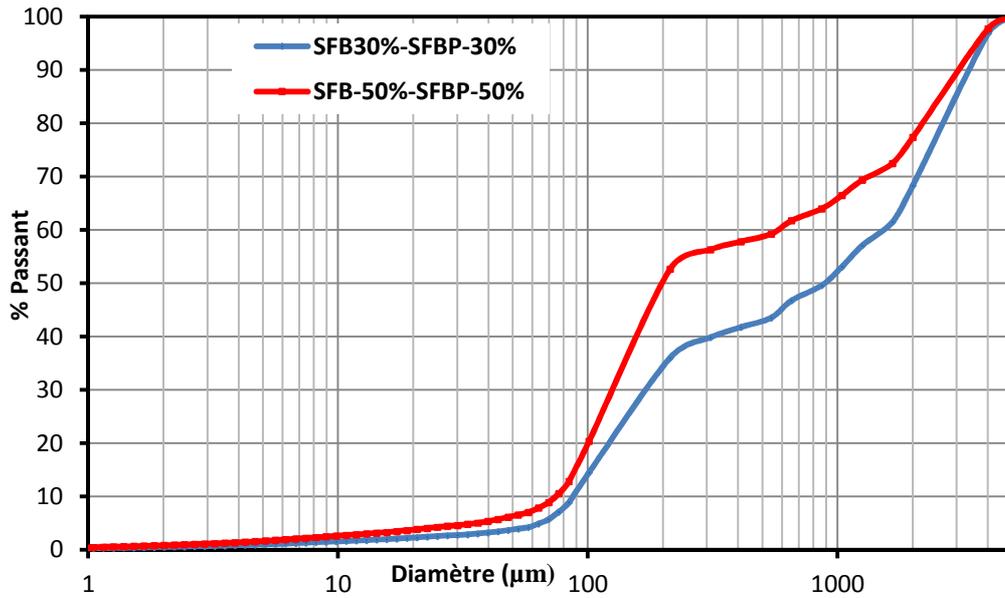


Figure 4.19 : Distribution granulométrique des formulations proposées à base de sédiments de Belgique.

Des mesures de la VBS et de la matière organique MO(%) ont été réalisées sur les matériaux formulés afin de quantifier l’effet de dilution apporté par le correcteur (Tableau 4.8).

Formulation	MO(%)	VBS(%)
SF-Angl- SFA-30%	2,00	0,90
SF-Angl-SFA-70%	4,00	1,56
SF-Angl+ polymères-SFAP-30%	2,50	1,02
SF-Angl+ polymères-SFAP-70%	5,30	2,10
SF-Bel-SFB-30%	2,80	0,25
SF-Bel-SFB-50%	2,20	0,40
SF-Bel+polymères-SFBP-30%	3,40	0,24
SF-Bel+polymères-SFBP-50%	3,70	0,50

Tableau 4.8 : Caractérisation de VBS et MO des formulations

Selon le tableau 4.8, nous constatons une diminution de la matière organique MO(%) et de la valeur de bleu de méthylène après l’ajout du correcteur granulaire.

4.5 Comportement mécanique des formulations à base des sédiments étudiés

4.5.1 Comportement Proctor-IPI(%)

Les figures 4.20 à 4.23 présentent les différentes courbes de Proctor Modifié et de l'IPI(%) des formulations élaborées (sédiments bruts et sédiments déshydratés par l'ajout de polymères).

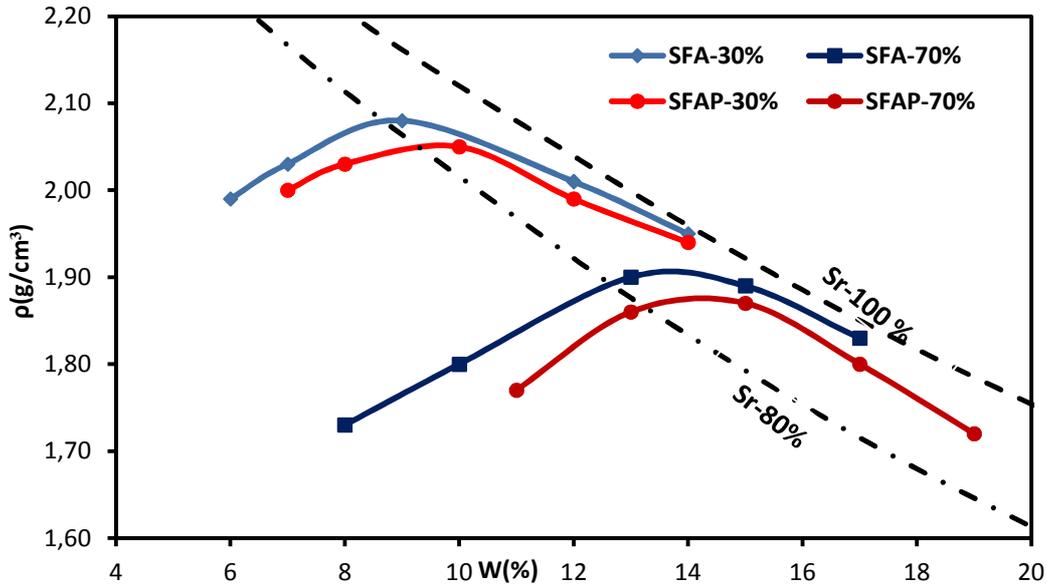


Figure 4.20 : Courbe de Proctor de matériaux formulés à base de sédiments l'Angleterre (Bruts et déshydratés par l'ajout de polymères).

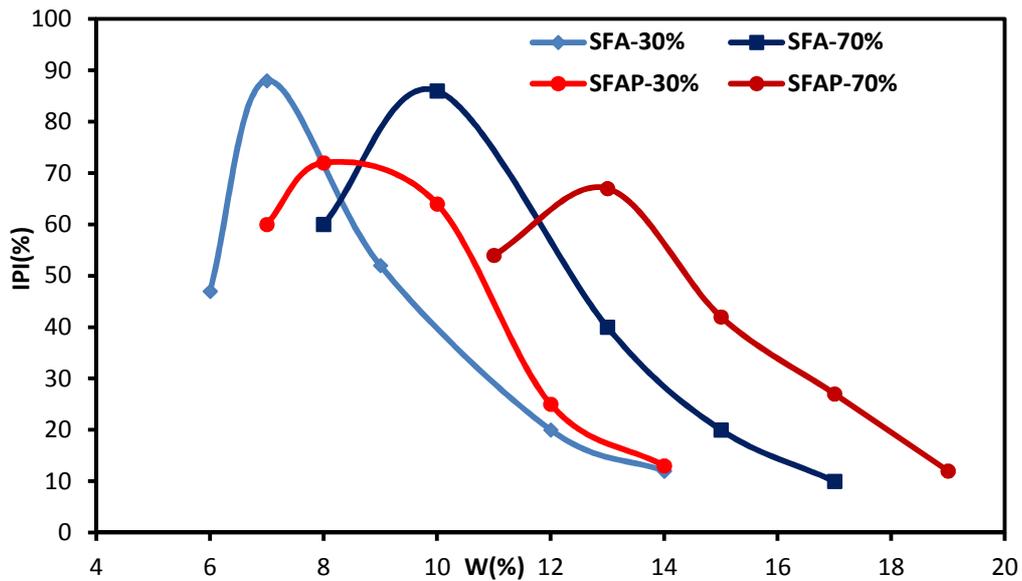


Figure 4.21 : Courbe d'IPI(%) de matériaux formulés à base de sédiments l'Angleterre (Bruts et déshydratés par l'ajout de polymères).

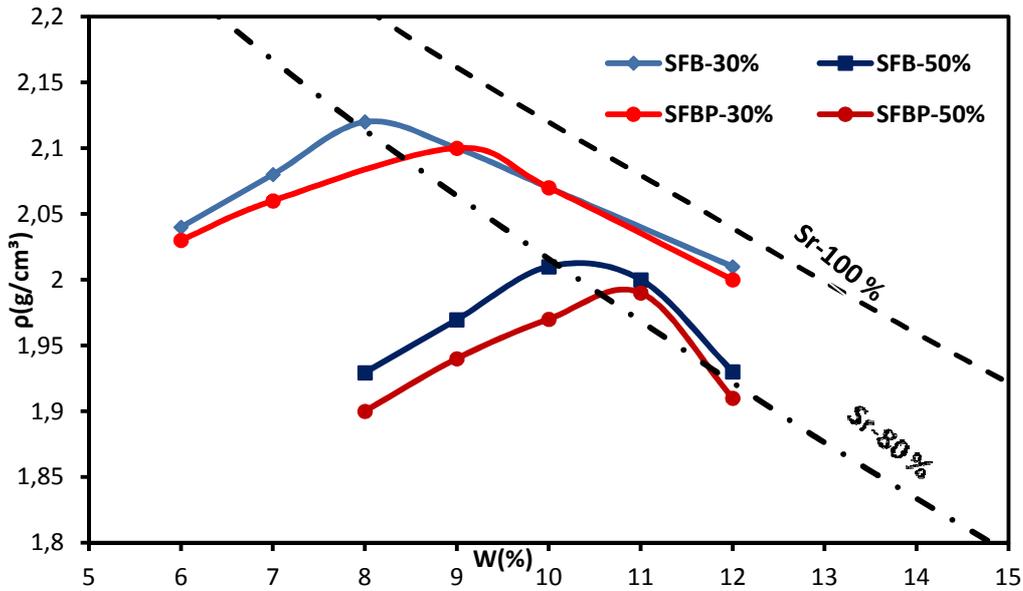


Figure 4.22 : Courbe de Proctor de matériaux formulés à base de sédiments de la Belgique (Bruts et déshydratés par l'ajout de polymères).

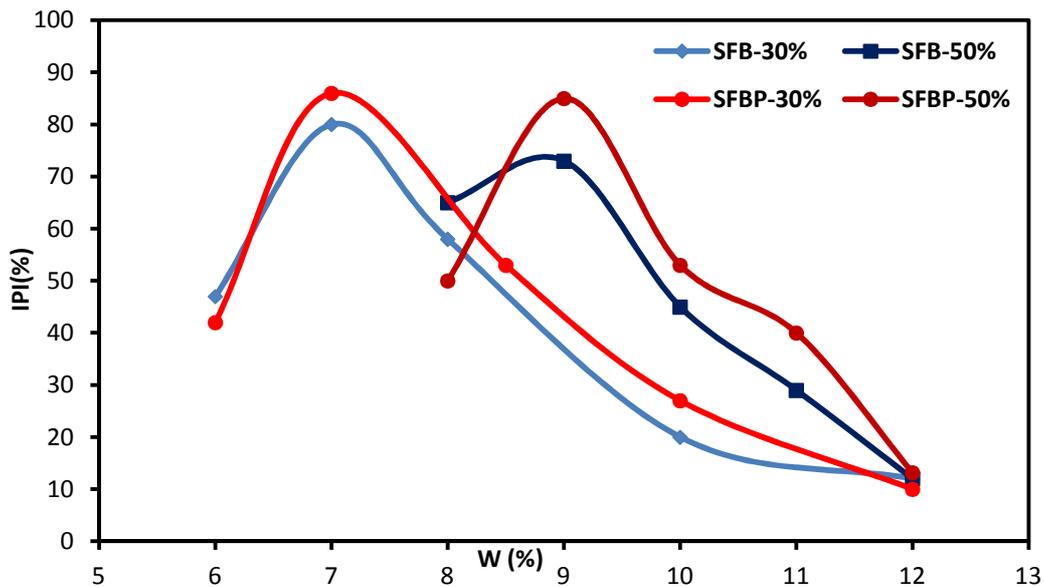


Figure 4.23 : Courbe d'IPI(%) de matériaux formulés à base de sédiments l'Angleterre (Bruts et déshydratés par l'ajout de polymères).

Les résultats expérimentaux obtenus montrent que plus la fraction de sédiments est importante, plus la teneur en eau optimale augmente, avec une diminution de la densité sèche. On observe également que pour les formulations à base de sédiments de l'Angleterre, les teneurs en eau optimales sont systématiquement plus importantes que celles obtenues pour les formulations à base de sédiments de la Belgique (Figure 4.20 et Figure 4.22). En revanche, la

densité sèche optimale est inférieure. Ce résultat a déjà été remarqué lors de l'étude réalisée sur les sédiments bruts qui s'explique par la différence de densité de grains solides.

Le tableau 4.9 synthétise les résultats des essais de Proctor et l'IPI(%) (W_{OPM} , ρ_d , IPI(%) à W_{OPM}) des matériaux élaborés.

Formulation	W_{OPM} (%)	ρ_d (g/cm ³) (%)	IPI(%) à W_{OPM}
SF-Angl- SFA-30%	9	2,08	52
SF-Angl-SFA-70%	13	1,90	40
SF-Angl+ polymères-SFAP-30%	10	2,05	64
SF-Angl+ polymères-SFAP-70%	15	1,87	42
SF-Bel-SFB-30%	8	2,11	58
SF-Bel-SFB-50%	10	1,98	45
SF-Bel+polymères-SFBP-30%	8,50	2,09	53
SF-Bel+polymères-SFBP-50%	11	1,97	40

Tableau 4.9 : Synthèse des caractéristiques optimales de l'essai Proctor Modifié et IPI pour les formulations issues de sédiments bruts et déshydratés par l'ajout de polymères (Belgique-Angleterre).

Nous avons constaté une augmentation de la teneur en eau avec une diminution de la densité sèche optimale pour les formulations à base de sédiments floculés par rapport aux formulations à base des sédiments bruts (Figure 4.20 et Figure 4.22). Cette même remarque a été observée pour les sédiments bruts traités aux liants hydrauliques. La même explication pourrait justifier un tel comportement. En ce qui concerne l'IPI(%), toutes les formulations proposées présentent des IPI(%) ($IPI(\%) \geq 35\%$) souhaitables pour l'utilisation en couche de fondation (Figure 4.21 et Figure 4.23).

4.6 Performances mécaniques des formulations

4.6.1 Résistance à la compression

Les essais de résistance à la compression ont été réalisés sur les formulations à base de sédiments bruts (SFA-30%–SFA-70%-SFB-30%-SFB-50%) et de sédiments déshydratés par l'ajout de polymères (SFAP-30%–SFAP-70%-SFBP-30%-SFBP-50%) aux échéances (7, 14, 28, 60, 90,180 jours). Les valeurs de résistance à la compression ont été obtenues avec une moyenne de trois essais et les résultats sont présentés dans les figures 4.24 et 4.25.

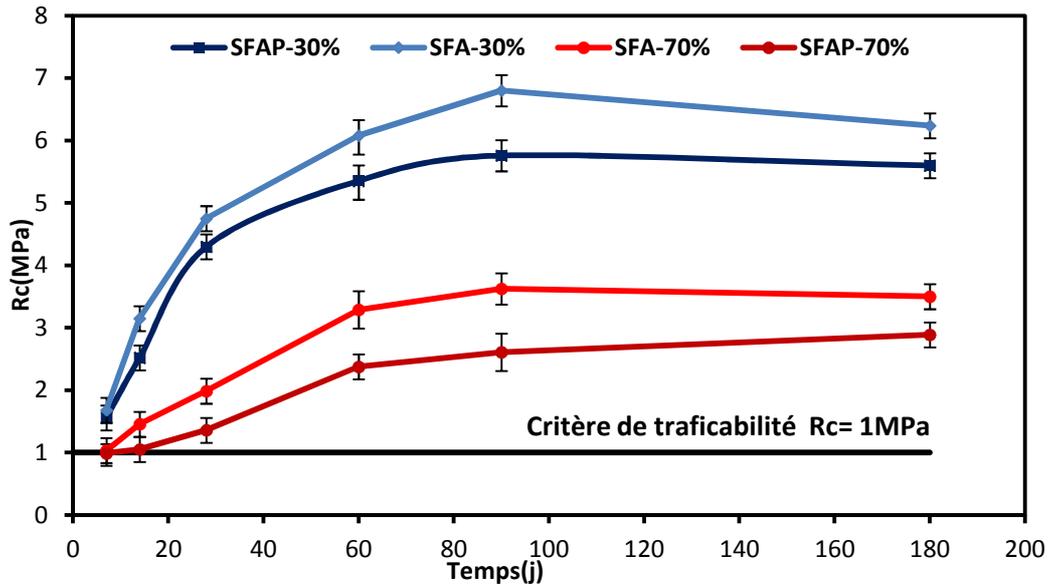


Figure 4.24 : Evolution de la résistance à la compression des formulations (2% Cao+ 6% Rolac 645) à base des sédiments de l'Angleterre (Bruts et déshydratés par l'ajout de polymères)

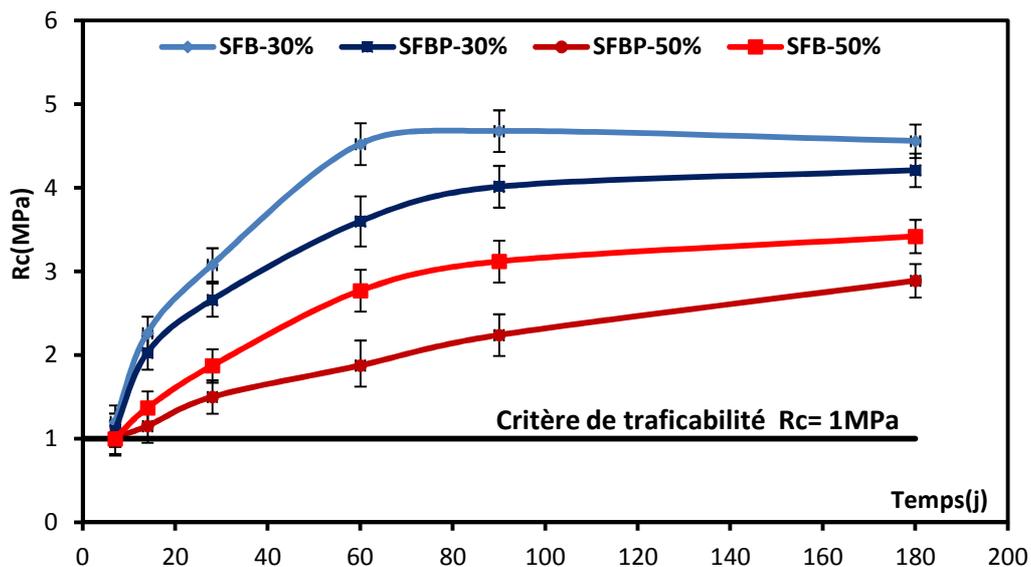


Figure 4.25 : Evolution de la résistance à la compression des formulations à base des sédiments de la Belgique (0,5% Cao+ 6% Rolac 645) (Bruts et déshydratés par l'ajout de polymères)

Les résistances à la compression des formulations étudiées sont supérieures à 1MPa dès 7 jours, cet âge autorise la circulation des engins sur chantier. Pour l'ensemble des résultats obtenus sur les différentes formulations proposées, nous avons enregistré une augmentation des performances mécaniques en fonction du temps jusqu'à 60 jours. En revanche, en ce qui concerne l'effet de la compacité sur l'évolution des résistances à la compression, nous avons

observé que pour un même matériau, l'augmentation de la compacité améliore la performance de résistance à la compression. Nous avons remarqué également que pour une compacité identique, la performance est différente lorsqu'on compare les différentes formulations (Figure 4.26). Ce résultat pourrait être expliqué par la différence de texture des grains et par la présence de la matière organique. Pour l'évolution de la résistance à la compression des formulations à base de sédiments flocculés par l'ajout de polymère, nous avons constaté qu'elles sont toujours inférieures aux résistances à la compression des formulations à base des sédiments bruts pour toutes les échéances. Cette diminution est de l'ordre de 14% à 18%. L'évolution des résistances mécaniques (compression et traction indirect) au cours du temps pourrait être expliquée par l'ajout du correcteur granulaire et par le développement des phases hydratées CAH et CSH apporté par les liants hydrauliques (Chaux et Rolac 645). Cette action a déjà été remarquée au paragraphe précédent.

