

N° d'ordre : 41588

MINES DOUAI



UNIVERSITÉ LILLE 1



THESE DE DOCTORAT

Présentée en vue d'obtenir le grade de

DOCTEUR

En

Spécialité : Génie Civil & Environnemental

Par

Issameddine KHEZAMI

DOCTORAT DÉLIVRÉ CONJOINTEMENT
PAR MINES DOUAI ET L'UNIVERSITÉ LILLE 1

Approche expérimentale de valorisation des sédiments de dragage dans des applications de Génie Civil

Soutenance le **03 Décembre 2014** devant le jury d'examen :

Président	Arnaud GAUTHIER , Professeur, <i>Université Lille 1</i>
Rapporteur	Salima AGGOUN , HDR, <i>Université de Cergy-Pontoise</i>
Rapporteur	Michèle QUENEUDEC-T'KINT , Professeur, <i>Université de Picardie Jules Verne</i>
Examineur	Emmanuel GARBOLINO , HDR, <i>Mines ParisTech</i>
Directeur de thèse	Nor-Edine ABRIAK , Professeur, <i>Mines Douai</i>
Encadrant	Mahfoud BENZERZOUR , HDR, <i>Mines Douai</i>
Invité	Rachid ZENTAR , Professeur, <i>Mines Douai</i>
Invité	Pascal GREGOIRE , Docteur, <i>Port de Dunkerque</i>
Invité	Jésus CISNEROS AGUIRRE , Professeur, <i>Université de Las Palmas</i>

Laboratoire d'accueil : Département Génie Civil et Environnemental de Mines Douai
École Doctorale SPI 072 Lille I

REMERCIEMENTS

Ce travail de recherche a été réalisé au sein du Laboratoire Génie Civil et Environnemental du Centre de Recherche de Mines de Douai en collaboration avec l'Université de Lille 1.

Je tiens tout d'abord à exprimer ma gratitude à l'ensemble du membre du jury. Je remercie spécialement Madame Salima AGGOUN et Madame Michèle QUENEUDEC-T'KINT d'avoir accepté de rapporter mon travail.

Je voudrais exprimer ma profonde reconnaissance à Monsieur Nor-Edine ABRIAK qui fût un parfait directeur de thèse, toujours prêt à partager son savoir et ses qualités de scientifique. Son support et ses précieux conseils m'ont toujours redonné le courage dans les moments difficiles. Un grand merci pour sa présence et pour la confiance qu'il m'a accordée.

Je tiens également à adresser toute ma gratitude à Monsieur Mahfoud BENZERZOUR, pour la qualité de son encadrement, ses conseils précieux et son encouragement continu, mais aussi pour avoir mis à ma disposition tous les moyens nécessaires au bon déroulement de mes recherches et de mes essais. Il a en effet activement participé à faire de ce travail de recherche une réussite, aussi bien sur le plan professionnel qu'humain.

Je remercie Monsieur Jean DE ZELICOURT, chef du département Génie Civil et Environnemental de Mines de Douai, qui était toujours présent à notre écoute.

Je remercie chaleureusement toute l'équipe du département Génie Civil et Environnemental de Mines Douai : thésards, post-docs ou permanents : Merci à Jaja et Carole pour toutes leurs aides administratives et leur sympathie et gentillesse. J'en profite aussi pour remercier les techniciens du laboratoire : Johanna, Damien, Dominique, Christophe, Guillaume et Mickael qui étaient très coopératifs et m'ont aidé pour le bon déroulement des essais.

Mes remerciements iront ensuite à mes collègues de bureau, Raouf, Moussa, Thomas et Maxime, avec qui j'ai partagé d'excellents moments inoubliables.

Merci également à mes collègues les doctorants Hafid, Hassane, Sadok, Cyril, Coralie, Kai et Khadija et aux post doctorants Walid, Zengfeng, Wissem et Adolphe.

Je ne manque surtout pas d'adresser mes vifs remerciements à Monsieur Jean-Christophe REDON, responsable travaux publics à Lafarge qui était très coopératif et qui m'a fourni les liants hydrauliques nécessaires pour la réalisation de mes essais de laboratoire sans hésitation.

Mes remerciements s'adresseront ensuite au Fond Européen de Développement Régional (FEDER), Mines Douai, Lille Métropole Communauté Urbaine (LMCU) et ARMINES pour leurs soutiens financiers.

Enfin, j'exprime toute ma reconnaissance à mes chers parents Néji et Emna, mes adorables sœurs Nadhira, Amira et Imène et mon petit frère Mohamed-Dhia pour leur soutien assidu, leur grande affection et leur patience pendant toutes ces années.

Résumé :

La valorisation des sédiments de dragage est en plein essor depuis plusieurs années. Elle concerne principalement les sédiments marins et fluviaux. Ces sédiments présentent des caractéristiques physico-chimiques, minéralogiques et géotechniques particulière avec une hétérogénéité spéciale parfois importante et une contamination souvent problématique pour leur gestion. C'est la raison pour laquelle plusieurs travaux de recherche sont entamés afin de trouver des pistes de valorisation pérennes répondant aux exigences techniques et réglementaires.

L'objectif principal de ce travail de recherche est de prospector différentes filières potentielles de valorisation de sédiments fluviaux dans des applications de Génie civil. Compte tenu des préoccupations régionales, les applications : la technique routière, l'éco-modélé paysager et les matériaux à base cimentaires (coulis auto compactant, blocs béton et béton pour réservoirs de chaussée) ont été étudiées dans le cadre de cette thèse. Une des étapes clés de la démarche de valorisation est la maîtrise des caractéristiques intrinsèques des sédiments étudiés. Pour cela, une caractérisation détaillée et une fiche d'identité ont été élaborées pour chaque sédiment. À partir de cette caractérisation et en fonction des filières de valorisation envisagées, des traitements spécifiques et optimaux ont été mis en place et validés en laboratoire d'un point de vue mécanique et environnemental. Les résultats obtenus des phases de caractérisations et de formulations nous ont permis d'implémenter et de valider un outil mathématique d'aide à la décision développé au sein de notre laboratoire. Afin de conforter et valider notre démarche de valorisation, des planches expérimentales à échelle semi-industrielle ont été réalisées et suivies d'un point de vue mécanique et environnemental. Concernant les planches buttes paysagère et sous couches routière, une distinction entre les eaux ruisselées et percolées a été faite afin d'analyser le transfert des éléments chimiques des mélanges formulés dans le temps. Les résultats obtenus à travers ce travail de recherche démontrent le fort potentiel de valorisation des sédiments de dragage fluviaux dans différentes applications de Génie Civil.

Mots clés : sédiments de dragage, éco-modélé paysager, technique routière, planche expérimentale, matériaux à base cimentaire, suivi environnemental, outil d'aide à la décision.