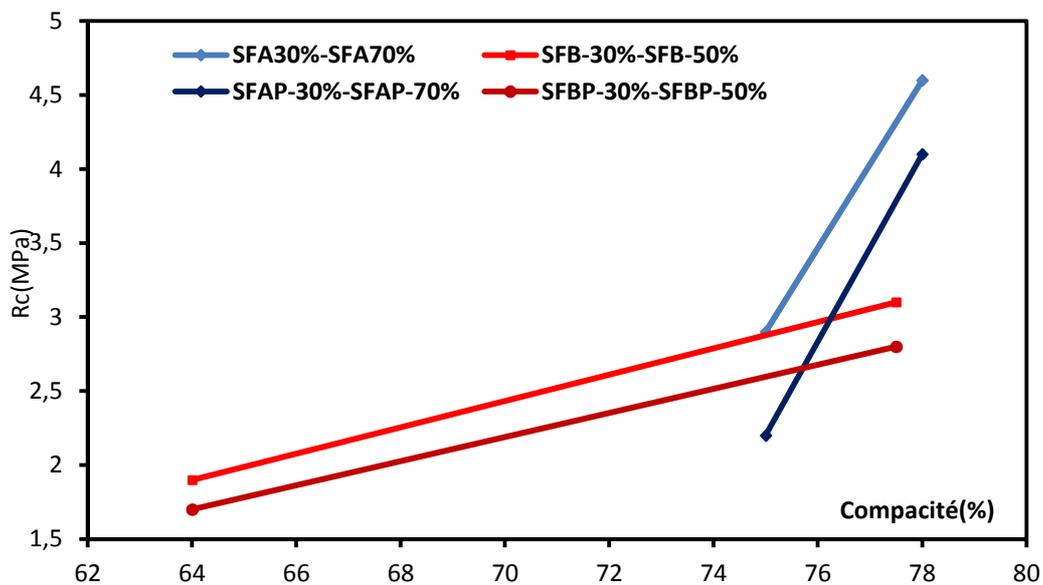


Figure 4.26 : Résistance à la compression uniaxiale à 90 jours en fonction de la compacité des formulations réalisées

4.6.2 Résistance à la traction

Les figures 4.27 et 4.28 présentent la synthèse de l'évolution des résistances à la traction indirecte des formulations en fonction du temps. Pour l'ensemble des formulations, la résistance à la traction indirecte est proportionnelle à la compacité. La résistance à la traction indirecte de toutes les formulations évolue de la même façon que les résultats obtenus pour la

résistance en compression. Le critère de résistance au gel est satisfaisant pour les formulations pour l'ensemble des formulations à partir de 7 jours.

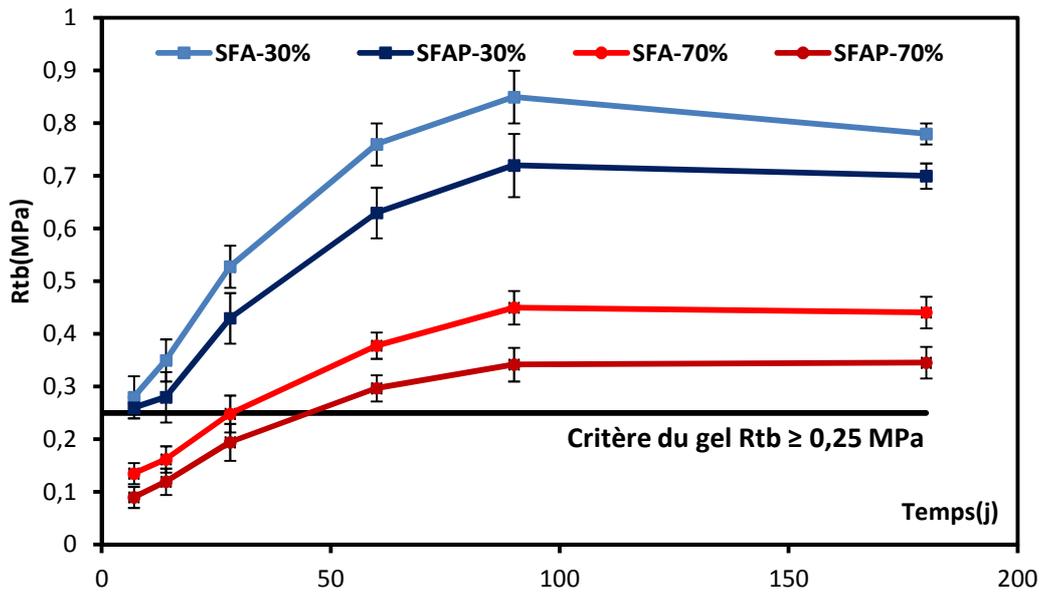


Figure 4.27 : Evolution des résistances à la traction des formulations étudiées à base de sédiments de l'Angleterre en fonction du temps.

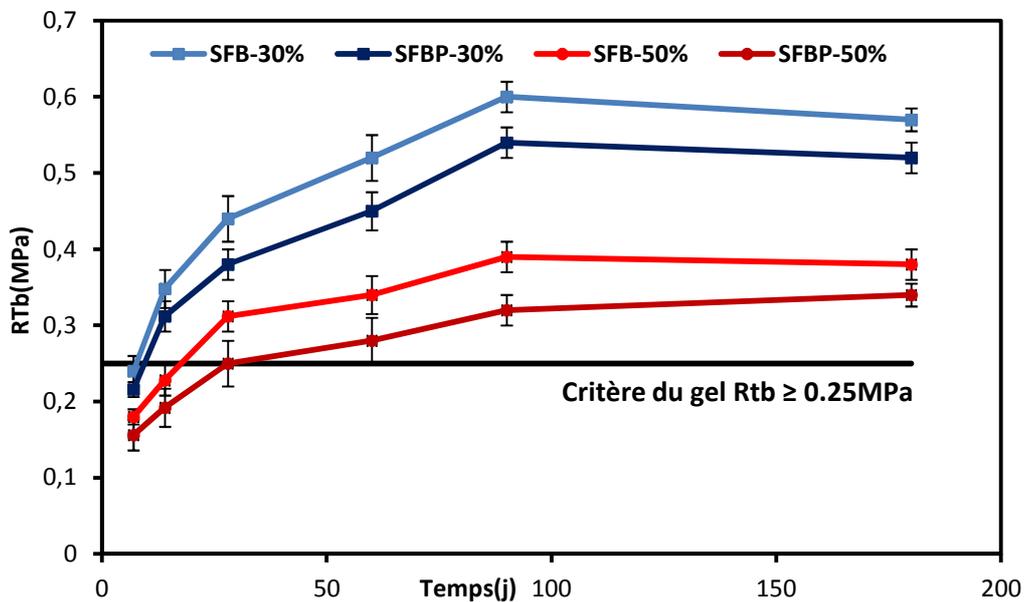


Figure 4.28 : Evolution des résistances à la traction des formulations étudiées à base de sédiments de la Belgique en fonction du temps.

4.6.3 Aptitude au traitement

L'aptitude au traitement des formulations a été évaluée à partir des mesures de gonflement volumique et de résistance à la traction indirecte. Les valeurs obtenues des formulations proposées sont présentées dans le tableau 4.10. L'aptitude au traitement a été validée dans le cas des formulations SFA-30%, SFA-70%, SFB-30%. Par ailleurs, les formulations SFA-70%, SFAP-70%, SFB-50% et SFBP-50% sont douteuses. Nous avons également observés que lorsque les formulations contiennent plus de sédiments, l'aptitude au traitement tend vers douteux.

<i>Formulations à base de SF-Angl</i>	<i>SFA-30%</i>	<i>SFAP-30%</i>	<i>SFA-70%</i>	<i>SFAP-70%</i>
<i>GV (%)</i>	2± 0,8	2,5± 0,6	4,5± 0,4	5,1± 0,5
<i>Rit</i>	0,4± 0,03	0,35± 0,04	0,18± 0,02	0,19± 0,06
<i>Formulations à base de SF-Bel</i>	<i>SFB-30%</i>	<i>SFBP-30%</i>	<i>SFB-50%</i>	<i>SFBP-50%</i>
<i>GV (%)</i>	1,5± 0,07	1,2± 0,08	3± 0,06	3,2± 0,08
<i>Rit</i>	0,25± 0,03	0,23± 0,04	0,15± 0,05	0,1± 0,04
<i>Aptitude</i>	<i>Apte</i>		<i>Douteux</i>	

Tableau 4.10 : Aptitude au traitement des formulations proposées.

4.6.4 Classification selon les performances mécaniques

Dans cette étude, notre objectif est de formuler un matériau adéquat pour une utilisation dans les couches de fondation. Les formulations doivent atteindre au minimum la classe S2. A partir des résultats obtenus des couples (Rt, E), nous pouvons nous baser sur les coefficients empiriques donnés dans les équations ci-dessous pour pouvoir classer ces formulations à 360 jours.

$$\frac{Rt_{60}}{Rt_{360}} = 0.65 \quad ; \quad \frac{E_{60}}{E_{360}} = 0.70 \quad Eq\ 4-1$$

$$\frac{Rt_{90}}{Rt_{360}} = 0.70 \quad ; \quad \frac{E_{90}}{E_{360}} = 0.75 \quad Eq\ 4-2$$

Il est important de noter que l'introduction d'une proportion importante de sédiments diminue les performances mécaniques. L'évolution des formulations à base des sédiments bruts et celles à base de sédiments floclés sont similaire. Cependant, nous remarquons la présence d'une diminution de la résistance mécanique de l'ordre de 14% à 18%, et du module d'Young de l'ordre de 9% à 11% pour les formulations à base de sédiments floclés et une légère différence entre les résistances mécaniques obtenus à 60 et 90 jours respectivement. Selon la figure 4.29, nous pouvons classer les formulations SFA-30% et SFAP-30% respectivement en

classe S3 et S2, et les formulations SFA-70% et S6FAP-70% en classe S1. Les formulations à base de sédiments de la Belgique SFB-30%, SFBP-30% d'une part et SFB-50% et SFBP-50% d'autre part sont classées respectivement en S2 et en S1 (Figure 4.30).

Nous pouvons conclure que les formulations SFA-30%, SFAP-30%, SFB-30%, et SFBP-30% présentent des performances mécaniques adéquates pour une utilisation en couche de fondation.

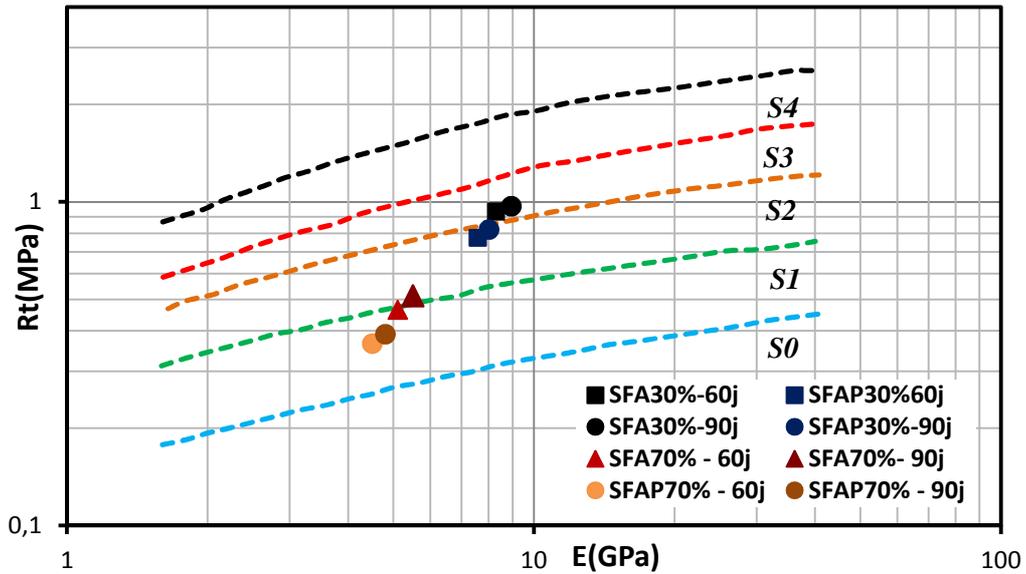


Figure 4.29 : Classification des formulations à base de sédiment de l'Angleterre (Brut et déshydratés par l'ajout de polymères) mesurées à 90j et 60j.

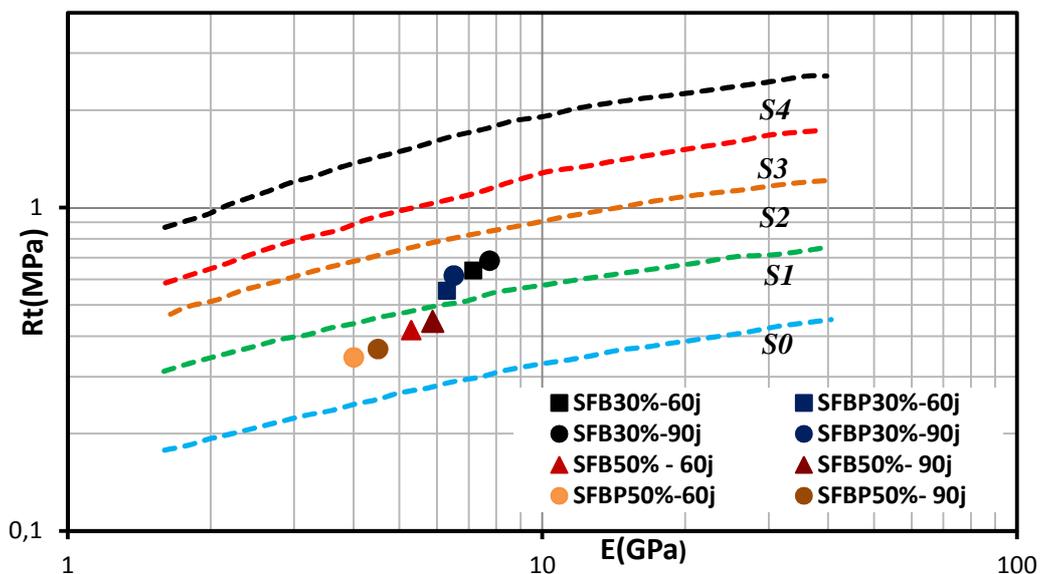


Figure 4.30 : Classification des formulations à base de sédiment de la Belgique (Brut et déshydratés par l'ajout de polymères) mesurées à 60j et 90j.

Les sédiments contiennent des matières organiques et des éléments chimiques qui peuvent retarder la réaction d'hydratation et inhiber la réaction pouzzolanique. (KARIN.A et al , 2002). Une campagne d'essais à 360 jours a été réalisée sur les formulations proposées afin de déterminer la classe réelle des formulations et de comparer entre le coefficient empirique mesuré et le coefficient proposé dans la norme. Les coefficients empiriques proposés par la norme sont habituellement utilisés pour un traitement de sable aux liants hydrauliques. La figure 4.31 présente les classements réels des différentes formulations. Ces valeurs sont déterminées à partir de la moyenne de trois mesures à 360 jours.

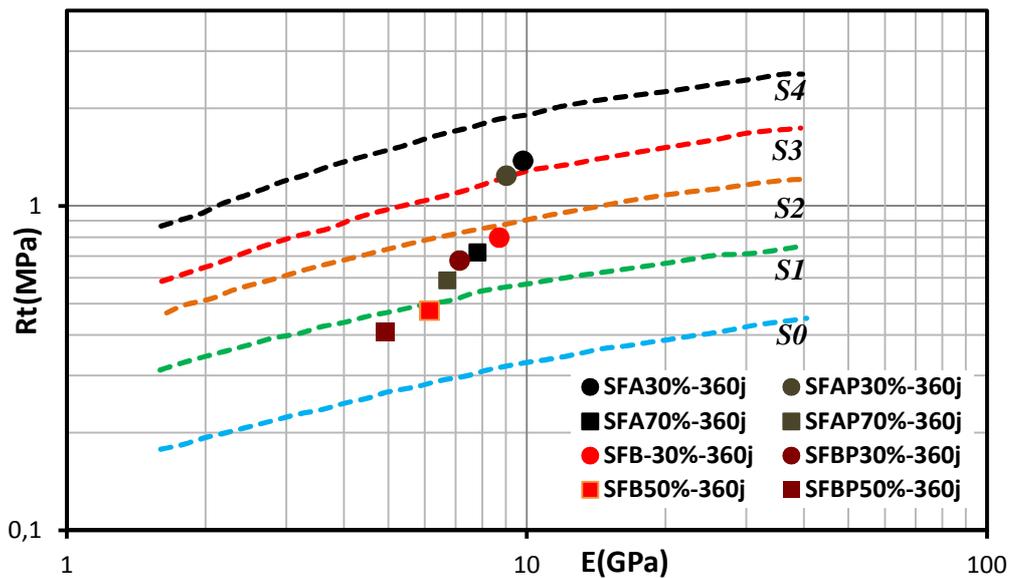


Figure 4.31 : Classification des formulations proposées mesurées à 360j.

Selon la figure 4.31, nous constatons que les caractéristiques mécaniques mesurées à 360 jours sont plus élevées que celles estimées par les coefficients empiriques. Pour cela, nous avons réalisée une comparaison entre les coefficients empiriques obtenus à partir les résultats expérimentaux à 90 jours et les valeurs présentées dans la norme NF P98-114-2. Les résultats sont reportés dans le tableau 4.11.

<i>formulation</i>	$R_{t_{90}}$	$R_{t_{360}}$	RT_{90}/RT_{360}	$E_{t_{90}}$	$E_{t_{360}}$	Et_{90}/Et_{360}
<i>SFA-30%</i>	0,68	1,38	0,49	6,60	9,90	0,66
<i>SFAP-30%</i>	0,57	1,24	0,46	5,60	9,01	0,62
<i>SFA-70%</i>	0,42	0,72	0,58	3,85	7,80	0,49
<i>SFAP-70%</i>	0,32	0,60	0,53	3,36	6,70	0,50
<i>SFB-30%</i>	0,48	0,80	0,60	5,80	8,70	0,66
<i>SFBP-30%</i>	0,43	0,68	0,63	4,55	7,10	0,64
<i>SFB-50%</i>	0,31	0,51	0,61	3,30	5,80	0,56
<i>SFBP-50%</i>	0,27	0,43	0,63	3,10	4,60	0,67

Tableau 4.11 : Valeur de coefficient empirique calculée à partir de résistance en traction et module d'élasticité à 90 j et 360j.

Les valeurs moyennes des rapports $R_{t_{90}}/R_{t_{360}}$ et $E_{t_{90}}/E_{t_{360}}$ sont respectivement à 0,5 et 0,6. Ces valeurs sont inférieures à celles préconisées par la norme (NF P98-114-2). Par contre toutes les formulations élaborées présentent de performance mécanique (360 jours) suffisante pour utilisation en couche de fondation, sauf la formulation à base de 50% des sédiments de la Belgique (bruts et floculés).

4.7 Etude environnementale sur les formulations

En comparant avec le guide d'acceptabilité des matériaux alternatifs en technique routière, l'impact environnemental des sédiments de l'Angleterre bruts et floculés par polymères indiquent une concentration élevée de chlorure et de la fraction soluble. Concernant les sédiments de la Belgique (bruts et déshydratés par l'ajout de polymères), les éléments chimiques mesurés sont tous inférieurs aux seuils établis par le guide (Sétra 2012) (Chapitre 2 et 3). Afin d'étudier la variation de ces éléments après l'ajout de correcteur granulaire et des liants hydrauliques, des essais de lixiviation ont été effectués sur des échantillons broyées après 90 et 360 jours de cure normale selon la norme NF EN 12457-2. Les résultats sont reportés dans le tableau 4.12 et le tableau 4.13.

Éléments	SFA-30%		SFAP-30%		SFA-70%		SFAP-70%	
	90	360	90	360	90	360	90	360
<i>As</i>	0,50	0,55	0,61	0,54	0,28	0,25	0,28	0,26
<i>Ba</i>	0,23	0,25	0,31	0,25	0,41	0,38	0,41	0,38
<i>Cd</i>	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,01	0,01	0,01	0,01
<i>Cr</i>	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,17	0,17	0,18	0,17
<i>Cu</i>	0,40	0,41	0,38	0,35	0,5	0,52	0,53	0,50
<i>Mo</i>	<0,40	<0,40	<0,40	<0,40	0,27	0,26	0,25	0,22
<i>Ni</i>	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	0,07	0,07	0,07	0,07
<i>Pb</i>	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,19	0,19	0,18	0,17
<i>Sb</i>	<0,06	<0,06	<0,06	<0,06	0,05	0,06	0,05	0,04
<i>Se</i>	<0,10	<0,10	0,15	0,16	0,08	0,07	0,08	0,07
<i>Zn</i>	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,24	0,20	0,24	0,20
<i>fluorures</i>	18	16	16	16	18	15	17	15
<i>Chlorures</i>	1500	1500	1400	1400	5000	4700	4900	4600
<i>sulfates</i>	500	460	480	420	1200	1000	1100	900
<i>fraction soluble</i>	5665	5480	5600	5100	15500	15500	15100	14530
<i>PH</i>	12,50	12,20	12,10	12,40	12,30	12,40	12,10	12,50

Tableau 4.12 : Essai de lixiviation sur l'échantillon broyé des formulations à base des sédiments de l'Angleterre.

Éléments	SFB-30%		SFBP-30%		SFB-50%		SFBP-50%	
	90	360	90	360	90	360	90	360
As	0,46	0,46	0,40	0,45	0,28	0,25	0,28	0,20
Ba	0,2	0,25	0,20	0,18	0,41	0,37	0,41	0,40
Cd	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,07	0,07	0,07	0,06
Cr	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,17	0,15	0,17	0,16
Cu	0,4	0,3	<0,05	<0,05	0,39	0,35	0,39	0,39
Mo	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	0,27	0,24	0,25	0,22
Ni	<0,06	<0,06	<0,04	<0,04	0,076	0,06	0,07	0,06
Pb	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Sb	<0,06	<0,06	<0,06	<0,06	<0,06	<0,06	<0,06	<0,06
Se	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	0,15	0,15	0,15	0,15
Zn	0,53	0,53	<0,05	<0,05	0,24	0,20	0,24	0,20
fluorures	20	20	18	18	18	18	18	17
Chlorures	25	25	22	22	30	28	31	28
sulfates	220	220	215	200	320	270	270	250
fraction soluble	1200	1250	1210	1260	2000	1950	2000	1800
PH	12,10	11,90	12,10	12,10	12,00	12,10	12,30	12,20

Tableau 4.13 : Essai de lixiviation sur l'échantillon broyé des formulations à base des sédiments de la Belgique.

Les résultats de lixiviation des formulations à base des sédiments de la Belgique (Bruts et déshydratés par l'ajout de polymères) ne montrent aucun dépassement des seuils établis par le guide SETRA 2012.

Par contre, pour les résultats de l'éluât des formulations à base de sédiments de l'Angleterre, SFA-30% et SFAP-30%, sont au-dessous des seuils N1 du guide Sétra 2012. En ce qui concerne les formulations SFA-70% et SFAP-70%, les taux de relargage de chlorures et de fraction soluble sont supérieurs aux seuils du niveau N1.

Les formulations SFA-30%, SFAP-30%, SFB-30%, SFBP-30%, SFB-50%, SFBP-50% sont acceptables d'un point de vue environnemental pour une utilisation en technique routière. Par contre, pour les formulations SFA-70%, SFAP-70%, il convient d'envisager la réalisation de la caractérisation environnementale niveau 2.

4.8 Réalisation d'une planche expérimentale

L'objectif de cette étude est de réaliser une planche expérimentale, afin de valider les résultats obtenus en laboratoire au niveau mécanique et environnemental.

- Le suivi mécanique a pour but de vérifier la résistance à la traction et au module d'élasticité au cours du temps.
- Le suivi environnemental consiste à quantifier les éléments polluants à travers un dispositif spécifique pour récupérer l'eau de percolation, et éventuellement l'eau de ruissellement (Figure 4.32).

Le but de la réalisation de cette planche est de pouvoir valider la méthodologie élaborée en laboratoire, et surtout de faire un suivi de mobilité des éléments chimiques.

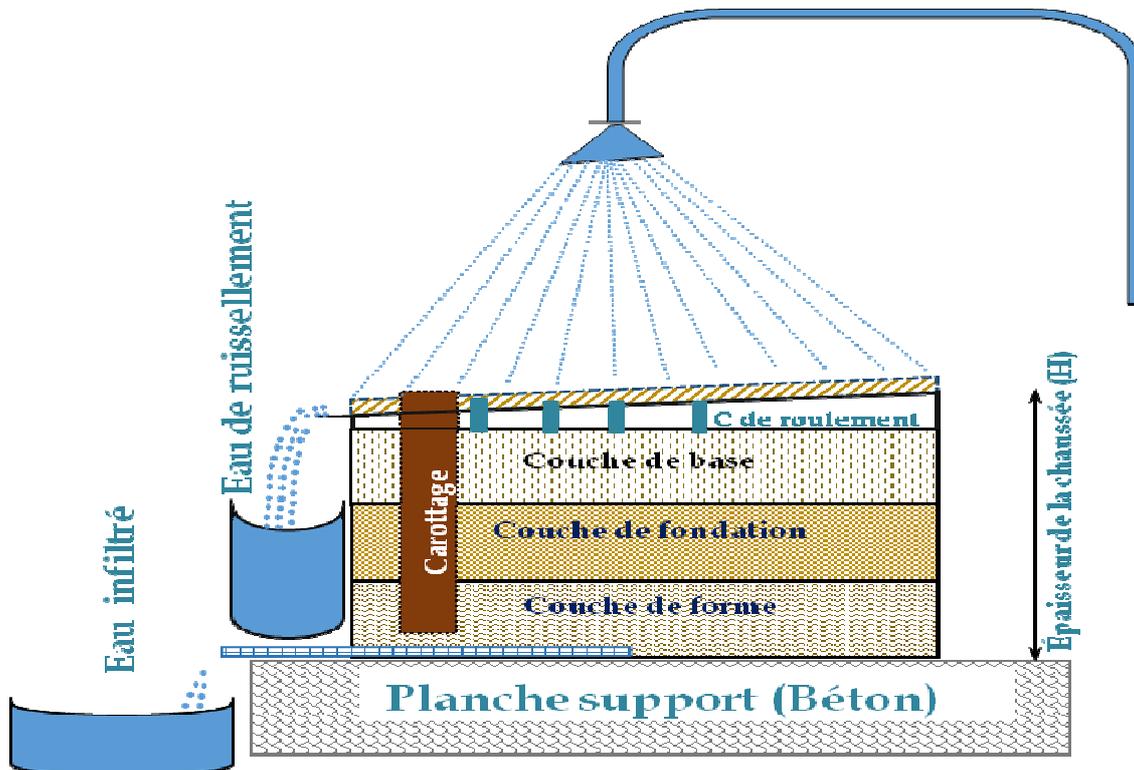


Figure 4.32 : Planche expérimentale.

4.8.1 Description et mise en place de la planche expérimentale

Dans le cadre de la réalisation d'une planche expérimentale à base de sédiments fluviaux, nous devons choisir l'une des formulations élaborées qui ont été validées en laboratoire. La formulation SFB-30% (30% sédiment de la Belgique + 70% sable) a été choisie car elle

répond aux critères d'utilisation en couche de fondation, et pour la disponibilité des quantités nécessaires de sédiments.

La planche expérimentale a été réalisée sur le site de la société Néo-éco RECYCLING spécialisée dans l'ingénierie environnementale, située à proximité de Lille. Afin de pouvoir récupérer et contrôler l'eau de ruissellement et l'eau relarguée, nous avons préparé une plateforme en béton pour supporter la planche expérimental et pour récupérer l'eau filtré. La dimension de cette plate forme est de 130 cm de longueur, 100 cm de largeur et 15 cm de hauteur. Sur la largeur de celle-ci, nous avons réalisé des rainures espacées de 18 cm. Afin de récupérer l'eau des rainures réalisées, nous avons mis en place une rainure sur la largeur de cette plate forme pour contenir toute l'eau qui provient des rainures tracées en largeur. La plate forme en béton a été encadrée par des plaques en bois afin de maintenir et délimiter le matériau au moment du compactage. La plateforme en béton a été favorisée par la mise en place d'une couche drainante de gravier et recouverte par un géotextile. (Figure 4.33).



Figure 4.33 : Préparation de la plate forme de la planche expérimentale.

4.8.1.1 Préparation des sédiments

La formulation SFB-30% possède les exigences mécanique et environnementale acceptables pour l'utilisation en couche de fondation. Le sédiment a été récupéré du bassin de décantation, puis mis au four à 40°C pour accélérer le séchage. Pour la mise en œuvre de cette planche expérimentale, nous avons opté pour une épaisseur de couche de fondation de 30 cm. Le choix de cette épaisseur a été inspiré des travaux de Dubois et d'Achour (ACHOUR.R, 2013) (DUBOIS, 2006). Après avoir déterminé la masse nécessaire pour la mise en œuvre de cette planche expérimentale, une homogénéisation des sédiments fluviaux et du sable bouloonnais a été effectuée en trois parties à l'aide d'un malaxeur bétonnier. Selon la formulation sélectionnée SFB-30% deux traitements ont été appliqués : 0,5 % de la chaux et 6 % du liant hydraulique Rloac 645. Le traitement au liant hydraulique a été réalisé 6h après le traitement de la chaux, afin de permettre à la chaux de stabiliser la matière organique, réduire la teneur en eau et flocculer les particules fines.

Un prélèvement de matériaux mélangés a été effectué pour déterminer la densité sèche et la teneur en eau optimale de matériau sur place.

Après le traitement du matériau avec le liant hydraulique Rolac645, le matériau a été déposé sur la plate de forme en béton. Ensuite, il a été compacté à l'aide d'un compactage de type de « pilonneuses MT 76 ». Le compactage a été fait sur le mélange jusqu'à atteindre une épaisseur de 30 cm (Figure 4.34).

Les résultats obtenus du paramètre de compactage en laboratoire du matériau prélevé du chantier sont :

-Une teneur en eau de 7,6%, une densité sèche de 2.08 g/cm³, et un IPI(%) de 62%.

Les étapes de construction sont illustrées sur la figure 4.34.



Figure 4.34 : Procédé de réalisation de la planche expérimentale à base des sédiments de la Belgique.

Après la réalisation de la couche de fondation, la planche a été recouverte par une bâche imperméable pendant 7 jours, afin de favoriser la prise du liant hydraulique et pour éviter la dégradation de la couche de fondation. Après 7 jours, nous avons mis en place un dispositif pour récupérer l'eau de ruissellement et l'eau de percolation. La figure 4.35 présente la planche expérimentale avec le dispositif pour récupérer l'eau de ruissellement et l'eau de percolation.

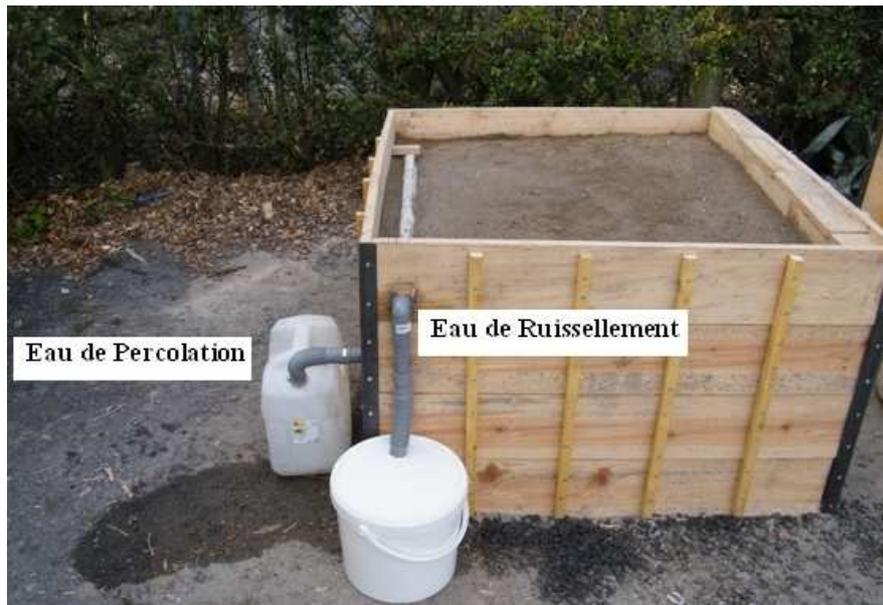


Figure 4.35 : Planche expérimentale avec le dispositif pour récupérer de l'eau de ruissellement et de percolation.

4.8.2 Suivi mécanique de la planche expérimentale

La performance mécanique de la planche expérimentale à base de sédiment de la Belgique à été évaluée par la réalisation d'une campagne de carottage à 90 jours. (Figure 4.36) L'évaluation du comportement mécanique a été déterminée à cette période (90 jours), par l'essai de traction indirecte et le module d'élasticité respectivement selon les normes NF EN 13286-42 et NF EN 13286-43.