Abstract:

The valorization of dredged sediments has been in full rise for several years. It mainly concerns the marine and river sediments. These sediments present particular physicochemical, mineralogical and geotechnical characteristics with a special heterogeneity and sometimes an important contamination that often limits their management. Consequently, many researches were carried out in order to find perennial ways of valorization satisfying the technical and regulatory requirements.

The main purpose of this research is to prospect various potential sectors of reuse of river sediments in Civil Engineering applications. Taking into account the regional concerns, the road application, the landscape mounds and the cement-based matrices (Self-consolidating grout, concrete blocks and concrete for tanks of roadway) were studied within the framework of this thesis. One of the key stages of the approach of valorization is the control of the intrinsic characteristics of the studied sediments. For that, a detailed characterization and a card of identity were prepared for each sediment. From this characterization and according to the considered fields of valorization, specific and optimal treatments were set up and validated in laboratory from a mechanical and environmental point of view. The results of characterization phases and formulations enabled us to implement and validate a mathematical decision-making tool developed within our laboratory. In order to consolidate and validate our approach of valorization, experimental boards on semi-industrial scale were carried out and monitored from a mechanical and environmental point of view. Concerning the landscape mounds' boards and road sub-bases, a distinction between streamed and percolated water was made in order to analyze the transfer of the chemical elements of the designed mixtures in time. The obtained results through this research demonstrate the high potential of the reuse of river dredged sediments in various applications of Civil Engineering.

Keywords: dredged sediments, landscape mound, road layer, experimental board, cement-based materials, environmental monitoring, decision-making tool

TABLE DES MATIERES

Introduction générale	1
Chapitre 1 ÉTATS DE CONNAISSANCE POUR LES SÉDIMENTS DE DRAGAGE	2
1.1. Introduction	4
1.1.1. Définition	4
1.1.2. Types de sédiments	5
1.1.3. Origine des sédiments	6
1.1.4. Composition	7
1.1.5. Granulométrie des sédiments	9
1.2. Dragage des sédiments :	11
1.2.1. Différence entre dragage et curage	11
1.2.2. Les principales raisons du curage	11
1.2.3. Les objectifs du curage	12
1.2.4. La quantité de sédiments de curage dans la région Nord-Pas De Calais	13
1.2.5. Précautions à prendre lors du curage des sédiments :	13
1.2.6. Le principal intervenant dans l'opération de curage	14
1.3. La pollution des cours d'eau	15
1.3.1. Origine	15
1.3.2. Les différents polluants existants dans les sédiments	15
1.4. Devenir des sédiments	19
1.4.1. Immersion et remise en suspension	20
1.4.2. Régalage	20
1.4.3. Traitement des produits de curage	20
1.4.4. Mise en dépôt	21
1.5. La classification des sédiments	23
1.5.1. Classification GTR	23
1.5.2. Classification USCS	24
1.5.3. Classification AASHTO	25
1.6. La réglementation et les lois relatives à la gestion et au curage des sédiments	27
1.6.1. Réglementation française	27
1.6.1.1. La qualité des sédiments et leur extraction	27
1.6.1.2. Lois propres à l'admission des déchets en décharge	29
1.6.1.3. Évaluation des propriétés de dangerosité d'un sédiment	34
1.6.1.4. Mode d'évaluation du critère d'écotoxicité H14	37
1.6.2. Réglementation Européenne	42

1.7. Voies de valorisation des sédiments dans le génie civil	43
1.7.1. Valorisation des sédiments dans la construction des routes	43
1.7.2. Valorisation des sédiments dans la fabrication des briques cuites	43
1.7.3. Valorisation des sédiments en éco-modelé paysager	44
1.7.4. Valorisation des sédiments en mortier et en béton	44
1.8. Conclusion	45
Chapitre 2 APPROCHE EXPÉRIMENTALE DE CARACTÉRISATION	47
1.9. Introduction	49
1.10. Sites de prélèvement des sédiments fluviaux LMCU	49
1.10.1. Bras des près du HEM (SH)	49
1.10.2. Bras de la Deûle (SD)	50
1.10.3. Branche de la Croix (SC)	50
1.11. Caractérisation des sédiments fluviaux LMCU	51
1.11.1. Caractérisation physique	51
1.11.2. Analyse minéralogique	65
1.11.3. Caractéristiques de portance et de compactage	68
1.11.4. Classification GTR	70
1.11.5. Impact environnemental	71
1.12. Conclusion	75
CHAPITRE 3 : VALORISATION DES SEDIMENTS DE DRAGAGE EN GENIE CIVIL	77
Filière 1 : APPLICATION ÉCO-MODELÉ PAYSAGER	79
3.1. Introduction	81
3.2. Les facteurs de stabilité	82
3.3. Règles de dimensionnement	83
3.4. Méthodes de suivi au laboratoire et in situ	84
3.5. Choix et dosage du mélange de l'éco-modelé paysager :	84
3.6. Étude mécanique des sédiments étudiés	85
3.6.1. Essai Proctor sur le mélange	85
3.6.2. Préconsolidation	86
3.6.3. Essai œdométrique	87
3.6.4. Essai de cisaillement direct	90
3.6.5. Essai triaxial : (NF P 94-070 et NF P 94-074)	92
3.7. Réalisation et suivi de la planche expérimentale	97
3.7.1. Introduction	97
3.7.2. Étapes de réalisation de la planche expérimentale :	98

3.7.3. <i>Suivi environnemental de la planche expérimentale</i>	100
3.8. Suivi des paramètres mécaniques et environnementaux d'un éco-modelé paysager à base de sédiments marins du GPMD	102
3.8.1. <i>Suivi mécanique</i>	102
3.8.2. <i>Suivi environnemental</i>	105
3.8.3. <i>Test de percolation</i>	110
3.9. Conclusion	117
Filière 2 : APPLICATION TECHNIQUE ROUTIERE	119
3.10. Introduction	121
3.11. Démarche de valorisation	122
3.11.1. <i>Liants hydrauliques</i>	122
3.11.2. <i>Chaux vive</i>	123
3.12. Composition des mélanges	124
3.12.1. <i>Choix des dosages</i>	124
3.12.2. <i>Essai d'aptitude des liants rajoutés</i>	127
3.13. Étude du comportement mécanique du mélange	128
3.13.1. <i>Essai Proctor Modifié - IPI</i>	128
3.13.2. <i>Performances mécaniques à long terme</i>	131
3.14. Etude et suivi d'une planche expérimentale à base de sédiments fluviaux	138
3.14.1. <i>Protocole de réalisation</i>	138
3.14.2. <i>Étude mécanique de la planche expérimentale</i>	140
3.14.3. <i>Étude environnementale en laboratoire et In situ</i>	142
3.15. Conclusion	143
Filière 3 PROSPECTION DE LA VALORISATION DES SEDIMENTS DANS DES APPLICATIONS A MATRICES CIMENAIRES	145
3.16. Introduction	147
3.17. Valorisation en blocs béton	147
3.17.1. <i>Caractérisation du sable et du gravier</i>	147
3.17.2. <i>Optimisation du squelette granulaire d'un mélange binaire à base de sable et de gravier</i>	148
3.17.3. <i>Formulations testées :</i>	151
3.18. Valorisation des sédiments fluviaux en béton réservoirs de chaussée (BRC)	153
3.18.1. <i>Démarche expérimentale de valorisation</i>	154
3.19. Étude d'un coulis de remplissage de tranché à base de sédiments de dragage et de cendres volantes	160
3.19.1. <i>Introduction</i>	160
3.19.2. <i>Matériaux</i>	160