Figure 4.36 : Carottage à 90j pour la planche expérimentale.

L'objectif de cet essai est de comparer les résultats obtenus au laboratoire et de vérifier la classe du matériau élaboré pour l'utiliser en couche de fondation. La résistance de traction indirecte et le module d'élasticité à 360 jours sont estimés à partir des coefficients empiriques réels trouver dans cette étude (Tableau 4.11). La classification mécanique de la couche de fondation in situ est illustrée dans la figure 4.37.

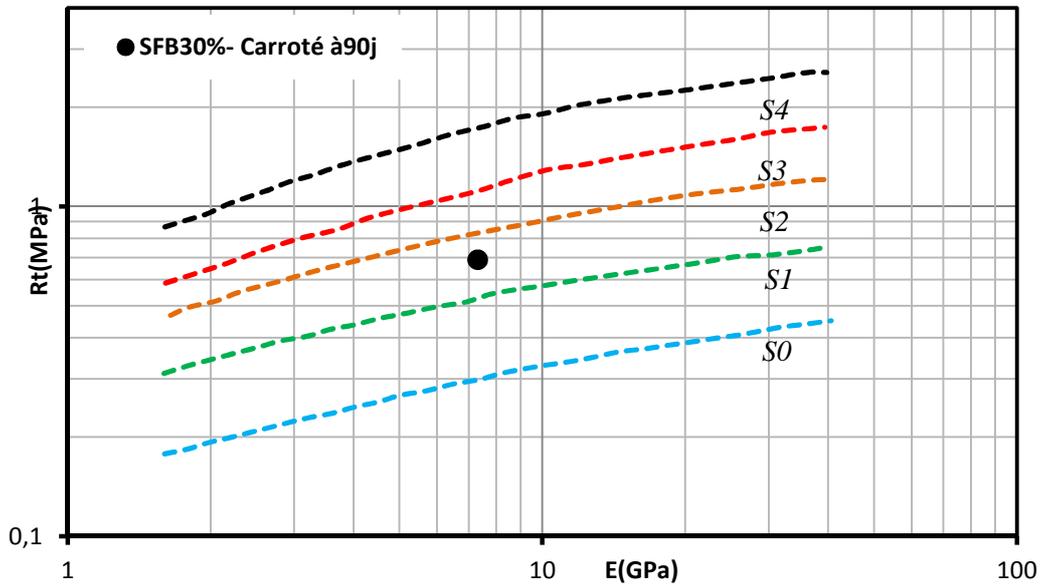


Figure 4.37 : Classification des carottes à base de sédiments de la Belgique à 90 jours.

Le matériau étudié pour la réalisation de la planche présente une classe S2 qui représente la classe minimale recommandée selon le guide GTS. Ce résultat obtenu au niveau mécanique est semblable à celui obtenu au laboratoire.

4.8.3 Suivi environnemental de la planche expérimentale

L'objectif de cette planche expérimentale est de faire un suivi environnemental en récupérant l'eau de ruissellement et celle de percolation (Figure 4.35). Une estimation a été réalisée concernant la précipitation annuelle sur la région de Lille. En se basant sur cette estimation, nous avons décidé que la planche recevrait 20 Litres d'eau déminéralisé de manière hebdomadaire. Le choix de cette période ainsi que cette quantité d'eau, a pour objectif d'obtenir des résultats rapides dans un temps optimal. Ceci pour obtenir des informations sur la mobilité des éléments chimiques par ruissellement et par percolation; ainsi que pour compenser l'évaporation de l'eau et la perte dans les bordures de la planche. L'étude du suivi environnemental a été réalisée avec des prélèvements à différentes période (1, 2, 3,6 mois) sur

les eaux de ruissellement et de percolation. Des quantités suffisantes ont été récupérées pour faire les analyses chimiques des différentes périodes de prélèvements de l'eau de ruissellement. Pour l'eau de percolation, nous avons récupéré une quantité d'environ 200 ml trois et six mois après la réalisation de la planche expérimentale. Des essais de caractérisation des éléments chimiques ont été effectués sur les eaux récupérées par ruissellement et par percolation pour différentes échéances. Ces résultats sont reportés dans le tableau 4.14.

Éléments ($\mu\text{g/kg}$)	Eau de Ruissellement				Eau de Percolation				Loi sur l'eau ($\mu\text{g/kg}$) (Déc2008)
	1mois	2 mois	3 mois	6 mois	1mois	2 mois	3 mois	6 mois	
As	2	3	4	5	-	-	2	2	10
Ba	2,10	2,20	3	2,50	-	-	74	80	700
Cd	<2	<2	<2	<2	-	-	1	1	50
Cr	2	1,50	2	2	-	-	10	20	50
Cu	7	7	7	7	-	-	57	69	2000
Mo	2	1,50	2	2	-	-	22	29	30
Ni	0,10	0,10	0,10	0,10	-	-	15	18	20
Pb	1	1,50	1,50	1	-	-	2	2,50	10
Sb	0,60	0,60	0,60	0,60	-	-	0,60	0,70	5
Se	<6	<6	<6	<6	-	-	5	5	10
Zn	0,20	0,20	0,20	0,20	-	-	2	3	5000
Chlorures (mg/kg)	9	9	7,80	8	-	-	14	13	250
Sulfates (mg/kg)	20	25	40	20	-	-	52	62,40	250
PH	9	8,50	8	10	-	-	10,50	11,30	10

Tableau 4.14 : Les concentrations des métaux lourds dans l'eau de ruissellement et l'eau de Percolation.

L'étude montre que les concentrations des éléments chimiques mesurés à partir de l'eau de ruissellement sont faibles et stables dans le temps, et sont inférieures aux concentrations des éléments chimiques de l'eau de percolation. Nous constatons également que les concentrations des éléments mesurés sont inférieures au seuil de la loi sur l'eau (Loi sur l'eau, 2012). Notons que, les concentrations des éléments chimiques de l'eau de percolation sont également faibles par rapport aux résultats obtenus à travers l'essai de lixiviation.

Des essais de lixiviation sur des matériaux prélevés de la couche de fondation à base de sédiments ont été réalisés à 90 j selon la norme EN 12 457-2. Les résultats d'analyse sur les éluats des matériaux prélevés sont présentés dans le tableau 4.15.

Éléments	Formulation SFB-30% (mg/kg)	Valeur à respecter par au moins 100% des échantillons (mg/kg de MS)
As	0,04	1,50
Ba	0,70	60
Cd	<0,05	0,12
Cr	0,60	1,50
Cu	0,90	6
Mo	0,10	1,50
Ni	0,35	1,20
Pb	0,08	1,50
Sb	0,06	0,18
Se	0,05	0,30
Zn	0,05	12
fluorures	22	30
Chlorures	100	2400
sulfates	1170	3000
fraction soluble	2000	12000
PH	12	[5,5-12]

Tableau 4.15 : Résultats des analyses des lixiviations sur le matériau carotté à 90 jours.

(Quantité relarguée cumulée à L/S=10l/kg, NF EN 12-457-2).

Les résultats obtenus sur lixiviation de matériau carotté à 90 jours sont inférieurs aux valeurs limites établis par le guide d'acceptabilité de matériaux alternatifs en technique routière Sétra 2012. D'après cette investigation, la formulation (SFB-30%) à base de sédiment fluviaux ne présente pas de risque sur l'environnement. Ainsi, nous pouvons observer une légère augmentation de concentration des quelques éléments métalliques traces, et une augmentation des chlorures et du sulfate sur le matériau carotté par rapport au matériau étudié en laboratoire.

4.9 Conclusion

Les résultats issus de cette partie sont encourageants vis-à-vis de l'utilisation des sédiments de curage en technique routière. Le traitement des sédiments (bruts et flocculés) par les liants hydrauliques Rolac 645 et la chaux n'aboutit pas à un matériau adéquat pour l'utilisation en couche de fondation. Cependant, l'influence du délai de traitement et le conditionnement des sédiments par l'ajout de polymères sur la performance mécanique ont été observés. Il s'agit d'une faible diminution des performances mécaniques (16% à 20%) pour les sédiments

floculés par l'ajout de polymères. Cet effet pourrait être expliqué par l'empêchement de l'hydratation et la prise du liant en présence de la matière organique.

L'apport d'un correcteur granulométrique (sable Boulonnais) en combinaison avec un traitement par liant hydraulique (Rolac 645 et chaux) permet de stabiliser les sédiments et augmenter leurs performances mécaniques. L'optimisation de la compacité par la méthode d'empilement compressible a été réalisée. Les performances mécaniques ont été évaluées à travers des essais de résistance en compression, en traction indirecte et par le module d'élasticité. Les résultats confirment qu'une diminution de la compacité du matériau conduit à une diminution des performances mécaniques. En termes de classification basé sur les mesures de résistances mécaniques à 60 et à 90 jours, l'incorporation de 30% de sédiments pour toutes les formulations étudiées satisfait aux critères d'utilisation en couche de fondation (Supérieurs à la classe S2). Par contre, en se basant sur les résultats de résistances mécaniques à 360 jours, toutes les formulations proposées (sauf SFB-50% et SFBP-50%) présentent un bon comportement mécanique pour l'utilisation en couche de fondation. A partir de ces résultats, la pertinence des coefficients empiriques a été déterminée. On remarque que la majorité des coefficients empiriques mesurés sont inférieurs aux valeurs préconisées par la norme.

L'impact environnemental des formulations a été vérifié à travers l'essai de lixiviation pour des périodes de cure de 90 et 360 jours. Les résultats montrent que toutes les formulations proposées sont inférieurs aux seuils établis par le guide Sétra 2012, sauf pour les formulations SFA-70% et SFAP-70%. Nous n'avons pas remarqué de différences significatives entre les analyses de lixiviation à 90 et à 360 jours pour toutes les formulations.

Une planche expérimentale routière à base d'une formulation contenant 30 % de sédiments provenant de la Belgique (SFB-30%), a été réalisée. Après avoir validé la concordance des résultats mécaniques et environnementaux obtenus en laboratoire et ceux obtenus in situ, nous avons analysé et suivi les eaux de ruissellement et de percolation. Le suivi environnemental ces eaux montre que les concentrations des éléments chimiques sont inférieures aux seuils établis par la loi sur l'eau (Loi sur l'eau, 2012) qui sont considérés faibles et stable au cours du temps.

Conclusions générales & Perspectives

Conclusions générales & Perspectives

La valorisation des sédiments fluviaux en technique routière permet de répondre à de multiples enjeux environnementaux, économiques et sociaux. Les travaux de recherche présentés ici entrent dans le cadre du projet européen nommé PRISMA «*PRomotion Integrated Sediment MAnagement*». L'objectif de ce projet est de valoriser des sédiments fluviaux dans des domaines du Génie Civil. L'objectif de cette thèse de doctorat consistait à améliorer les caractéristiques mécaniques et environnementales de sédiments fluviaux (avec et sans déshydratation par l'ajout de polymère) afin d'élaborer des matériaux susceptibles d'être employés en technique routière, et plus particulièrement en couche de fondation.

Les caractérisations physico-chimiques, géotechniques et environnementales réalisées ont permis d'établir une fiche d'identité des sédiments étudiés afin d'évaluer leur potentiel d'utilisation en technique routière. Ces caractérisations ont été effectuées sur des sédiments fluviaux provenant du partenariat PRISMA représentant quatre pays partenaires : la France, les Pays-Bas l'Angleterre et la Belgique. Les résultats obtenus des travaux réalisés sur les sédiments anglais (Rive Bure) et belges (Drume) sont ceux présentés dans ce rapport de thèse. D'un point de vue géotechnique, ces sédiments sont considérés comme des sols faiblement organiques de classification F11. Les sédiments Anglais (Rive Bure) possèdent une fraction limoneuse et un indice de plasticité plus élevés que ceux des sédiments prélevés en Belgique (Drume). Selon le Guide des Terrassements Routiers, le sédiment de « Bure » et le sédiment de « Drume » sont classés respectivement A4F11 et B5F11. Ces derniers ne possèdent pas les caractéristiques requises pour une circulation des engins sur chantier à court terme ni pour une utilisation en couche de fondation. L'évaluation environnementale des sédiments étudiés a été réalisée conformément au nouveau guide d'acceptabilité de matériaux alternatifs en technique routière. Les résultats obtenus à travers les essais de lixiviations montrent que la concentration des Chlorures et de la fraction soluble des sédiments provenant d'Angleterre dépassent les seuils N1 établis par ce guide. Néanmoins ces sédiments peuvent être candidats pour une utilisation en technique routière. Les sédiments provenant de la Belgique respectent les seuils environnementaux et sont « acceptables » pour une valorisation en technique routière.

La forte teneur en eau des sédiments après dragage et la difficulté d'une déshydratation rapide est une des problématiques récurrentes à leur valorisation. Nous avons réalisé des études d'optimisations et d'améliorations des processus de déshydratation des sédiments par ajouts

de polymères (adjuvant de floculation). Afin d'améliorer et accélérer le processus de séchages d'un sédiment, nous avons étudié et amélioré la méthode du lit de séchage. Cette amélioration passe par l'ajout optimisé de polymères. Le conditionnement des polymères et leurs dosages a été réalisé d'une manière expérimentale. La sédimentation des sédiments dépend essentiellement de leur nature et leur concentration en matières solides. Plus le sédiment est fin et sa concentration en matière solide est élevée, plus sa sédimentation est longue avec une turbidité importante. L'ajout de polymères a un effet instantané sur la séparation de la phase liquide-solide. En effet, sous l'action des polymères les sédiments s'agglomèrent et favorisent la décantation. Une couche d'eau limpide apparaît alors en surnageant la couche des sédiments. Le suivi de la teneur en eau des sédiments floculés par la technique du lit de séchage nous a permis de constater une diminution plus importante de la teneur en eau en comparaison aux sédiments naturels. Nous avons également constaté une diminution de la concentration des éléments chimiques dans les eaux issus du matériau déshydraté par polymère.

Une étude de caractérisation physico-chimique, géotechnique et environnementale des sédiments floculés a été réalisée afin d'explorer l'effet de la déshydratation par l'ajout de polymères sur ces caractérisations. Les résultats montrent que la déshydratation par l'ajout de polymères provoque une altération des propriétés intrinsèques des sédiments naturels. Concernant la distribution granulométrique, une modification à court terme du squelette granulaire est constatée par la formation de floccs friables. Après agitation prolongée, la distribution granulométrique retrouve son état initial, comparable au sédiment brut. L'ajout de polymère augmente le pourcentage de la matière organique obtenue par l'essai de calcination de l'ordre de 1%. Cette augmentation induit une légère augmentation de la limite de liquidité et de plasticité. Les caractéristiques des propriétés physiques ont permis de classer respectivement les sédiments floculés de l'Angleterre et de la Belgique en classes A4F11 et B5F11. Concernant les propriétés de compactages des sédiments floculés, nous avons constaté une augmentation de la teneur en eau optimale, une diminution de la densité sèche correspondante et une légère augmentation de l'Indice de Portance Immédiat. Ces propriétés obtenues ne permettent pas une utilisation du matériau « en l'état » en couche de fondation. Les essais de caractérisations minéralogiques des sédiments floculés et non floculés nous indiquent qu'il n'y a pas de changement de phases notables entre ces derniers. Quand au comportement environnemental estimé principalement par l'essai de lixiviation, nous avons constaté une diminution de la concentration des éléments chimiques. Cette diminution est remarquée au niveau de la fraction soluble, elle est estimée entre 25% et 40%.

Afin d'utiliser ces sédiments en technique routière, il est indispensable d'améliorer principalement leurs caractéristiques mécaniques. Dans un premier temps, un traitement à la chaux et aux liants hydrauliques a été appliqué sur les sédiments bruts et sur les sédiments floclés. Ceci nous a également permis d'apprécier l'effet de l'ajout de polymère sur le comportement mécanique post traitement.

Les mélanges formulés à base de chaux et de liants hydrauliques contenant ou non des polymères ne répondent pas aux contraintes mécaniques nécessaires pour une utilisation en couche de fondation. Les résultats obtenus nous indiquent également que les sédiments traités (chaux et liants) et floclés possèdent des résistances mécaniques légèrement inférieures (16% à 20%) aux sédiments bruts traités. Pour améliorer les caractéristiques mécaniques des ces sédiments en plus du traitement par chaux et liants hydrauliques, nous avons rajouté au mélange un correcteur granulaire. L'ajout de ce correcteur granulaire à pour principal but d'améliorer la compacité granulaire et d'augmenter la résistance du mélange.

Des mélanges de sable boulonnais et des sédiments étudiés ont été optimisés pour obtenir une compacité maximale. La compacité maximale théorique et expérimentale obtenue correspond à un mélange de 30% de sédiment et de 70% de sable. Pour une valorisation maximale des sédiments tout en gardant une compacité maximale, nous avons testé dans les formulations des mélanges allant jusqu'à 50% de sédiment de la Belgique (Drume) et 70% de sédiment d'Angleterre (Bure). Ainsi, huit formulations par sédiment ont été étudiées incluant des formulations contenant des sédiments floclés et non floclés. Afin de valider l'utilisation potentielle de nos formulations en couche de fondation d'un point de vue mécanique, des essais ont été réalisés pour estimer les résistances mécaniques théoriques et expérimentales à 360 jours. Toutes les formulations élaborées possèdent des caractéristiques mécaniques suffisantes pour une utilisation en couche de fondation sauf les formulations contenant 50% de sédiments bruts et floclés de la Belgique (Drume). Nos travaux de recherches suggèrent que l'utilisation du coefficient empirique préconisé dans la norme NF P 98 113 pour l'estimation théorique des résistances mécaniques à 360 jours n'est pas adaptée au matériau sédiment. Nous préconisons donc d'utiliser les résultats de résistances mécaniques réels à 360 jours afin de mieux apprécier le comportement du matériau contenant des sédiments.

Le comportement environnemental des huit formulations élaborées a été évalué par l'essai de lixiviation. Nous n'avons pas constaté de différences majeures dans la composition des lixiviats entre 90 et 360 jours. Pour l'ensemble des formulations nous n'avons pas constaté de dépassement des seuils d'acceptabilité environnementale. Il n'y a que la formulation

contenant 70% de sédiments de l'Angleterre (Bure) qui dépasse légèrement les seuils (chlorures et FS).

Afin d'apprécier le comportement in situ d'une couche de fondation à base de sédiments fluviaux et valider notre démarche de valorisation, nous avons réalisé une planche expérimentale contenant 70% de sédiments de la Belgique (SED Bure). En plus de la comparaison des propriétés mécaniques des carottes issues de la planche et des essais laboratoire, nous avons également étudié la qualité des eaux de ruissellement et de percolation. Les résultats mécaniques obtenus sur la planche sont comparables avec ceux obtenus en laboratoire, ce qui valide notre approche de dimensionnement de la planche et valide également la formulation proposé.

D'un point de vue environnemental, l'analyse des eaux de ruissellement ont des concentrations inférieures en éléments polluants à celles mesurées dans les eaux de percolations. Néanmoins les deux concentrations restent en dessous des concentrations obtenues en laboratoire par essais de lixiviation et sont également inférieures aux seuils fixés par la loi sur l'eau.

Ce travail de doctorat nous a permis de mettre en place une démarche expérimentale pour le prétraitement, et le traitement des sédiments de dragage fluviaux. Il reste plusieurs pistes de travail et de développement à prospecter avant une valorisation définitive.

Une des pistes de réflexion pouvant appuyer la démarche de valorisation des sédiments fluviaux en technique routière est l'amélioration des estimations des résistances à la traction et du module d'élasticité. En effet les résultats obtenus de notre travail nous démontrent que les coefficients utilisés pour l'estimation des résistances théoriques à 360 jours à partir des résistances expérimentales à 90 jours ne sont pas adaptés au matériau sédiment. Il serait donc intéressant d'améliorer et d'adapter ces coefficients d'abord expérimentalement et par la suite à travers des lois de comportements spécifiques aux sédiments.

Afin de valider la démarche de valorisation entreprise avec ou sans déshydratation par ajouts d'agents de floculation, il serait intéressant de réaliser et de suivre une planche expérimentale à échelle 1 dans des conditions réelles d'utilisation et d'exposition. Cette échelle de

caractérisation peut nous apporter des réponses réelles quant au comportement mécanique et environnemental des sédiments *in situ*.

Les résultats prometteurs du comportement des sédiments déshydratés par agents de floculation nous permettent d'envisager d'autres voies de valorisation dans les domaines du génie civil. L'utilisation de la technique de séchage développée dans ma thèse peut être ainsi appliquée à d'autres applications telles que les digues ou buttes paysagères à base de sédiments. Dans cette perspective, il serait également intéressant d'établir un abaque spécifique à l'adéquation « type de polymère / type de sédiment » en fonction de l'application de valorisation envisagée.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- ABRIAK.N.E, & GREGOIRE.P. (2003).** Amélioration de la portance du sable de dragage extrait de l'Avant-Port de Dunkerque. *In 2nd International Symposium on Contaminated Sediments – Posters* , 374-377.
- ABRIAK.N-E, ACHOUR.R, & ZENTAR.R. (2011).** 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 (2011) Coastal and Maritime Mediterranean Conference* .
- ABU-ORF.M, & ÖRMECL.B. (2005).** Measuring sludge network strength using rheology and relation to dewaterability, filtration, and thickening - Laboratory and full-scale experiments. *Journal of Environmental Engineering* , 131 (8), 1139-1146.
- ACHOUR.R. (2013).** *Valorisation et caractérisation de la durabilité d'un matériau routier et d'un béton à base de sédiment de dragage*. Douai: Thèse de Doctorat à l'école des Mines de Douai et l'universite de Sherbrooke.
- ADAMCZYK.Z. (2003).** Particle adsorption and deposition: role of electrostatic interactions. *Advances in Colloid and Interface Science* , 100-102, 267-347.
- ALLAL.L, BENAMMARI.M, FRARI.I, AZMANIA, & BELMOKHTAR.N-E. (2011).** Caractérisation et valorisation des sédiments de dragage des ports de Tanger et Larache (Maroc). *Revue Paralia* , 4, 5.1-5.13.
- ALZIEU.C et al. (1999).** Dragages et environnement marin. *ISBN 2-84433-014-2*, p 27-35.
- AMATR-Sétra. (2012).** *Guide méthodologique : Acceptabilité de Matériaux Alternatifs en Techniques Routière, Evaluation environnementale* (éd. Sétra). Paris: Ministère de l'écologie, du Développement Durable et de L'énergie.
- BAUDIN.I, & FABRE.A. (2006).** *Optimisation des procédés de clarification : Utilisation des polymères cationiques*. Normandie: Etude financée par l'Agence de l'Eau Seine Normandie.
- BAUDIN.I, RODRIGUES, J.-M., & HUET.S. (2005).** *Optimisation du procédé de clarification Utilisation des Polymères Cationiques*. Etude financée par l'Agence de l'Eau Seine Normandie.
- BENAMAR.A, BARAUD.F, & ALEM.A. (2007).** Traitement des sédiments de dragage : un enjeu du développement durable. Bordeaux: 25e rencontres de l'AUGC.

- BENZERZOUR, M., R.MANSI, N.ABRIAK, & F. BECQUART, (2013).** Mathematical model for beneficial use of dredged sediments in road construction. (I. 2277-3754, Éd.) *Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)* , 3, 1-6.
- BESRA.L, SENGUPTA.D, ROY.S.K, & AY.P. (2002).** Polymer adsorption: Its correlation with flocculation and dewatering of kaolin suspension in the presence and absence of surfactants. *International Journal of Mineral Processing* , 66 (1-4), 183-202.
- BOEGLIN. J-C. (1974).** Progrès réalisés dans la clarification des eaux résiduaires et le séchage mécanique des boues par l'emploi de polymères organiques de synthèse. *Institut de Recherches Hydrologiques de Nancy* , 343–374.
- BOEGLIN.J.C. (2000).** Traitements et destinations finales des boues résiduaires. *TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR, L'expertise technique et scientifique de référence : génie des procédés et protection de l'environnement* , j3944, 1-23.
- BOURCEREAU.L. (2010).** *Accumulation des Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) dans les sédiments de la rivière Doubs.* Franche-Comté: Université de Franche-Comté - UFC.
- BOUTIN.R. (1999).** *Amélioration des connaissances sur le comportement des rejets en mer des produits de dragage type vase : phénomènes court terme champ proche.* Lyon: Thèse de doctorat à l'Institut national des sciences appliquées de Lyon.
- BOUTOUIL .M. (2011).** *Etude bibliographique sur la valorisation des sédiments de dragage marins traités aux liants hydrauliques en technique routière.* Caen: Université de Caen.
- BOUTOUIL .M. (1998).** *Traitement des vases de dragage par stabilisation et solidification à base de ciments additifs.* Havre: Thèse de doctorat à l'Université du Havre.
- BOUTOUIL.M, & SAUSSAYE.L. (2011).** Influence de l'ajout d'un correcteur granulométrique sur les propriétés des sédiments traités aux liants hydrauliques. *Revue Paralia* , 4, 8.1-8.11.
- BRAKNI .S. (2008).** *Première approche vers une valorisation de granulats artificiels à base de sédiments de dragage.* Douai: Thèse de Doctorat à l'Ecole des Mines de Douai.
- BRIANT.J. (1989).** *Phénomènes d'interface, agents de surface : principes et modes d'action.* Ecole nationale supérieure du pétrole et des moteurs (France): TECHNIP.
- BURBAN.P-Y, JOE.Y-J, & WILBER.M. (1990).** Setting speeds of flocs in fresh water and seawater. *Journal of geophysical research* , 95 (10), 18 213 – 18 220.
- CABANE.N. (2004).** *Sols traités à la chaux et aux liants hydrauliques : Contribution à l'identification et à l'analyse des éléments perturbateurs de la stabilisation.* Albi: Thèse de

Doctorat à l'Université Jean Monnet et de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de St-Etienne.

CAZALET, M. L. (2012). *Caractérisation physico-chimique d'un sédiment marin traité aux liants hydrauliques– Évaluation de la mobilité potentielle des polluants inorganiques*. Lyon: L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.

CHEFETZ.B, DESHMUKH.A.P, HATCHER.P.G, & GUTHRIE. E.A. (2000). Pyrene Sorption by Natural Organic Matter. *Environmental Science and Technology* , 34, 2925-2930.

CHEN.W, Harbottle.D, LIU.Q, & Xu.Z. (2014). Current state of fine mineral tailings treatment: A critical review on theory and practice. *Minerals Engineering* , 58, 113–131.

CHEZAU.D, & GINISTY.P. (2008). Flocculation des boues: méthode d'essais pour l'optimisation de leur épaissement/déshydratation . *Eau Industrie et Nuisance* (314), 75-78.

CHUN-YANG.Y. (2010). Emerging usage of plant-based coagulants for water and wastewater treatment. *Process Biochemistry* , 45 (9), 1437–1444.

COLIN.D. (2003). *Valorisation de sédiments fins de dragage en technique routière*. Caen: Thèse de Doctorat à l'Université de Caen.

CONVENTION DE PARIS. (1992). *La convention de Paris pour la prévention de la pollution marine d'origine tellurique* . Source : <http://www.senat.fr/rap/196-421/196-421.html>.

Coulet.W, Hunte.t, & Harris.E. (2014). *Salhouse Spit Restoration Pilot*. Norwich: Broads Authority.

COUTURIER.F, & PONCET.F. (2013). Spécial congrès Caen 2012 : Produits de dragage. 41, p. 67. CAEN: Recyclage & Valorisation : revue de l'industrie minière et du développement durable.

CRINIG, C., & BADOT.P.M. (2007). *traitement et épuration des eaux industrielles polluées. Procédés membranaires, bioadsorption et oxydation chimique*. ISBN978-2-8467-197-0 Franche-Comté: Presses Université de Franche-Comté.

DAMIDOT.D, N-E, A., DUBOIS.V, ZENTAR.R, & FARLANE.F, (2006). *Guide technique régional relatif à la méthodologie de gestion des sédiments de dragage portuaire - Plan régional d'élimination des déchets industriels spéciaux*. Nord-Pas-de-Calais: (PREDIS).

DELARRARD.F. (Avril 2000). *Structure de granulaire et Formulation des bétons*. Laboratoire Central des Ponts et des Chaussées, Ouvrage d'art OA34,.

DELARRARD.F. (1999). *Structures granulaires et formulation des bétons* (éd. n° OA 34). Paris: la collection Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées.

- DESCHAMPS.T, BENZAAZOUA.M, BUSSIÈRE.B, BELEM.T, & MBONIMPA.M. (2006).** Mécanismes de rétention des métaux lourds en phase solide : cas de la stabilisation des sols contaminés et des déchets industriels. *VertigO – Revue en sciences de l'environnement* , 7 (2).
- DESJARDINS.R. (1997).** *Le traitement des eaux. Deuxième édition revue et enrichie* (éd. 9782553006432). Montréal: Presses internationales Polytechnique.
- DIA .M. (2013).** *Traitement et Valorisation de Sédiments de Dragage Phosphatés en Technique Routière*. Douai: Thèse de Doctorat à l'école des Mines de Douai & Université d'Artois.
- DICKINSON.E, & KSSONB.L. (1991).** Particle flocculation by adsorbing polymers. *Advances in Colloid and Interface Science* , 34 , 1-29.
- DIET.J-D. (1996).** *Stabilisation / Solidification des déchets : Perturbation de l'hydratation du ciment de portland par les substances contenues dans les boues d'hydroxydes métalliques*. Lyon: Thèse de Doctorat à l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
- DROUSIE. D. (2010).** Stockage et valorisation des sédiments contaminés: l'expérience wallonne. Gestion de terres et sédiments contaminés , société VINCI.
- DUBOIS.V. (2006).** *Etude du comportement physico mécanique et caractérisation environnementale des sédiments marins – Valorisation en technique routière*. Douai: Thèse de doctorat à l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Douai.
- EADES.J, & GRIM.R-E. (1966).** A quick test to determine lime requirements for soil stabilization. *Highway Research Record* , 139.
- ECO-NEO. (2012).** Un avenir en béton vert. *Entreprendre innovation* .
- ENVIRONNEMENT CANADA. (2005).** *Pesticides le tributylétain (TBT) Institut national de la recherche sur les eaux*. Canada: Environnement Canada.
- ENVIRONORD. (2011).** Journées Nationales Sédiments.
- ENVISAN. (2013).** *Travaux ENVIRONNEMENTAUX*. Luxembourg: Jan De Nul Group.
- FOUCAULT.A, & RAOULT.JF. (1980).** *Dictionnaire de géologie* (éd. Masson). (2-225-65461-1-0338-2672, Éd.) Paris: ISBN ISBN 2-225-65461-1, ISSN 0338-2672.
- FRANKLIN.A.F, OROZCO. L.F, & SEMRAU.R. (1973).** Compaction of slightly organic soils. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division* , 99 (7), 541 – 557.
- FU.F, & WANG.Q. (2010).** Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. *Journal of Environmental Management* , 92, 407-418.
- GAZETTE RIVIER. (2012).** Etat chimique des rivières. *Gazette rivière* .

- GINISTY.P, & CHEZAUD.D. (2008).** Flocculation des boues : méthode d'essais pour l'optimisation de leur épaissement/déshydratation. *Institut de la filtration et des techniques séparatives (I.F.T.S).Eau Industrie et Nuisance* (314), 75-79.
- GOSSELIN.A, BLACKBURN.D, & BERGERON.M. (1999).** *Protocole d'évaluation de la traitabilité des sédiments, des sols et des boues à l'aide des technologies minéralurgiques* (éd. Environnement Canada). Sainte-Foy Canada: Section Éco-innovation technologique, Programme de développement et de démonstration technologiques, Direction de la Protection de l'Environnement.
- GREGORY. J. (1988).** Polymer adsorption and flocculation in sheared suspensions. *Colloids and Surfaces* , 31, 231–253.
- GTR. (1992).** *Réalisation des remblais et des couches de forme*. Paris: Sétra:Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements & LCPC : Laboratoire central des Ponts et Chaussées.
- GTS-LCPC-SETRA. (2000).** *Traitement des sols à la chaux et/ou liants hydrauliques. Application à la réalisation des remblais et des couches de formes – Guide technique (GTS)*. Paris: Service d'Etudes sur les Transports, les Routes et leurs Aménagements & Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.
- HANSON.H, BRAMPTON. A, CAPOBIANCO.M, DETTE H.H, HAMM. L, LAUSTRUP. C, (2002).** Beach nourishment projects, practices, and objectives – a European. *Coastal Engineering* , 47, 81-111.
- HARRAT.N. (2013).** *Elimination de la matière organique naturelle dans une filière conventionnelle de potabilisation d'eaux de surface*. Biskra: Université Mohamed Khider – Biskra, Faculté des Sciences et de la technologie.
- HOGG.R, H. (1999).** The role of polymer adsorption kinetics in flocculation. *Colloids and Surfaces: Physicochemical and Engineering Aspects* , 146 (1-3), 253–263.
- HOLTZ.R.D, & KRIZEK.R.J. (1970).** Properties of slightly organic top soils. *Journal of the Construction Division* , ASCE-CO1 (96), 29 - 43.
- INERIS. (2005).** *Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques*. Consulté le 2013, sur <http://www.ineris.fr>.
- INERIS. (2009).** *Impacts sur les milieux aquatiques des sédiments de dragage gérés à terre*. Aixen Provence,Bohes-du-Rhône: Impacts le milieu aquatiques des sédiments de dragage. Gérés à terre. Problématique, contexte réglementaire, modélisation du transfert de

contaminants, organiques .Convention ONEMA INERIS 2008. ACTIONS N°24 (partie2) et N°2.

KAMALIS, K., BERNARD.F, B., ABRIAK.N.E, A., & DEGRUGILLIERS.P. (2007). Marine dredged sediments as new materials resource for road construction. *Waste Management* , 919–928.

KARIN.A, SVEN-ERIK.J, & RONNY.A. (2002). *Stabilization of organic soils by cement and pozzolanic reactions.* Linköping-Suède: Swedish Deep Stabilization Research Centre, Report 3.

KRAPF.M-E. (2012). *Agrégation de cellules bactériennes par des polymères cationiques (polyéthylèneimine) : influence de la masse moléculaire du polymère et de la présence/absence de surstructures exopolymériques bactériennes sur la déshydratation des boues biologiques.* Lorraine: Laboratoire Environnement et Minéralurgie - UMR 7569 - Université de Lorraine, Ecole Doctorale Sciences et Ingénierie des Ressources, Procédés, Produits, Environnement.

LAFHAJA.Z, SAMARA.M, AGOSTINI.F, BOUCARD.L, SKOCZYLAS.F, & DEPELSENAIRE.G. (2007). Polluted river sediments from the North region of France: Treatment with Novosol process and valorization in clay bricks. *Construction and Building Materials*, , 148, 606-612.

LE GRENELLE DE MER. (2011). *Le grenelle de Mer- Groupe de travail n° 11 – Sédiments de dragage.* Paris: Direction de l'eau et de la biodiversité.

LEVACHER .D, & DHERVILLY.P. (2010). Déshydratation mécanisée in situ de sédiments fraîchement dragués ou mis en dépôts : le projet SEDIGATE I. *Editions Paralia CFL*, DOI:10.5150/jngcgc.2010.093-L .