3.19.3. <i>Étude mécanique des formulations réalisées</i>	161
3.19.4. <i>Étude environnementale sur des blocs de coulis</i>	166
3.20. Conclusion :	167

Chapitre 4 OPTIMISATION DE LA VALORISATION DES SEDIMENTS TECHNIQUE ROUTIERE	169
--	------------

4.1. Introduction	171
4.2. Outil de gestion	173
4.3. Données	174
4.3.1. <i>Données relatives au sédiment/matériau</i>	174
4.3.2. <i>Données relatives aux centres de traitement :</i>	176
4.3.3. <i>Données relatives à l'application</i>	176
4.4. Optimisation	177
4.4.1. <i>Modélisation mathématique</i>	177
4.4.2. <i>Contraintes générales</i>	177
4.4.3. <i>Contraintes environnementales</i>	178
4.4.4. <i>Contraintes mécaniques (granulométrie)</i>	179
4.4.5. <i>Contraintes sur matière organique</i>	179
4.4.6. <i>Contraintes économiques/objectif</i>	180
4.5. Présentation globale du modèle mathématique	180
4.6. Interprétation de la solution	181
4.7. Validation du modèle :	182
4.8. Conclusion	184

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	185
--	------------

Références Bibliographiques :	193
Normes utilisées :	200

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1.	Dénomination des classes granulaires des sédiments [3]	10
Tableau I.2.	Répartition des volumes à curer sur les voies d'eau en Nord-Pas de Calais [39]	13
Tableau I.3.	Liste des principaux métaux lourds et leurs provenances [Baize et Janiec 1994]	17
Tableau I.4.	Classes et sous-classes des matériaux selon l'USCS [10]	24
Tableau I.5.	Tableau de classification AASHTO pour les sols grossiers	26
Tableau I.6.	Tableau de classification AASHTO des sols limono-argileux	26
Tableau I.7.	Niveaux relatifs aux éléments et composés traces (en mg/kg MS analysé sur la fraction < à 2 mm)	28
Tableau I.8.	Rubrique 3.2.1.0 relative aux conditions pour lesquelles les travaux de curage sont soumis au régime de déclaration ou d'autorisation	29
Tableau I.9.	Rubrique 3.1.5.0 relative aux installations, ouvrages, dans le lit mineur d'un cours d'eau, étant de nature à détruire les frayères, les zones de croissance ou les zones d'alimentation	29
Tableau I.10.	Rubrique 3.1.2.0 relative aux installations, ouvrages, conduisant à modifier le profil en long ou le profil en travers d'un cours d'eau	29
Tableau I.11.	Valeurs limites de lixiviation pour les déchets inertes	30
Tableau I.12.	Valeurs limites pour les contaminants organiques	31
Tableau I.13.	Valeurs limites de lixiviation pour les déchets non dangereux	31
Tableau I.14.	Les valeurs limites de lixiviation pour les déchets dangereux	32
Tableau I.15.	Règlementations et référentiels applicables selon les filières de valorisation	33
Tableau I.16.	Batterie de bioessais composant le projet de 1998 de procédure H14 du ministère	38
Tableau I.17.	Les trois critères identifiés par VNF	39
Tableau II.1.	Quantité de sédiments prélevés	51
Tableau II.2.	Mesure de la teneur en eau des sédiments fluviaux	52
Tableau II.3.	Masse volumique réelle de quelques sols et constituants	53
Tableau II.4.	Masse volumique absolue	54
Tableau II.5.	Valeur du bleu pour les différents sédiments fluviaux	55
Tableau II.6.	Classification de l'argile d'un sol selon VBS	55
Tableau II.7.	Caractéristiques granulométriques des sédiments de dragage	58
Tableau II.8.	La limite de liquidité des sédiments étudiés	60
Tableau II.9.	Limite de plasticité des sédiments fluviaux	60
Tableau II.10.	Classification d'un sol selon son indice de plasticité	61
Tableau II.11.	Classification de la consistance des sédiments fluviaux étudiés	61
Tableau II.12.	Teneur en matière organique des sédiments	62
Tableau II.13.	Classification des sols par teneurs en matière organique	63
Tableau II.14.	Teneur en carbone total des sédiments Hem, Croix et Deûle	65
Tableau II.15.	Résultat de l'analyse semi - quantitative par fluorescence X exprimée en pourcentages massiques	67
Tableau II.16.	Résultats de l'essai Proctor modifié et l'indice de portance sur les sédiments	70
Tableau II.17.	Classification des sédiments selon leur argilosité et plasticité	71
Tableau II.18.	Senils de qualité S_1 pris pour les sédiments de cours d'eau ou de canaux	72
Tableau II.19.	Valeurs de lixiviation sur éluats pour l'admission en décharge (mg/kgsec)	73
Tableau II.20.	Valeurs de lixiviation sur le solide pour l'admission en décharge (mg/kgsec)	74
Tableau II.21.	Valeurs limites en lixiviation à respecter par 100% des échantillons (mg/kg Ms)	74
Tableau II.22.	Valeurs limites sur la matrice solide en (mg/kg Ms)	75
Tableau.III.1. 1.	Différents paramètres à suivre pour la stabilité d'une butte	84
Tableau.III.1. 2.	Compacités des mélanges de sédiments	85
Tableau.III.1. 3.	Résultats des essais œdométriques des sédiments utilisés	89
Tableau.III.1. 4.	Ordres de grandeur de l'indice de compression pour différents types de sols	89

Tableau.III.1. 5.	<i>Paramètres déterminés à la boîte de cisaillement pour les essais de cisaillement</i>	92
Tableau.III.1. 6.	<i>Résultats des analyses chimiques sur les eaux de ruissellement et de percolation de la planche expérimentale en (ug/l)</i>	101
Tableau.III.1. 7.	<i>Résultats de l'essai αdométrique sur le sédiment marin de Dunkerque</i>	104
Tableau.III.1. 8.	<i>Résultats de la résistance au cisaillement en fonction de la contrainte normale pour SGPM</i>	104
Tableau.III.1. 9.	<i>Analyse des eaux piézométriques au-dessus de la butte</i>	108
Tableau.III.1. 10.	<i>Analyse des eaux de ruissellement de la butte</i>	108
Tableau.III.1. 11.	<i>Essai de lixiviation d'un échantillon de carotte prélevée</i>	109
Tableau.III.1. 12.	<i>Coefficient de perméabilité du sédiment GPMD</i>	112
Tableau.III.2. 1.	<i>Composition de la formulation retenue</i>	122
Tableau.III.2. 2.	<i>Recommandations de dosage (Lafarge)</i>	122
Tableau.III.2. 3.	<i>Composition chimique du Rolac PI LH</i>	123
Tableau.III.2. 4.	<i>Compacité des mélanges bruts</i>	125
Tableau.III.2. 5.	<i>Composition des formulations réalisées au laboratoire</i>	126
Tableau.III.2. 6.	<i>Valeurs limites de référence pour évaluer l'aptitude d'un sol</i>	128
Tableau.III.2. 7.	<i>Résultats des essais de gonflement et de compression diamétrale</i>	128
Tableau.III.2. 8.	<i>Évolution de la densité et l'IPI du mélange traité</i>	130
Tableau.III.2. 9.	<i>Évolution de la densité et l'IPI du mélange traité</i>	137
Tableau.III.2. 10.	<i>Résultats des essais mécaniques sur des éprouvettes confectionnées au laboratoire et sur des échantillons carottés de la planche expérimentale</i>	141
Tableau.III.2. 11.	<i>Valeurs limites en lixiviation niveau I pour l'utilisation des sédiments en technique routière (guide Sétra, 2012)</i>	142
Tableau.III.3. 1.	<i>Résultats de l'optimisation granulaire sable de fonderie et gravats</i>	149
Tableau.III.3. 2.	<i>Résultats de l'optimisation granulaire sédiments et le sable de fonderie</i>	151
Tableau.III.3. 3.	<i>Dosage des formulations étudiées.</i>	152
Tableau.III.3. 4.	<i>Résultats de l'essai de compression des différentes formulations étudiées</i>	153
Tableau.III.3. 5.	<i>Composition des six formulations béton Hydrocyl à base de sédiment la Deûle</i>	156
Tableau.III.3. 6.	<i>Caractéristiques des liants hydrauliques utilisés dans l'étude</i>	161
Tableau.III.3. 7.	<i>Caractéristiques des fibres de polypropylène</i>	161
Tableau.III.3. 8.	<i>Composition des différentes formulations de l'étude</i>	162
Tableau.III.3. 9.	<i>Masse volumique absolue et apparente des différentes formulations</i>	162
Tableau.III.3. 10.	<i>Résultats de la mesure de l'IPI à 24 et 48h</i>	163
Tableau.III.3. 11.	<i>Résultats des essais d'affaissement sur les formulations de coulis</i>	164
Tableau.III.3. 12.	<i>Résultats des résistances à la compression simple des différentes formulations de coulis testés</i>	165
Tableau.III.3. 13.	<i>Résultats des essais de la résistance à l'immersion des coulis</i>	166
Tableau.III.3. 14.	<i>Résultats des analyses environnementaux</i>	167

LISTE DES FIGURES

Figure I.1.	Transport des sédiments	5
Figure I.2.	Quantités de sédiments dragués en France en 2010	6
Figure I.3.	Inondations dues à l'envasement d'un cours d'eau	7
Figure I.4.	Triangle de textures pour la classification des sols fins	11
Figure I.5.	Berges ébouleées après une opération de curage	12
Figure I.6.	Voies de gestion des sédiments	19
Figure I.1.	Schéma de gestion des sédiments fluviaux [39]	20
Figure I.2.	Principe du clapage	22
Figure I.3.	Bassin de stockage provisoire et non confiné des sédiments	22
Figure I.4.	Terrain de dépôt étanche	23
Figure I.5.	Tableau de classification GTR des matériaux selon leur nature	23
Figure I.6.	Tableau de classification USCS	25
Figure I.7.	Schéma simplifié du protocole de caractérisation des sédiments selon leurs indices de risque	40
Figure I.8.	Protocole V.N.F pour la mesure du paramètre H14	41
Figure II.1.	Site de prélèvement des sédiments fluviaux du bras des près du HEM	49
Figure II.2.	Site de prélèvement des sédiments fluviaux du bras de la Deûle	50
Figure II.3.	Site de prélèvement des sédiments fluviaux de la branche de la Croix	51
Figure II.4.	Composition générale d'un sol donné	53
Figure II.5.	Classification des sédiments en fonction de VBS	55
Figure II.6.	Courbes granulométriques des sédiments fluviaux étudiés	57
Figure II.7.	Classification granulométrique des sédiments	58
Figure II.8.	Les états de consistance d'un sol	59
Figure II.9.	Classification des sédiments en fonction des limites d'Atterberg	62
Figure II.10.	Courbe thermogravimétrique du sédiment de la Deûle	64
Figure II.11.	Courbe thermogravimétrique du sédiment du HEM	64
Figure II.12.	Courbe thermogravimétrique du sédiment de Croix	64
Figure II.13.	Phases cristallines des sédiments étudiés	66
Figure II.14.	Courbes de compactage des sédiments utilisés	69
Figure II.15.	Courbes de portance (IPI) des sédiments fluviaux étudiés	69
Figure II.16.	Classification des sédiments selon GTR, 1992	71
Figure.III. 1. 1	Les éco-modèles paysagers de Dunkerque réalisés avec des sédiments marins	82
Figure.III. 1. 2	Courbe de Proctor normal réalisé sur le mélange des deux sédiments fluviaux	86
Figure.III. 1. 3	Préconsolidation et préparation des échantillons	87
Figure.III. 1. 4	(a) Courbe œdométrique du sédiment SD ; (b) Courbe œdométrique du sédiment SC	88
Figure.III. 1. 5	Courbe œdométrique du mélange	89
Figure.III. 1. 6	Courbe de cisaillement du sédiment de la croix	90
Figure.III. 1. 7	Courbe de cisaillement du sédiment de la Deûle SD	91
Figure.III. 1. 8	Courbe de cisaillement du mélange des deux sédiments	91
Figure.III. 1. 9	Dispositif expérimental pour l'essai triaxial	93
Figure.III. 1. 10	Mise en place de la cellule pour l'essai triaxial	94
Figure.III. 1. 11	Relation entre le déviateur q et la déformation axiale ε_a pour le mélange des deux sédiments	95
Figure.III. 1. 12	Relation entre le déviateur contrainte u et la déformation axiale ε_a pour le mélange des 2 sédiments	96
Figure.III. 1. 13	Evolution des déformations radiales en fonction des déformations axiales	96
Figure.III. 1. 14	Echantillon après cisaillement (CD)	97
Figure.III. 1. 15	Prototype d'éco-modèle paysager	98