LHER.J, ROCHETTE.P, & LEROY.J. (2007). *Gestion des sédiments dragués dans les ports et voies navigables.* Tours: Centre d'Études Techniques Maritimes et Fluviales.

LIANG.Y. (2012). *Co-valorisation de sédiments et de sols fins par apport de liants et de fibres.* Caen: Thèse de Doctorat à l'Université de Caen - basse Normandie.

LOI SUR L'EAU, (2012). *Circulaire "relative à l'application de l'arrêté du 17 décembre 2008 établissant les critères d'évaluation et les modalités de détermination de l'état des eaux souterraines et des tendances significatives et durables de dégradation de l'état chimique".*

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE: La ministre de l'écologie, du développement durable et de l'énergie.

- LOUSTAU C- M. (2012).** *Caractérisation physico-chimique d'un sédiment marin traité aux liants hydrauliques – Évaluation de la mobilité potentielle des polluants inorganiques.* Lyon: Thèse de Doctorat à l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
- MAHERZI.W. (2013).** *Valorisation des sédiments de dragage marins traités aux liants hydrauliques en technique routière.* Caen: Thèse de Doctorat, Université de Caen basse Normandie. U.F.R : sciences Caen école Doctorale normande de chimie.
- MALKAWI.H, ALAWNEH .M, & ABU-SAFAQAH. O. (1998).** Effects of organic matter on the physical and the physicochemical properties of an illitic soil. *Applied Clay science* , 14, 257- 278.
- MANCIOPPI.L, DHERVILLY.P, & LEVACHER.D. (2012).** Décanteur dynamique NEMEAU ® 450 et valorisation de matériaux fins. *XIIèmes Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil-DOI © Editions Paralia CFL* , 117-M.
- MAROT.F. (1997).** *Caractérisation et traitement de sédiments de dragage contenant des polluants métalliques.* Havre: thèse de Doctorat à l'Université du Havre.
- MARSAULT. S. (2011).** *La navigation fluviale, un mode de transport européen.* Consulté le 2013, sur <http://www.exploratheque.net/dossiers/la-navigation-fluviale-un-mode-de-transport-europeen>.
- MEZAZIGH.S. (2010).** *Valorisation des sédiments marins contaminés par solidification/ stabilisation à base de liants hydrauliques et de fumée de silice.* Caen: Université de Caen-Basse Normandie- U.F.R- Sciences Caen.
- MEZENCEVOVA.A, YEBOAH.N-N, KAHNL-F, Kurtis. K.E. (2012).** Utilization of savannah harbor river sediment as the primary raw material in production of fired brick. *journal of Environmental Management* , 113, 128–136.
- MIRAOUL.M. (2010).** *Prétraitement et traitement des sédiments de dragage en vue d'une valorisation dans le génie civil.* Douai: Thèse Doctorat à l'école des Mines de Douai.
- MISKO.P, GROSDÉMANG.D, & BOUGIO.Y. (2008).** *Guide pour la gestion durable des déblais de dragage portuaires contaminés en France.* La Forêt Fouesnant : Centre d'Études Techniques Maritimes Et Fluviales et In Vivo.
- MUSTIN M. (1987).** "Le compost", Editions François Dubusc, ISBN 2 864 72008 6,.
- Odell.RT, Thornburn.H, & Mckenzie L.J. (1960).** Relationship of Atterberg limits to some other properties of Illinois soils. *Proceedings of the Soil Science Society of America* , 24 (4), 297–300.

- PARTON.S. (2009).** Boues d'épuration : la deshydratation au coeur du traitement. *Environnement & Technique*, N°284, 33-37.
- PÉNA.G, & PICOT.B. (1991).** Métaux traces dans les sédiments d'une lagune méditerranéenne : Sédiments Métaux lourds. *Oceanologica Acta*, 14, 459-472.
- PONS.J, PARRA.M, & JULIUS.C. (1987).** Teneurs en métaux lourds des sédiments fins de la baie de Fort-de-France, Martinique, Petites Antilles françaises. *Oceanologica Acta 1988*, 11 (1).
- POWER.E (1992).** *Chapman Assessing sediment quality .Sediment Toxicity Assessment.*
- PRISMA. (2014).** *PRISMA :Promoting Integrated Sediment Management.* Consulté le 9 2014, sur <http://www.prisma-projects.eu/index.php/fr/>.
- PROJET LIFE. (2007).** *Inventaire détaillé des techniques de curage, transport, traitement et usages des sédiments.* Lille: Projet d'étude européen LIFE par des organismes publics français, Néerlandais et Belges.
- RAYANAL.O, & CERTAIN .R. (2010).** *Plan de gestion des sédiments du languedoc-roussillon tache A2.* Perpignan: Sous la direction de la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement du Languedoc-Roussillon.
- ROSSIP, RAOUL.G, & GAVOIS.L. (2007).** Traitement des matériaux. *Service Relation clientèle - Techniques de l'Ingénieur*, C (5362).
- ROUX, L., & RIVIÈRE.A. (1969).** *Traitements des sols argileux par la chaux.* Paris: Assistant Section Mécanique des Roches-Département des Sols Laboratoire Central.
- SAMARA .M. (2007).** *Valorisation des sédiments fluviaux pollués après inertage dans la brique cuite.* Lille: Thèse de doctorat à L'école Centrale de Lille & Université des Sciences et Techniques de Lille.
- SCORDIA .P. (2008).** *Caractérisation et valorisation des sédiments fluviaux pollués et traités dans les matériaux routiers.* Lille: Thèse de doctorat à l'école centrale de Lille.
- SEDNET. (2011).** « *European Sediment Network* » site : <http://www.sednet.org>.
- SHNEIDER.G. (2001).** *Le curage des sédiments des cours d'eau* (Vol. 43). Paris: Le courrier de l'environnement de l'INRA.
- SILITONGA. E. (2010).** *Valorisation des sédiments marins contaminés par solidification/stabilisation à base de liants hydrauliques et de fumée de silice.* Caen: Thèse de Doctorat à l'Université de Caen/basse Normandie, U.F.R: sciences Caen. École doctorale Simem.

- SVAROVSKY, L. (1977).** « Solid-Liquid Separation », Chemical Engineering Series, London, Éditions Butterwoths.
- TRAN.N-T. (2009).** *valorisation de sédiments marins et fluviaux en technique routière.* Douai: Thèse de doctorat à l'école des Mines de Douai.
- TREMBLAY.H. (1998).** *Amélioration mécanique et prédiction de la compressibilité des sols fins du Québec.* QUÉBEC: Thèse de doctorat à l'Université Laval.
- UNICEM. (2009).** *Carrière de Granulats et Développement Durable 2011.*
- VANZELE.S, PALLEMANS.I, VAN NEDERKASSEL.J, VERMEERSCH .T, & QUAEYHAEGENS.H. (2014).** L'emploi de sédiments traités pour la construction d'une digue de compartimentation (Belgique). *XIIIèmes Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil; DOI:10.5150/jngcgc.2014.117* © Editions Paralia CFL .
- XING.H, YANG. X, XU.C, & YE. G. (2009).** Strength characteristics and mechanisms of salt-rich soil-cement. *Engineering Geology* , 103 (1-2), 33-38.
- ZENTAR.R, ABRIAK.N-E, & DUBOIS.V. (2008).** Effects of salts and organic matter on Atterberg limits of dredged sediments. *Applied clay science* , 391-397.
- ZENTAR.R, ABRIAK.N-E, & TRAN.N-T. (2009).** Caractérisation et étude de l'impact sur l'environnement de sédiments dragués dans le nord de la France. *Revue Paralia, Volume 2* .
- ZHOU.Y, LIU.R, & TANG.H. (2004).** Sorption interaction of phenanthrene with soil and sediment of different particle sizes and in various CaCl₂ solutions. *Journal of Colloid and Interface Science* , 270, 37-46.
- ZRIA. (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 granulats.* Douai: Thèse de Doctorat à l'école des Mines de Douai.

Normes Utilisées

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 bâchée unique avec un rapport liquide - solide de 10l/kg et une granularité inférieure à 4mm (sans ou avec réduction de la granularité).

NF EN 12879. Novembre 2000. Caractérisation des boues – Détermination de la perte au feu de la matière sèche.

NF ISO 13320-1. Septembre 2000. Analyse granulométrique. Méthodes par diffraction laser. Partie 1 : principes généraux.

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 94-050. Octobre 1991. Sols : reconnaissance et essais – détermination de la teneur en eau pondérale des sols – méthode par étuvage.

NF P 94-051. Mars 1993. Sols : reconnaissance et essais – détermination des limites d'Atterberg – limite de liquidité à la coupelle – limite de plasticité au rouleau.

NF P 94-068. Novembre 1993. Sols : reconnaissance et essais – mesure de la quantité et de l'activité de la fraction argileuse – détermination de la valeur au bleu de méthylène d'un sol par l'essai à la tâche.

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 P 94-093. Décembre 1993. Détermination des caractéristiques de compactage d'un sol : essai Proctor normal, essai Proctor modifié.

NF P 98 115. Janvier 1992. Exécution des corps de chaussées – Constituants – Composition des mélanges et formulation – Exécution et contrôle.

NF P 98-113. Novembre 1994. Assises de chaussée. Sables traités aux liants hydrauliques et pouzzolaniques. Définition – Composition – Classification.

NF P 98-114-2. Novembre 1994. Assises de chaussées. Méthodologie d'étude en laboratoire des matériaux traités aux liants hydrauliques. Partie 2 : Sables 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 P 98-230-2. Août 1993. Préparation des matériaux traités aux liants hydrauliques ou non traités. Fabrication des éprouvettes de sable ou de sols fins par compression statique.

NF P 98-232-1. Novembre 1991. Détermination des caractéristiques mécaniques des matériaux traités aux liants hydrauliques. Essai de compression simple sur graves.

NF P 98-232-3. Octobre 1993. Détermination des caractéristiques mécaniques des matériaux traités aux liants hydrauliques. Essai de compression diamétrale sur sables et sols fins.

XP P 94-047 décembre 1998 : Sols : Reconnaissance et Essais – Détermination de la teneur pondérale en matière organique – Méthode par calcination

XP X 31-211. Avril 2000. Déchets. Essais de lixiviation d'un déchet solide initialement massif ou généré par un procédé de solidification.

Communication & Publication

❖ Articles dans des revues internationales à comité de lecture et actes

A.KASMI, M. BENZERZOUR, N.E ABRIAK, P. GREGOIRE, Etude des caractéristiques physico-chimiques et environnementales de sédiments fluviaux : influence de la déshydratation par ajout de flocculant. *Journal catalyse matériaux et environnement*, vol. XII, 23-28, 2014.

❖ Articles en cours de préparation :

A. KASMI, M. BENZERZOUR N.-E. ABRIAK, H. AZRAR, R. Zentar, Study of the physical-chemical and environmental characterizations of raw sediments and dehydrated by addition of polymers for use in road construction. *Environmental Technology*, article en cours lecture.

❖ Communications dans congrès ou conférences internationaux avec comités de sélection et actes :

M. BENZERZOUR, N.-E. ABRIAK, **A. KASMI**, R. ZENTAR, Promoting Integrated Sediment Management : PRISMA, 3rd International Conference on Sediment Management, Alibaug, Maharashtra (INDIA), 20 au 23 mars 2012, pp 133, Ed. Proceedings.

N.-E. ABRIAK, H. AZRAR, R. ZENTAR, **A. KASMI**, M. BENZERZOUR, Valorisation des sédiments marins dans des ouvrages de Génie Civil : formulation et suivi physico-mécanique et environnemental, ECGP'10, Fès, Maroc, April 24th, 25th, 2012, pp CD ROM.

A. KASMI, N.-E. ABRIAK, M. BENZERZOUR, Caractérisation physique-chimiques et environnementales des sédiments fluviaux dragués dans le nord de la France, ECGP'11, Villeneuve d'Ascq, France, 26-28 Juin, 2013, pp CD ROM.

H. AZRAR, R. ZENTAR, N.-E. ABRIAK, **A. KASMI**, Etude de la répartition des polluants selon les fractions granulométriques d'un sédiment marin, 32èmes Rencontres de l'AUGC, ORLEANS, 4 au 6 juin 2014.

Hassane AZRAR, Rachid ZENTAR, Nor-Edine ABRIAK, **Abdelhafid KASMI**. Influence of the rotational speed of a granulating plate on the properties of aggregates made of dredged sediment. 4th International Symposium on Sediment Management (I2SM), Ferrara, Italy September 17-18-19, 2014.

A. KASMI, N.-E. ABRIAK, M. BENZERZOUR, H. AZRAR, Study of the physical-chemical and environmental properties of raw sediments and dehydrated by addition of polymers for use in road construction. 4th International Symposium on Sediment Management, Ferrara, Italy, Sept 17-18-19, 2014.

Annexes

Annexes

Annexe 1 : Réglementation des sédiments

Annexe 2 : unité mobile

Annexe 3 : Courbes de sédimentation et optimisation de la dose optimale du polymère

Annexe 1 : Réglementation des sédiments

1. Réglementation belge

1.1 Réglementation flamandes

❖ Valeurs pour la libre utilisation des terres excavées.

Les valeurs pour la libre utilisation des terres excavées, visées à l'article 161 de l'arrêté du 14 décembre 2007 du Gouvernement flamand fixant les seuils relatif à l'assainissement et à la protection du sol, sont indiquées dans les tableaux ci-dessous :

<i>Eléments Chimiques</i>	<i>Partie fixe de la terre (matières sèche en mg/kg)</i>	<i>Eaux souterraines ([00b5]g/l)</i>
<i>Arsenic</i>	35	12
<i>Cadmium</i>	1.2	3
<i>Chrome</i>	91	30
<i>Cuivre</i>	72	60
<i>Mercur</i>	1.7	0.6
<i>Plomb</i>	120	12
<i>Nickel</i>	56	24
<i>Zinc</i>	200	300

Tableau 1. 1 : Valeurs limites des métaux lourds pour la libre utilisation des terres excavées (Arrêté du Gouvernement flamand du 14 décembre 2007).

<i>Composés</i>	<i>Partie fixe de la terre (matières sèche en mg/kg)</i>	<i>Eaux souterraines ([00b5]g/l)</i>
<i>Benzène</i>	0.3	2
<i>Toluène</i>	1.6	20
<i>Ethylbenzène</i>	0.8	20
<i>Xylène</i>	1.2	20
<i>Styrene</i>	0.32	10

Tableau1.2 : Valeurs limites des hydrocarbures monocycliques pour la libre utilisation des terres excavées (Arrêté du Gouvernement flamand du 14 décembre 2007)

<i>Composés</i>	<i>Partie fixe de la terre (matières sèche en mg/kg)</i>	<i>Eaux souterraines ([00b5]g/l)</i>
<i>Dichloormethaan</i>	0.05	5
<i>Tetrachlommethane</i>	0.04	1.2
<i>letrachloroethylene</i>	0.28	5
<i>Trichlorethylene</i>	0.26	5
<i>Monochlorobenzene</i>	1	5
<i>1.2-dichlorobenzene (3)</i>	14	5
<i>1.3-dichlorobenzene (3)</i>	16	5
<i>1.4-dichlorobenzene (3)</i>	1.6	5
<i>Triehlorobenzeme 0)</i>	0.2	5
<i>Tetrachlorobenzene (5)</i>	0.04	5
<i>Pentachlorobenzene</i>	0.2	1.4
<i>41.1-trichloroethane</i>	4	5
<i>1.1.2-trichloroethane</i>	0.03	5
<i>1.1-dichloroethane</i>	0.03	5
<i>Cis + trans-1.2-dichloroethylene</i>	0.16	5

Tableau 1.3 : Valeurs limites des hydrocarbures Chlorés pour la libre utilisation des terres excavées
(Arrêté du Gouvernement flamand du 14 décembre 2007)

<i>Composés</i>	<i>Partie fixe de la terre (matières sèche en mg/kg)</i>	<i>Eaux souterraines ([00b5]g/l)</i>
<i>1.2-dichloroeihane</i>	0.06	5
<i>Chlorure de vinyle</i>	0.06	2
<i>trichlorornethane (Chloroforme)</i>	0.06	5
<i>Hexachlorobenzene</i>	0.06	0.6

Tableau1.4 : Valeurs limites des hydrocarbures chlorés carcinogènes pour la libre utilisation des terres excavées (Arrêté du Gouvernement flamand du 14 décembre 2007)

<i>Composés</i>	<i>Partie fixe de la terre (matières sèche en mg/kg)</i>	<i>Eaux souterraines ([00b5]g/l)</i>
<i>Naphtalene</i>	0.8	20
<i>Benzo(a)pyrene</i>	0.3	0.4
<i>Fenantrene</i>	30	20
<i>Fluorantene</i>	10.1	2
<i>Benzo(a)anthracene</i>	2.5	2
<i>Chrysene</i>	5.1	0.9
<i>Benzo(b)fluoranthene</i>	1.1	0.7
<i>Benzo(k)fluoranthene</i>	0.6	0.4
<i>Benzo(ghi)perylene</i>	33	0.1
<i>Indeno (1.2.3-cci)pyrene</i>	0.53	0.06
<i>Anthracene</i>	1.5	20
<i>Fluorene</i>	19	20
<i>Dibenz(a,h)anthracene</i>	0.3	0.3
<i>Acenaphthene</i>	4.6	20
<i>Acenaphthylene</i>	0.6	20
<i>Pyrene</i>	62	20

Tableau 1.5 : Valeurs limites des hydrocarbures aromatiques polycycliques pour la libre utilisation des terres excavées (Arrêté du Gouvernement flamand du 14 décembre 2007).