Figure.III. 1. 16	<i>Schéma représentatif de la planche support</i>	98
Figure.III. 1. 17	<i>Mise en place du cadre de la planche</i>	99
Figure.III. 1. 18	<i>Mise en place et compactage du mélange des sédiments</i>	99
Figure.III. 1. 19	<i>Installations des conduites des eaux de ruissellement et de percolation</i>	100
Figure.III. 1. 20	<i>Pluviométrie moyenne à Lille en 2013</i>	100
Figure.III. 1. 21	<i>Arrosage de la planche expérimentale</i>	101
Figure.III. 1. 22	<i>Prélèvement des carottes</i>	102
Figure.III. 1. 23	<i>Préparation de la carotte prélevée pour la réalisation de l'essai œdométrique</i>	103
Figure.III. 1. 24	<i>Courbe œdométrique du sédiment marin du GPMD</i>	103
Figure.III. 1. 25	<i>Courbe de cisaillement du sédiment SGPMMD</i>	104
Figure.III. 1. 26	<i>Contexte Suivi environnemental de l'éco-modèle paysager</i>	105
Figure.III. 1. 27	<i>Plan de réalisation des piézomètres</i>	106
Figure.III. 1. 28	<i>Système manuel Waterra de pompage</i>	107
Figure.III. 1. 29	<i>Protocole de suivi des eaux de percolation et de ruissellement de l'éco-modèle paysager</i>	107
Figure.III. 1. 30	<i>Principe de l'essai de percolation</i>	110
Figure.III. 1. 31	<i>Dispositif de l'essai de percolation</i>	111
Figure.III. 1. 32	<i>Volume total cumulé en fonction du temps.</i>	113
Figure.III. 1. 33	<i>Résultats du test de percolation pour As et Ba.</i>	114
Figure.III. 1. 34	<i>Résultats du test de percolation pour le Ni et le Se</i>	115
Figure.III. 1. 35	<i>Résultats du test de percolation pour les sulfates et les chlorures</i>	116
Figure.III. 2. 1	<i>Méthodologie pour la valorisation des sédiments de dragage</i>	121
Figure.III. 2. 2	<i>Essai réactivité à la chaux vive</i>	124
Figure.III. 2. 3	<i>Composition globale des mélanges</i>	126
Figure.III. 2. 4	<i>Distribution granulométrique du mélange retenu</i>	127
Figure.III. 2. 5	<i>Courbes Proctor du mélange brut et traité</i>	129
Figure.III. 2. 6	<i>Courbes IPI du mélange brut et traité</i>	129
Figure.III. 2. 7	<i>Choix des couches de chaussée en fonction de la valeur d'IPI</i>	130
Figure.III. 2. 8	<i>Abaque de classification des matériaux routiers à 360 jours</i>	131
Figure.III. 2. 9	<i>Dispositif de l'essai de compression simple</i>	132
Figure.III. 2. 10	<i>Résultats de l'essai de compression simple à 7, 28, 60 et 90 jours</i>	133
Figure.III. 2. 11	<i>Dispositif de mesure de module d'élasticité Ec</i>	134
Figure.III. 2. 12	<i>Mesure du module d'élasticité à 28, 60 et 90 jours</i>	134
Figure.III. 2. 13	<i>Protocole de réalisation de l'essai de compression diamétrale</i>	136
Figure.III. 2. 14	<i>Résultats de l'essai de compression diamétrale.</i>	136
Figure.III. 2. 15	<i>Classification de la formulation à base des sédiments fluviaux</i>	137
Figure.III. 2. 16	<i>Étapes de réalisation de la planche expérimentale</i>	139
Figure.III. 2. 17	<i>Campagne de carottage de la planche expérimentale de la route</i>	139
Figure.III. 2. 18	<i>Réalisation de l'essai de compression sur la carotte prélevée de la planche expérimentale</i>	140
Figure.III. 2. 19	<i>Classification du matériau routier traité avec le liant hydraulique ROLAC IP LH</i>	141
Figure.III. 3. 1	<i>Courbe granulométrique du sable et du gravier utilisés dans l'étude</i>	148
Figure.III. 3. 2	<i>Méthodologie du Modèle d'Empilement Compressible [56]</i>	148
Figure.III. 3. 3	<i>Résultats de l'optimisation granulaire sable – gravier</i>	150
Figure.III. 3. 4	<i>Résultats de l'optimisation granulaire sable – sédiments</i>	151
Figure.III. 3. 5	<i>Les blocs de béton après démoulage</i>	152
Figure.III. 3. 6	<i>Structure chassée réservoir en béton</i>	154
Figure.III. 3. 7	<i>Granulats utilisés pour la confection des éprouvettes BRC</i>	155
Figure.III. 3. 8	<i>Confection des éprouvettes Hydrocyl en vibro-compression</i>	156
Figure.III. 3. 9	<i>Éprouvettes à base de sédiments fluviaux</i>	157
Figure.III. 3. 10	<i>Evolution de la masse volumique en fonction du taux de substitution</i>	158
Figure.III. 3. 11	<i>Essai de compression sur un BRC</i>	158

<i>Figure.III. 3. 12</i>	<i>Evolution de la résistance à la compression en fonction du taux de substitution</i>	<i>159</i>
<i>Figure.III. 3. 13</i>	<i>Essai d'affaissement sur coulis</i>	<i>163</i>
<i>Figure.III. 3. 14</i>	<i>Essai de compression simple sur des éprouvettes de coulis (11x22) cm</i>	<i>164</i>
<i>Figure.III. 3. 15</i>	<i>Évolution des résistances à la compression simple des différentes formulations de coulis testés</i>	<i>165</i>
<i>Figure.III. 3. 16</i>	<i>Mise en place des dispositifs d'essai de lixiviation des blocs de coulis</i>	<i>166</i>
<i>Figure.IV. 1</i>	<i>Processus de valorisation</i>	<i>172</i>
<i>Figure.IV. 2</i>	<i>Composantes du logiciel [4]</i>	<i>173</i>
<i>Figure.IV. 3</i>	<i>Fiche de sédiment/matériau [4]</i>	<i>176</i>
<i>Figure.IV. 4</i>	<i>Solution du modèle</i>	<i>182</i>
<i>Figure.IV. 5</i>	<i>Classification des sédiments via le logiciel selon le GTR</i>	<i>183</i>
<i>Figure.IV. 6</i>	<i>Comparaison entre les résultats expérimentaux et ceux du modèle pour la valorisation en route</i>	<i>184</i>

LISTE DES ABRÉVIATIONS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ADEME	Agence française De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
ATG	Analyse Thermogravimétrique
CETMEF	Centre d'Études Techniques Maritimes Et Fluviales
CFTR	Comité Français pour les Techniques Routières
CNR	Compagnie Nationale du Rhône
COT	Carbone Organique Total
DCE	Directive Cadre sur l'Eau
DPF	Domaine Public Fluvial
DRIRE	Direction Régionale de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement
EDF	Électricité De France
EP	Eau de Percolation
ER	Eau de Ruissellement
FX	Fluorescence aux rayons X
GPMD	Grand Port Maritime de Dunkerque
GTR	Guide de Terrassements Routiers
GTS	Guide Techniques de traitement des Sols à la chaux et aux liants hydrauliques
HAP	Hydrocarbure Aromatique Polycyclique
ICPE	Installations Classées pour la Protection de l'Environnement
INERIS	L'Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques
IPI	Indice de Portance Immédiat
IRSTEA	Institut de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture
ISDD	Installation de Stockage de Déchets Dangereux
ISDI	Installation de Stockage des Déchets Inertes
ISDND	Installation de Stockage des Déchets Non Dangereux
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
LMCU	Lille Métropole Communauté Urbaine
MEDDE	Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie
MEEDDM	Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de la Mer
MES	Matières En Suspension
MO	Matière Organique
OPN	Optimum Proctor Normal
PAF	Perte Au Feu
PCB	Polychlorobiphényle
POP	Polluant Organique Persistant

SC	Sédiment de la Croix
SD	Sédiment de la Deûle
SDDE	Schémas Directeurs des Données sur l'Eau
SF	Sédiments Fluviaux
SGPMD	Sédiment marin du Grand Port Maritime de Dunkerque
SH	Sédiment du Hem
SM	Sédiment Marin
UNPG	l'Union Nationale des Producteurs de Granulats
USCS	Unified Soil Classification System
VBS	Valeur au bleu de méthylène
VNF	Voies Navigables de France

GLOSSAIRE

L	Longueur
S	Surface
QSm	Indice de risque
C _i	Concentration d'un polluant <i>i</i> dans les sédiments
S _i	Valeur seuil d'un polluant <i>i</i>
W	Teneur en eau d'un sédiment
m _h	Masse humide
m _s	Masse sèche
V _t	Volume total de l'élément considéré
V _s	Volume des particules solides
V _l	Volume de la phase liquide
V _g	Volume de la phase gazeuse
V _v	Volume des vides
M _t	Masse totale de l'élément considéré
M _s	Masse de la phase solide
M _l	Masse de la phase liquide
M _g	Masse de la phase gazeuse
ρ _s	masse volumique des grains solides
B	Masse de bleu introduite (solution à 10 g/l)
m ₀	Masse sèche de la prise d'essai
C _c	coefficient de courbure
C _u	facteur d'uniformité
D _X	dimension du tamis correspondant à X% de passant
W _L	Limite de liquidité
W _P	limite de plasticité
I _P	Indice de plasticité
W _{OPN}	Teneur en eau à l'Optimum Proctor Normal
W _{opm}	Teneur en eau à l'Optimum Proctor Modifié
γ _{d-OPN}	Poids volumique sec à l'Optimum Proctor Normal
γ _{d-pom}	Poids volumique sec à l'Optimum Proctor Modifié
γ _d	Masse volumique sèche
γ _s	Masse volumique des grains solides
γ _w	Masse volumique de l'eau
C _v	Coefficient de consolidation
T _v	Facteur de temps
H	Épaisseur de l'échantillon
C _s	indice de recompression

C_c	indice de compression
C_c	Coefficient de courbure
Δe	Variation de l'indice des vides
e	Indice des vides
e_0	Indice des vides initial
σ'_p	Contrainte de préconsolidation
τ	contrainte de cisaillement
σ	contrainte normale
$\Phi (\phi)$	Angle de frottement
C'	Cohésion
ϕ'	Angle frottement effectif
τ_f	Résistance au cisaillement
Q	Débit
K	conductivité
Δh	différence de charge hydraulique
k	Coefficient de perméabilité
$V_w (t)$	Volume d'eau traversant l'éprouvette au cours du temps
R_c	Essai de compression
R_t	Essai de traction
E	Module d'élasticité
R_{tb}	Essai de compression diamétrale
Fr	Effort maximal supporté par l'éprouvette
S_s	Nombre des unités du matériau s utilisé dans la formulation
S	Quantité totale des matériaux nobles utilisés
T_t	variable binaire
q_i^j	quantité de l'élément polluant j dans le sédiment i
Q^j	Quantité limite autorisée associée à l'élément j
δ_{ti}^j	pourcentage de réduction de la concentration du polluant j quand le traitement t est appliqué sur le sédiment i
q_i^{MO}	Quantité de la matière organique dans une unité de sédiment i
δ_{ti}^{MO}	Pourcentage de réduction de la matière organique dans le sédiment i après l'application du traitement t
Q^{MO}	Limite acceptable pour l'usage routier

Introduction générale

1. Contexte

L'accumulation des sédiments dans les milieux marins, les cours d'eau et les canaux et leur pollution éventuelle est une problématique majeure au niveau régional, national et international pour les gestionnaires des voies d'eau. Cette problématique est souvent accentuée par l'activité humaine [1]. Par conséquent ces milieux récepteurs ne peuvent plus fonctionner correctement à cause de la réduction des capacités d'écoulement [2]. Pour faire face à ce problème, des opérations de dragage et d'entretien sont réalisées régulièrement pour prévenir les risques d'inondation, rétablir le tirant d'eau pour la navigation et restaurer le milieu naturel. [3].

Il est donc primordial de trouver des voies de valorisation de ces volumes importants de sédiments tout en respectant les réglementations et directives fixant leur potentiel de réutilisation et de gestion. De plus, la forte consommation en matières premières dans le domaine du Génie Civil (En France, 7 tonnes /an / citoyen selon l'Union Nationale des Producteurs de Granulats UNPG) et la difficulté d'accès à des nouvelles sources naturelles poussent les décideurs et la communauté scientifique à trouver des sources alternatives d'approvisionnement.

Dans ce contexte, plusieurs travaux de recherches ont fait l'objet de valorisation en Génie Civil, tels que les projets Européens [PRISMA, 2014], [SETARMS, 2014], [SMOCS, 2012], [DREDGDIKE, 2013] et des projets nationaux tels que [GPMD, 2014], [SEDIMATERLAUX, 2010], [LMCU, 2014]...etc. Une des applications les plus avancées d'un point de vue expérimental est l'application routière [1] ; [4] ; [5] ; [6] ; [7] ; [8] ; [9] ; [10] ; [11] ; [12] ; [78]. On peut citer également d'autres applications telles que les granulats [13] ; [14] ; [77], la fabrication de briques [15] ; [16] ; [17], les matériaux à base cimentaires [14] ; [18] ; [19] ; [20] et plein d'autres applications [87] ; [88].