<i>Composés</i>	<i>Partie fixe de la terre (matières sèche en mg/kg)</i>	<i>Eaux souterraines ([00b5]g/l)</i>
<i>Cyanure libre</i>	3	-
<i>Cyanure non oxydable au chlore</i>	3	-
<i>Total cyanures</i>	6	40

Tableau 1.6 : Valeurs limites des cyanures pour la libre utilisation des terres excavées (Arrêté du Gouvernement flamand du 14 décembre 2007)

<i>PESTICIDES</i>	
<i>Aldrine + dieldrine</i>	0.02
<i>Chlordane (cis + trans)</i>	0.12
<i>DDT + DDE + DDD</i>	1.2
<i>Lindane (isomère g)</i>	1.2
<i>Lindane (isomère &#945;)</i>	0.03
<i>Lindane (isomère &#946;)</i>	0.12
<i>Endosulphan (&#945; &#4946; et sulfate)</i>	1

Tableau 1.7 : Valeurs limites des pesticides pour la libre utilisation des terres excavées (Arrêté du Gouvernement flamand du 14 décembre 2007).

❖ **Valeurs pour l'utilisation des terres excavées en construction ou dans un produit solide**

Les valeurs pour l'utilisation des terres excavées en construction ou dans un produit solide, spécifiées dans l'article 168, § 2, 1, de l'arrêté du Gouvernement flamand du 14 décembre 2007, fixant les seuils relatifs à l'assainissement et à la protection du sol, sont indiquées dans les tableaux ci-dessous :

<i>Composés</i>	<i>Partie fixe de la terre (matières sèche en mg/kg)</i>
<i>Arsenic</i>	250
<i>Cadmium</i>	10
<i>Chrome (2)</i>	880
<i>Cuivre</i>	375
<i>Mercure</i>	5
<i>Plomb</i>	1250
<i>Nickel</i>	250
<i>Zinc</i>	1250

Tableau 1.8 : Valeurs limites des métaux lourds pour l'utilisation des terres excavées en construction (Arrêté du Gouvernement flamand du 14 décembre 2007).

<i>Composés</i>	<i>Partie fixe de la terre (matières sèche en mg/kg)</i>
<i>Benzène</i>	0,5
<i>Toluène</i>	15
<i>Ethylbenzène</i>	5
<i>Xylène</i>	15
<i>Styrene</i>	1,5
<i>Hexane</i>	1
<i>Heptane</i>	25
<i>Octane</i>	90
<i>Huile minérale</i>	1000
<i>Composés organohalogénés extractibles (EOX)</i>	10
<i>Polychlorobiphényles</i>	0,5

Tableau 1.9 : Valeurs limites des hydrocarbures monocycliques pour l'utilisation des terres excavées en construction (Arrêté du Gouvernement flamand du 14 décembre 2007).

<i>Composés</i>	<i>Partie fixe de la terre (matières sèche en mg/kg)</i>
<i>Naphtalene</i>	20
<i>Benzo(a)pyrene</i>	7,2
<i>Fenantrene</i>	40
<i>Fluorantene</i>	40
<i>Benzo(a)anthracene</i>	30
<i>Chrysene</i>	320
<i>Benzo(b)fluoranthene</i>	30
<i>Benzo(k)fluoranthene</i>	30
<i>Benzo(ghi)perylene</i>	35
<i>Indeno (1.2.3-cci)pyrene</i>	30

Tableau 1.10 : Valeurs limites des hydrocarbures polycycliques pour l'utilisation des terres excavées en construction (Arrêté du Gouvernement flamand du 14 décembre 2007).

<i>Composés</i>	<i>Partie fixe de la terre (matières sèche en mg/kg)</i>
<i>Cyanure libre</i>	5
<i>Cyanure non oxydable au chlore</i>	12

Tableau 1.11 : Valeurs limites des cyanures pour l'utilisation des terres excavées en construction (Arrêté du Gouvernement flamand du 14 décembre 2007)

❖ Valeurs de lixiviation pour l'utilisation des terres excavées en construction ou dans un produit solide

L'essai de lixiviation est réalisé selon la norme CMA 2/II/A. Cet essai est réalisé sur un matériau disposé dans une colonne de hauteur 70 cm avec une densité de 1550kg/m³.

Les valeurs de lixiviation pour l'utilisation des terres excavées en construction ou dans un produit solide, visées à l'article 168, de l'arrêté du 14 décembre 2007 du Gouvernement flamand fixant les seuils réglementaire relatif à l'assainissement du sol et à la protection du sol, sont indiquées dans le tableau 12.

<i>métaux lourds</i>	<i>Partie fixe de la terre (matières sèche en mg/kg)</i>
<i>Arsenic</i>	0,2
<i>Cadmium</i>	0,015
<i>Chrome</i>	0,1
<i>Cuivre</i>	0,2
<i>Mercurure</i>	0,003
<i>Plomb</i>	0,4
<i>Nickel</i>	0,4
<i>Zinc</i>	0,7

Tableau 1.12 : Les valeurs limites de lixivabilité pour l'utilisation des terres excavées en construction par la méthode CMA 2/II/A.

2. REGLEMENTATION DES PAYS BAS

La gestion des sédiments et des boues de dragage dans les Pays Bas est régit selon le décret sur la qualité des sols du 18 avril 2013. Il définit trois seuils limites en fonction du devenir des volumes à déplacer : l'immersion ou la réutilisation à terre.

❖ Cas de l'immersion ou bien le dépôt en décharge

Selon le décret, cité ci-dessus, il existe trois filières pour l'élimination des déblais de sédiments de dragage : l'immersion dans les plans d'eau douce, l'immersion en mer et le dépôt à terre. Le tableau ci-dessous récapitule les seuils limites des éléments et composés chimiques pour chaque filière.

<i>Métaux lourds</i>	<i>Valeur de fond</i>	<i>Immersion en eau douce</i>	<i>Immersion en eau de mer</i>	<i>Dépôt à terre</i>
	[mg/kg ds]	[mg/kg ds]	[mg/kg ds]	[mg/kg ds]
<i>Sb</i>	4,0*	-	-	-
<i>As</i>	20	29	29@	-
<i>Br</i>	190	395	-	395
<i>Cd</i>	0,6	4	4	7,5
<i>Cr</i>	55	120	120	-
<i>Co</i>	15	25	-	25
<i>Cu</i>	40	96	60@	-
<i>Hg</i>	0,15	1,2	1,2	-
<i>Pb</i>	50	138	110	-
<i>Mo</i>	1,5*	5	-	5
<i>Ni</i>	35	50	45	-
<i>Zn</i>	140	563	365@	-
<i>PAK total (som 10)</i>	1,5	9	8	40
penta chlorobenzène.	0,0025	0,007	-	-
hexa chlorobenzène	0,0085	0,044	0,02	-
<i>PCB</i>				
<i>PCB 28</i>	0,0015~	0,014	-	-
<i>PCB 52</i>	0,0020~	0,015	-	-
<i>PCB 101</i>	0,0015~	0,023	-	-
<i>PCB 118</i>	0,0045~	0,016	-	-
<i>PCB 138</i>	0,0040~	0,027	-	-
<i>PCB 153</i>	0,0035~	0,033	-	-
<i>PCB 180</i>	0,0025~	0,018	-	-
<i>PCB (7)</i>	0,02	0,139	0,1@	-
<i>DDT/DDE/DDD</i>	0,30~	0,30\$	0,02	-
<i>Aldrin</i>	0,00080~	0,0013	-	-
<i>Dieldrine</i>	0,0080~	0,0080\$	-	-
<i>Endrine</i>	0,0035~	0,0035\$	-	-
<i>Isodrine</i>	0,0010*~	-	-	-
<i>Telodrin</i>	0,00050~	-	-	-
<i>Drins</i>	0,015	0,015\$	-	-
<i>Endosulfan sulfate</i>				
<i>α-endosulfan</i>	0,0009	0,0021	4	-
<i>α-HCH</i>	0,001	0,0012	-	-
<i>β-HCH</i>	0,002	0,0065	-	-
<i>γ-HCH</i>	0,003	0,003\$	-	-
<i>HCH-lié</i>	0,010~	0,010\$	-	-

<i>Hepta chlore</i>	0,0007	0,004	4	-
<i>Heptachloorpoxide</i>	0,002	0,004	-	-
<i>Hexachlorobutadiène</i>	0,003*	0,0075	-	-
<i>Tributyltin</i>	0,065	0,25	0,25 (13)	-

Tableau 1.13 : Teneurs maximales admissibles des éléments et des composés organiques pour l'élimination des sédiments de dragage (en mg par kg de matières sèches) (décret sur la qualité des sols du 18 avril 2013)

❖ Cas de la réutilisation à terre

Selon le décret, cité ci-dessus, il existe deux filières pour la réutilisation des déblais de sédiments de dragage à terre : réutilisation dans le domaine de l'habitat et la réutilisation dans le domaine de l'industrie. Le tableau ci-dessous récapitule les seuils limites des éléments et composés chimiques pour chaque filière.

<i>Métaux lourds</i>	<i>Valeur de fond</i>	<i>Pour l'habitat</i>	<i>Pour l'industrie</i>	<i>Seuils limites</i>
	<i>[mg/kg ds]</i>	<i>[mg/kg ds]</i>	<i>[mg/kg ds]</i>	<i>[mg/kg ds]</i>
<i>Antimoine</i>	4,0*	15	22	22
<i>As</i>	20	27	76	76
<i>Br</i>	190	550	920	920
<i>Cd</i>	0,6	1,2	4,3	13
<i>Cr</i>	55	62	180	-
<i>Co</i>	15	35	190	190
<i>Cu</i>	40	54	190	190
<i>Hg</i>	0,15	0,83	4,8	-
<i>Pb</i>	50	210	530	530
<i>Mo</i>	1,5*	88	190	190
<i>Ni</i>	35	39	100	100
<i>Ti</i>	6,5	180	900	-
<i>V</i>	80	97	250	-
<i>Zn</i>	140	200	720	720
Autres éléments inorganiques				
<i>Sans cyanure (4)</i>	3	3	20	20
<i>Complexe de cyanure (5)</i>	5,5	5,5	50	50
<i>Thiocyanates</i>	6	6	20	20
Composés aromatiques				
<i>Benzène</i>	0,20*	0,2	1	1,1
<i>Ethylbenzène</i>	0,20*	0,2	1,25	110
<i>Toluène</i>	0,20*	0,2	1,25	32

<i>Xylènes</i>	0,45*	0,45	1,25	17
<i>Styrène</i>	0,25*	0,25	86	86
<i>Phénol</i>	0,25	0,25	1,25	14
<i>Crésols</i>	0,30*	0,3	5	13
<i>Dodecylbenzene</i>	0,35*	0,35	0,35	-
<i>Solvants aromatiques (totaux) (6)</i>	2,5*	2,5	2,5	-
<i>PAK totaux (10)</i>	1,5	6,8	40	40
<i>Chloréthylène</i>	0,10*	0,1	0,1	0,1
<i>Dichlorométhane</i>	0,1	0,1	3,9	3,9
<i>1,1- Dichloroéthane</i>	0,20*	0,2	0,2	15
<i>1,2- Dichloroéthane</i>	0,20*	0,2	4	6,4
<i>1,1 Dichloroéthène (7)</i>	0,30*	0,30-	0,3	0,3
<i>1,2- Dichloroéthène</i>	0,30*	0,3	0,3	1
<i>Dichloropropanes</i>	0,80*	0,8	0,8	2
<i>Trichlorométhane</i>	0,25*	0,25	3	5,6
<i>1, 1, 1- trichloroéthane</i>	0,25*	0,25	0,25	15
<i>1, 1, 2- trichloroéthane</i>	0,30*	0,3	0,3	10
<i>Trichloroéthène</i>	0,25*	0,25	2,5	2,5
<i>Tétrachlorométhane</i>	0,30*	0,3	0,7	0,7
<i>Tétrachloroéthylène</i>	0,15	0,15	4	8,8
<i>Mono Chlorobenzene</i>	0,20*	0,2	5	15
<i>Dichlorobenzènes</i>	2,0*	2	5	19
<i>Trichlorobenzènes</i>	0,015*	0,015	5	11
<i>Tétrachlorobenzènes</i>	0,0090*	0,009	2,2	2,2
<i>Pentachlorobenzène</i>	0,0025	0,0025	5	6,7
<i>Hexachlorobenzène</i>	0,0085	0,027	1,4	2
<i>Chlorophénols Mono</i>	0,045	0,045	5,4	-
<i>Chlorophénols</i>	0,20*	0,2	6	-
<i>trichlorophénols</i>	0,0030*	0,003	6	-
<i>Chlorophénols Tetra</i>	0,015*	1	6	-
<i>pentachlorophénol</i>	0,0030*	1,4	5	-
<i>PCB's (7)</i>	0,02	0,02	0,5	1
Autres hydrocarbures chlorés				
<i>Mono Chloro aniline N</i>	0,20*	0,2	0,2	-
<i>Penta aniline Chloro</i>	0,15*	0,15	0,15	-
<i>Dioxine</i>	0,000055*	0,000055	0,000055	-
<i>Chloronaphtalèn</i>	0,070*	0,07	10	-
<i>chlordan</i>	0,002	0,002	0,002	4
<i>DDT</i>	0,2	0,2	1	1
<i>DDE</i>	0,1	0,13	1,3	1,3

<i>DDD</i>	0,02	0,84	34	34
<i>Drins</i>	0,015	0,04	0,14	0,14
sulfate d'endosulfan				
<i>α-endosulfan</i>	0,0009	0,0009	0,0009	4
<i>α-HCH</i>	0,001	0,001	0,5	17
<i>β-HCH</i>	0,002	0,002	0,5	1,6
<i>γ-HCH</i>	0,003	0,04	0,5	1,2
<i>heptachlore</i>	0,0007	0,0007	0,0007	4
<i>heptachlore époxyde</i>	0,002	0,002	0,002	4
<i>L'aziphos-méthyl</i>	0,0075*	0,0075	0,0075	-
<i>Organotin (8)</i>	0,15	0,5	2,5 (9)	2,5
<i>tributylétain (8)</i>	0,065	0,065	0,065	-
<i>MCPA</i>	0,55*	0,55	0,55	-
<i>Atrazine</i>	0,035*	0,035	0,5	-
<i>carbaryl</i>	0,15*	0,15	0,45	-
<i>carbofuran (7)</i>	0,017*	0,017	0,017	-
<i>4- chloromethylphenols</i>	0,60*	0,6	0,6	-
<i>Pesticides non chlorés</i>	0,090*	0,09	0,5	-
Autres substances				
<i>Asbest (10)</i>	-	100	100	100
<i>Cyclohexanone</i>	2,0*	2	150	-
<i>Diméthylphtalate (11)</i>	0,045*	9,2	60	-
<i>Phtalate de diéthyle (11)</i>	0,045*	5,3	53	-
<i>Di-isobutyl (11)</i>	0,045*	1,3	17	-
<i>Phtalate de dibutyle (11)</i>	0,070*	5	36	-
<i>Butylbenzylphtalate (11)</i>	0,070*	2,6	48	-
<i>dihexyle (11)</i>	0,070*	18	60	-
<i>Di (2-éthylhexyle), le phtalate (11)</i>	0,045*	8,3	60	-
<i>Huile minérale (12)</i>	190	190	500	5000
<i>Pyridine</i>	0,15*	0,15	1	11
<i>Tétrahydrofurane</i>	0,45	0,45	2	-
<i>Tetrahydrothiophene</i>	1,5*	1,5	8,8	-
<i>Tribromométhane</i>	0,20*	0,2	0,2	75
<i>Ethylène Glycol</i>	5	5	5	-
<i>Diéthylène</i>	8	8	8	-
<i>Acrylonitrile</i>	2,0*	2	2	-
<i>Formaldéhyde</i>	2,5*	2,5	2,5	-
<i>Isopropanol</i>	0,75	0,75	0,75	-
<i>Méthanol</i>	3	3	3	-
<i>Butanol</i>	2,0*	2	2	-

<i>Acétate de butyle</i>	2,0*	2	2	-
<i>Acétate d'éthyle</i>	2,0*	2	2	-
<i>Oxyde de tert-butyle</i>	0,20*	0,2	0,2	44
<i>Méthyl éthyl cétone</i>	2,0*	2	2	-

Tableau 1.14 : *Teneurs maximales admissibles des éléments et des composés organiques pour la réutilisation à terre des sédiments de dragage (en mg par kg de matières sèches) (décret sur la qualité des sols du 18 avril 2013).*

Annexe 2: Unité Mobile

1. Introduction

The project consists in carrying out a design of a mobile unit of characterization of the river sediments and to test it in situ in various sites to validate its reliability.

Several models of design have been carried out or principal the criterion is a criterion of place and mobility while rejoining the relevance of the tests embarked.