2. Objectif

L'objectif de ce travail de thèse est d'étudier, par une approche expérimentale, le potentiel de valorisation des sédiments de dragage dans des applications Génie Civil ciblées rentrant dans le cadre de problématique et préoccupations régionales. Ce travail s'est fait en collaboration avec Lille Métropole Communauté Urbaine « LMCU » qui a pour objectif de prospecter les filières de valorisations : éco-modèle paysager, application routière et matériaux à base cimentaire pour la gestion de leurs sédiments. Cette valorisation passe par une étude précise des caractéristiques intrinsèques des sédiments étudiés. Enfin, notre objectif à travers les études

bibliographiques, de caractérisation et de formulations est l'implémentation et l'utilisation d'un logiciel d'aide à la décision développé et orienté sur la valorisation des sédiments de dragage.

- **Valorisation en éco-modelé paysager**

Concernant l'application éco-modelé paysager, nous présentons dans un premier temps les possibilités d'utilisation de sédiments seuls ou de mélanges de différents sédiments fluviaux et l'évaluation de leurs comportements mécaniques et environnementaux. Les formulations à base de mélanges de sédiments se sont avérées les plus pertinentes. Nous avons ainsi réalisé une planche expérimentale à base de mélanges optimisés de sédiments que nous avons suivie mécaniquement et environnementalement. Afin de valider notre approche et compte tenu de l'inexistence de données accessibles sur des buttes paysagères à base de sédiments fluviaux, nous avons réalisé un suivi mécanique et environnemental d'un éco-modelé paysager à base de sédiments marins déjà existant au GPMD. Nous avons ainsi procédé à l'analyse d'échantillons carottés. Le suivi environnemental a été également exploré à travers la pose de piézomètres en haut et en bas de la butte pour mesurer le relargage des éléments chimiques vers le milieu récepteur.

- **Valorisation en technique routière**

Pour la valorisation des sédiments fluviaux en technique routière, la démarche de travail a été établie en respectant une méthodologie générale de valorisation, reproductible sur le plan industriel et intéressante d'un point de vue économique. Sur la base de cette démarche, des mélanges ont été développés et traités aux liants hydrauliques et par renfort granulaire pour répondre aux conditions d'utilisation en technique routière sur le plan mécanique. L'impact sur l'environnement de ces mélanges a été également exploré à travers des tests de lixiviation.

- **Valorisation en matériaux à base cimentaire**

Cette thématique a été développée à travers une étude de prospection de faisabilité de matériaux à base cimentaire. Trois pistes de faisabilité ont été abordées : Les coulis auto-compactants, les blocs de béton et les structures réservoirs de chaussée. En fonction des propriétés physiques, minéralogiques et mécaniques du sédiment, les proportions des mélanges ont été optimisées pour une incorporation maximale de sédiments tout en respectant les exigences et les contraintes réglementaires.

3. Structure de la thèse

La démarche mise en place pour répondre à cet objectif est présentée dans ce rapport de thèse sous forme de quatre chapitres :

Le premier chapitre définit la problématique liée au dragage et à la mise en dépôt des sédiments, ainsi que les différentes lois et réglementations, souvent contraignantes, régissant leur valorisation. Dans ce chapitre, sont présentées également les différentes méthodes de gestion et de traitement des sédiments inertes ou pollués.

Une étude globale de caractérisation physique, minéralogique, chimique et mécanique sur des sédiments fluviaux bruts provenant des bras du Hem, de la Deûle et de la branche de la Croix rentrant dans le cadre du projet « LMCU » est décrite **au chapitre 2**. Cette caractérisation nous a permis d'évaluer le potentiel de valorisation de ces sédiments avant traitement et d'établir une classification géotechnique et environnementale de ces derniers.

Le **troisième chapitre**, est consacré à la présentation de notre démarche de valorisation pour les trois filières identifiées à savoir : la filière éco-modèle paysager, l'application routière et les matériaux à base cimentaire. Les résultats expérimentaux réalisés en laboratoire et sur des planches expérimentales y sont également présentés.

Dans Le **quatrième chapitre**, nous avons étudié le problème d'optimisation de la valorisation des sédiments principalement en technique routière. Un outil, développé préalablement en interne par notre équipe de recherche [4] a été implémenté et validé pour cette application. Le problème consiste à la fois en la gestion environnementale et mécanique des formulations à base de sédiments afin de les utiliser dans la construction routière. Le problème rencontré est modélisé sous forme d'un modèle mathématique non linéaire avec variables mixtes. Les résultats obtenus en laboratoire et par le modèle mathématique ont été comparés afin de valider l'outil.

Cette thèse est clôturée par une conclusion générale des travaux de valorisation étudiés et par des propositions de perspectives de recherche.

Chapitre 1

ÉTATS DE CONNAISSANCE POUR LES SÉDIMENTS DE DRAGAGE

1.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons le contexte général lié à la valorisation des sédiments à travers la définition des sédiments de dragage et leurs propriétés, la définition du cadre réglementaire et législatif qui fixe leurs gestions et pour terminer, nous aborderons les différentes procédures de traitement.

Les sédiments

1.1.1. Définition

Les sédiments d'une façon générale sont des matériaux solides, qui, transportés par le tirant d'eau, finissent par décanter sur le fond. Ils sont issus principalement de l'érosion du bassin versant, des berges, du ruissellement sur les surfaces imperméabilisées et des rejets industriels et humains. [21]. Chaque année des volumes importants de sédiments et de sables de dragage (600Mm³[86]) sont dragués et transportés pour maintenir l'accès et le bon fonctionnement des ports et des cours d'eau.

Les ports et les cours d'eau sont donc des milieux privilégiés pour le dépôt et l'accumulation des particules fines dites sédiments. Ces sédiments sont transportés par charriage ou remis en suspension [22] et se caractérisent essentiellement par leurs granulométries, leurs compositions minérales, ainsi que leurs teneurs en eau et en matière organique [23]. La taille et la nature des sédiments dépendent généralement des conditions hydrologiques et géologiques rencontrées au cours du transfert.