Below some examples of dimensionings of the mobile unit are presented

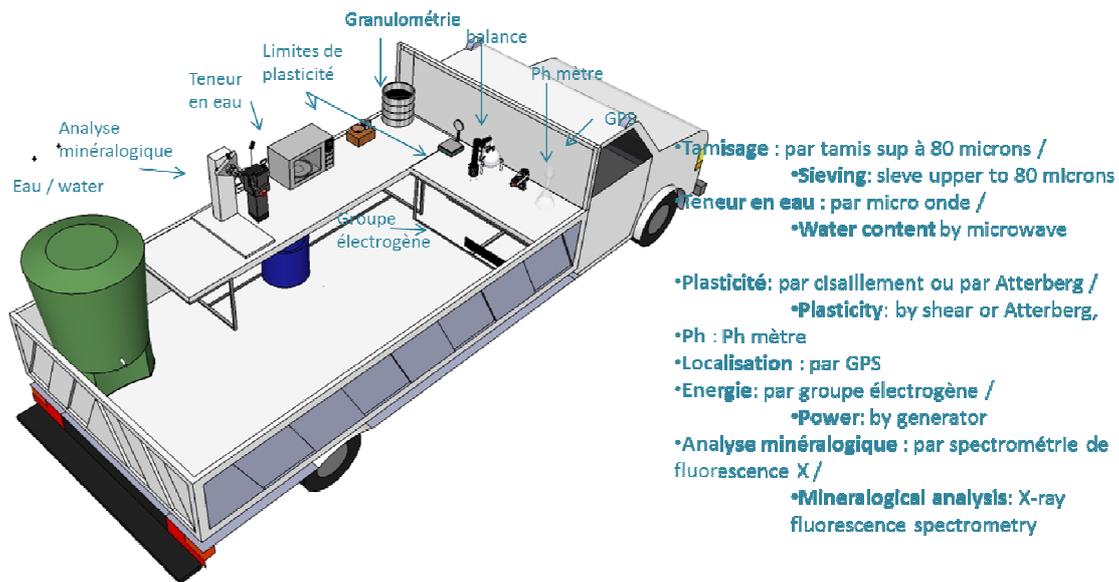


Figure 2.1: Mobile unit

2. Design of the mobile unit

The mobile unit is made up of:

- Microwave
- Balances
- Pycnometer with helium
“MICROMERTICS-
ACCUPYC1330”
- Gun analyzer X-ray fluorescence
- Apparatus of VBS
- Sieve of the 0.63µm to the 4 mm
- Apparatus of limit of Atterberg
- Chemical gun analyzer of elements
by x-ray fluorescence,
- Bend with carbide
- pH measures,
- GPS and Battery and generator

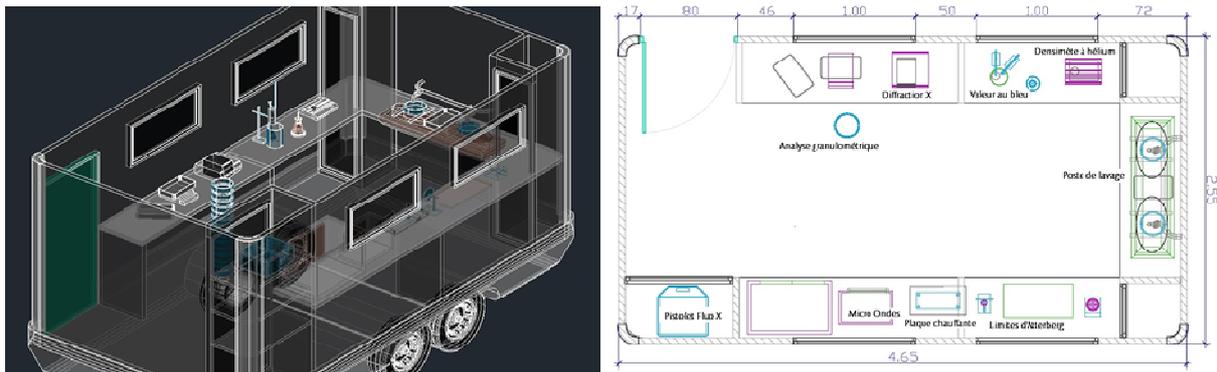


Figure 2.2: design of the mobile unit

3. Difference tests in-situ/test laboratory

Criterion	Tests laboratory	In situ tests
Time	Length (time of routing)	Rapid
Precision	Very precise	Idea
Cost	Raised	Reasonable
Many tests per day	Weak	Important
Implementation	Require of the qualified personnel	Require of the qualified personnel

Table 2.1: Comparison between test in laboratory and in situ

From their nature, in situ tests must be fast. It is necessary to be able to carry out a big number of tests in one day. It is thus necessary that their costs are weak; indeed it would not be profitable to make a great number of very expensive tests. The advantage of the laboratory is the precision which it gets, it will be always essential to carry out tests laboratory to check those done on site after optimization of the samples characterized in situ.

4. Materials of In situ characterization

The mobile unit suggested is equipped mainly with the following material:

4.1 Determination of the water content

For the water content, the tool thermobalance seems to us adequate for the determination of the water content. Indeed, the sample is introduced into the machine which deals with weighing it, to dry it then to reweigh it.



Figure 2.3: mobile unit of measurement of the water content

Within the framework of the mobile unit used in situ we used the same principle of test with a microwave of building site.

the user can used also microwave if he has any energy source

4.2 Determination of the value in blue

The test of in situ VBS, we choose the same instruments used at the laboratory except that they will be out of plastic.



Figure 2.4: mobile unit of the VBS

4.3 Determination of granulometry

The sediments are generally of small sizes. A sifting is not thus effective to characterize the granulometry of the samples.

We propose the use of a particle-measurement instrument using the diffraction of a laser beam crossing the sample. The following material is transportable and makes it possible to have the granulometry of the studied sample.



Figure 2.5: Mobile granulometry

In some case (big dimension of material) the user can use the saving methods.

4.4 Determination of plasticity

For the cup of Standard, the tool used at the laboratory is also adapted for an in situ use. The cup of Standard was used in different the anlyses realized on the ground.

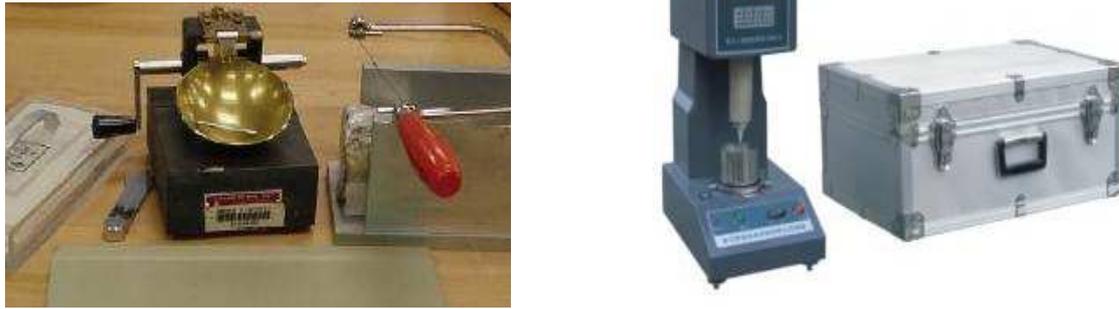


Figure 2.6: Atteberg limits

This equipment is a digital tester to measure the liquid limit and plasticity while respecting the rules of geotechnical testing; this device is developed by Shanghai Tongji University in China. It provides reliable data to classify the soil and calculate the plasticity index. Overall dimension: 240 × 155 × 350mm.

4.5 Determination of the pH

In order to determine the pH of the sediments on the ground, a mobile pH-meter can give as good results (Figure 8).



Figure 2.7: Mobile pH-meter

4.6 Determination of the chemical composition and mineralogical In situ

To make the chemical analysis of the sediments, there exist several laboratory methods and in situ. The tool used for in situ analysis is gun with x-ray fluorescence (Figure 2.8).

The gun with x-ray fluorescence is a portable instrument which gives us the various values and chemical compositions of the sediments, with the associated concentrations. The tool uses one of the properties physics of the matter: the fluorescence of x-rays. the matter re-emits energy when it is bombarded x-rays, it is the secondary emission of x-ray or of x-ray

fluorescence. One can then deduce from them the elementary composition or the mass concentrations from each chemical element.



Figure 2.8: mobile unit X-ray fluorescence

The portable analyzer is a tool for the tracking and the evaluation of the sites and grounds polluted. This tool aims at of in situ determination of the concentrations in elements traces quickly and simply.

After in situ analysis, tests laboratory to determine toxicity are necessary to consider the risk environmental potential of the grounds.

The technique of analysis is constituted of two parts:

- ✓ A source of excitation which causes the emission of a spectrum of x-rays characteristic of the composition of the required ETM;
- ✓ A detector and an analyzer of radiation which identifies the lines composing the spectrum.

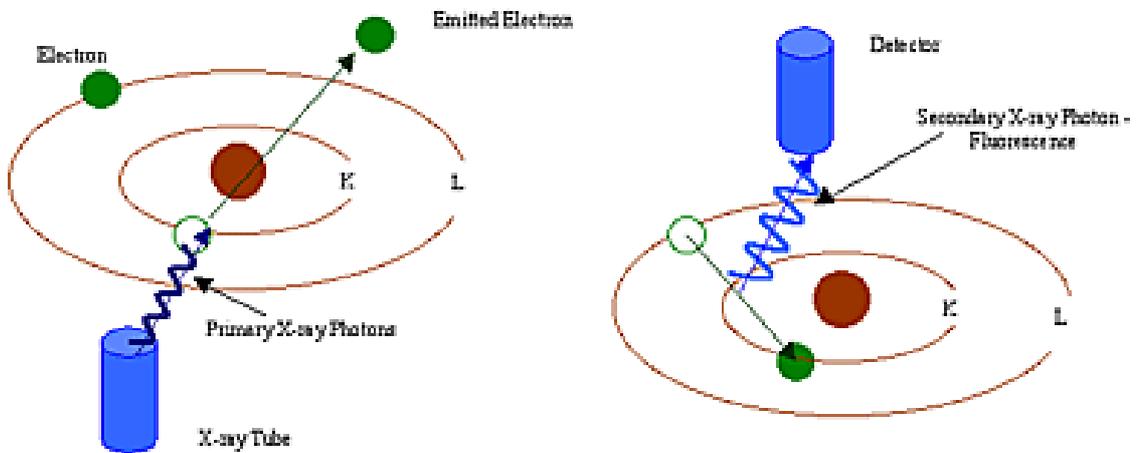
In a more practical way, the gun Olympus “Premium DELTA” of InnovX holds two sources of x-rays:

- ✓ a detector with silicon like radioactive source;
- ✓ and a tube with x-rays of 4 Watts.

The cost and the times of analyzes of samples in laboratory (which they are interns or external with the company) prevent a fast interpretation of the observations carried out on site.

In order to facilitate decision making, the professionals can from now on carry out on the ground of finer and more selective measurements thanks to the portable devices of measurements.

Indeed the apparatuses with x-ray fluorescence implement a method innovating and adapted to carry out a fast analysis of the elements in various matrices (grounds, waste,...).



The principle of fluorescence XRF consists in sending x-rays on the matters to be analyzed. These x-rays “primary educations” excite the atoms, which in return emit a “secondary” X-radiation whose spectrum is analyzed by a spectrometer.

The spectrum of réémission is characteristic of the elementary atomic composition of the sample and the mass concentration of each element. This technology is used mainly for the fine analysis of the composition, the identification and the sorting, of metal alloys, but also for the analysis of the pollutants in the grounds, recycled muds, the plastics, electronic glasses and waste.

Following these various investigations for the optimization of the mobile unit and following the various tests carried out in the countries partners. We chose two types of mobile unit.

Annexe 3 : Courbes de sédimentation et optimisation de dose optimale

❖ **Optimisations et sélections des polymères**

<i>Concentration EM340 CT en kg/tonnes</i>	<i>SF-Belgique</i>					<i>SF-Angleterre</i>				
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
<i>Teneur en eau (%)</i>	179	176	187	247	267	208	203	198	208	210
<i>limpidité</i>	+	+	-	-	--	-	+	++	-	-
<i>Concentration EM440 CT en kg/tonnes</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
<i>Teneur en eau (%)</i>	160	157	168	227	246	199	200	195	205	200
<i>limpidité</i>	-	+	+	-	--	-	+	++	+	-

Tableau 3.1 : Optimisation de polymères cationique avec une concentration 300g/l de sédiment étudiés.

<i>Concentration EM 533 kg/tonnes</i>	<i>SF-Belgique</i>					<i>SF-Angleterre</i>				
	<i>0.5</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>0.5</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
<i>Teneur en eau (%)</i>	150	155	150	160	160	180	197	192	200	200
<i>limpidité</i>	+	+	++	+	-	-	+	+	-	--
<i>Concentration EM430 en kg/tonnes</i>	<i>0.5</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>0.5</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
<i>Teneur en eau (%)</i>	152	153	148	160	156	196	198	197	195	202
<i>limpidité</i>	-	++	++	-	--	-	+	+	-	-

Tableau 3.2 : Optimisation de polymères anionique avec une concentration 300g/l de sédiment étudiés.

	<i>SF-Belgique</i>					<i>SF-Angleterre</i>				
<i>Concentration FAM 4351 kg/tonnes</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
<i>Teneur en eau (%)</i>	200	196	195	200	201	195	195	197	198	200
<i>limpidité</i>	--	+	+	-	--	--	+	+	-	--
<i>Concentration FAM 4802 en kg/tonnes</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
<i>Teneur en eau (%)</i>	152	153	150	149	170	190	180	200	210	205
<i>limpidité</i>	--	-	+	+	--	-	+	+	-	--

Tableau 3.3 : Optimisation de polymères amphotères avec une concentration 400g/l de sédiment étudiés

	<i>SF-Belgique</i>					<i>SF-Angleterre</i>				
<i>Concentration EM340 CT en kg/tonnes</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
<i>Teneur en eau (%)</i>	56	60	58	59	61	110	108	96	104	103
<i>limpidité</i>	+	+	-	-	--	-	+	++	-	-
<i>Concentration EM440 CT en kg/tonnes</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
<i>Teneur en eau (%)</i>	55	57	57	60	58	120	125	117	205	200
<i>limpidité</i>	-	+	+	-	--	-	+	++	+	-

Tableau 3.4 : Optimisation de polymères cationique avec une concentration initiale de sédiments étudiés : 590g/l sédiment de l'Angleterre et 1015g/l sédiment de la Belgique.

	<i>SF-Belgique</i>					<i>SF-Angleterre</i>				
<i>Concentration EM 533 kg/Tonnes</i>	<i>0.5</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>0.5</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
<i>Teneur en eau (%)</i>	60	55	55	60	60	110	108	100	105	104
<i>limpidité</i>	+	+	++	+	-	-	+	+	-	--
<i>Concentration EM430 en kg/tonnes</i>	<i>0.5</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>0.5</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
<i>Teneur en eau (%)</i>	55	52	50	54	52	120	118	120	122	120
<i>limpidité</i>	-	++	++	-	--	-	+	++	-	-

Tableau 3.5 : Optimisation de polymères anionique avec une concentration initiale de sédiments étudiés : 590 g/l sédiment de l'Angleterre et 1015g/l sédiment de la Belgique.

	<i>SF-Belgique</i>					<i>SF-Angleterre</i>				
<i>Concentration FAM 4351 kg/tonnes</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
<i>Teneur en eau (%)</i>	57	55	57	55	56	122	125	123	125	120
<i>limpidité</i>	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-
<i>Concentration FAM 4802 en kg/tonnes</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
<i>Teneur en eau (%)</i>	57	55	53	55	57	120	122	123	130	124
<i>limpidité</i>	-	-	+	+	--	-	+	+	-	-

Tableau 3.6 : Optimisation de polymères amphotères avec une concentration initiale de sédiments étudiés 590g/l sédiment de l'Angleterre et 1015g/l sédiment de la Belgique.

❖ Tassement des sédiments pendant 3 jours avec une concentration lors de la sortie de drague et concentration à 300g/l.

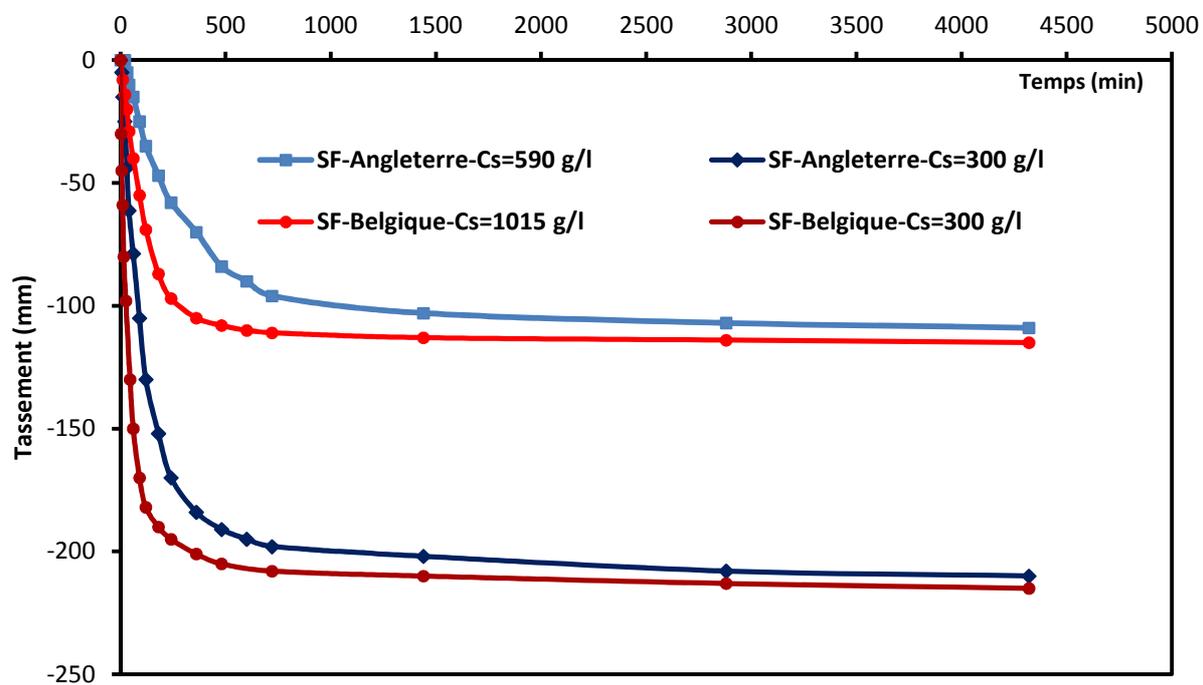


Figure 3.1 : Tassement des sédiments en différent concentrations.