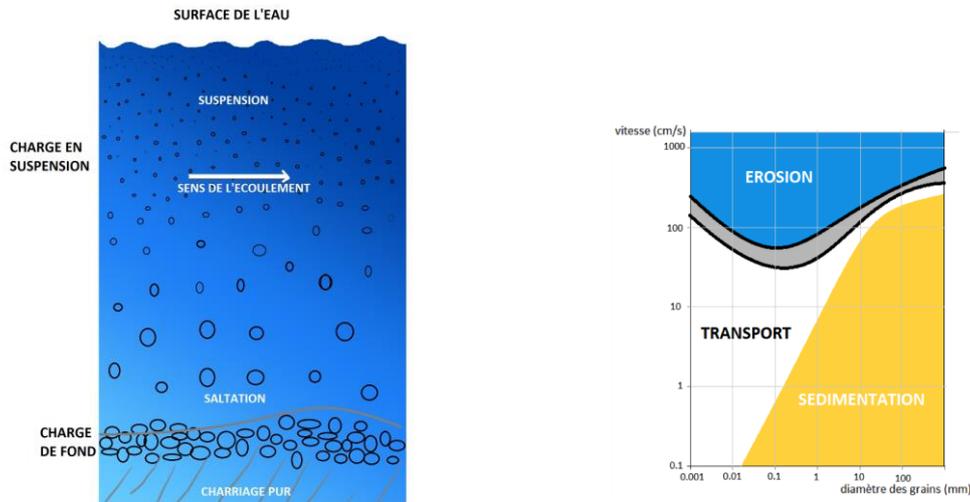


Figure I.1. Transport des sédiments

1.1.2. Types de sédiments

La sédimentation à long terme a un effet sur le profil des cours d'eau à cause des dépôts qui les comblent. Ces dépôts ne sont pas uniformes et se concentrent dans les zones de faible courant, permettant aux matières en suspension (MES) de décanter [24]. Ces zones sont aussi caractérisées par une topographie plane, de faibles débits ainsi que par des rejets industriels et urbains. On peut classer les sédiments selon leur provenance en deux types :

1.1.2.1. Sédiments fluviaux

En France, le réseau fluvial compte plus de 525.000 km de cours d'eau. Le Domaine Public Fluvial (DPF) comprend environ 18.000 km de voies d'eau dont 8.500 km (47% du réseau total) considérés comme navigables [25].

En ce qui concerne les besoins annuels en curage d'entretien, ils sont évalués à 9 millions de m³. Dans la pratique, en moyenne 6 millions de m³ de sédiments (dont environ 1,6 millions de m³ provenant du domanial) sont extraits des 525.000 km de cours d'eau lors de leur simple entretien. Le déficit annuel en curage d'entretien en France est donc de l'ordre de 3 millions de m³ et concerne majoritairement les cours d'eau non navigables [26] ; [27] ; [28]. Les opérations d'entretien et de curage de ces voies d'eau sont confiées :

- ▶ aux Voies Navigables de France (VNF) pour les cours d'eau navigables : 26% ;

- à la Compagnie Nationale du Rhône (CNR) : 46% ;
- aux ports autonomes fluviaux : 2% ;
- aux collectivités : 18% ;
- à Électricité De France (EDF) : 6% ;
- à l'État : 2%.

1.1.2.2. *Sédiments marins*

Selon les enquêtes et statistiques réalisées par le centre d'études techniques maritimes et fluviales (CETMEF), la quantité de sédiments marins dragués en France en 2010 représente un total de 18,6 millions de tonnes de matières sèches, soit une diminution de 44 % par rapport à celle enregistrée en 2009 qui était de 33,56 millions de tonnes (une différence due principalement aux travaux qui ont eu lieu en 2009 dans les grands ports maritimes du Havre et de Marseille et non renouvelés en 2010). [29].

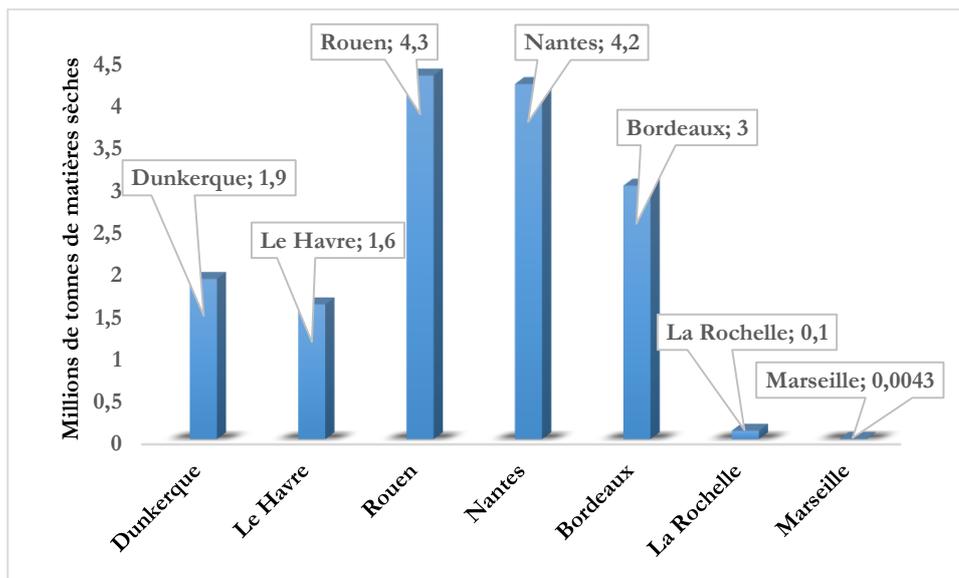


Figure I.2. Quantités de sédiments dragués en France en 2010

Les sédiments marins sont issus principalement des 7 grands ports maritimes de France notamment les ports de Dunkerque, Le Havre, Rouen, Nantes, La Rochelle, Bordeaux et Marseille qui représentent à eux seuls 15,2 millions de tonnes de sédiments dragués soit 82% du total dragué. [29].

1.1.3. *Origine des sédiments*

L'origine des sédiments fluviaux se trouve dans le dépôt de particules solides, minérales et organiques sur le lit du cours d'eau. Celles-ci sont transportées, par charriage, en suspension ou par ruissellement, pour se déposer au fond dès que le débit du cours d'eau faiblit. La caractérisation physico-chimique des sédiments est primordiale pour la compréhension des phénomènes de sédimentation et de transport des sédiments, ainsi que pour déterminer leurs origines [22]. On constate généralement deux principales origines :

- ▶ *l'origine endogène (ou autochtone)* : Elle provient de la production autochtone du milieu. Cette production engendre des débris de macrophytes (plantes aquatiques, cadavres de microphytes et d'animaux) ;
- ▶ *l'origine exogène (ou allochtone)* : Suite à un apport de matières venant d'un autre milieu à travers le ruissellement des fleuves, les effluents ou l'atmosphère. Cet apport peut être d'origine naturelle (érosion des sols, décomposition de la matière végétale), ou anthropique (apports de matières en suspension, de matières organiques, de nutriments ou de micropolluants en raison des rejets agricoles, industriels et domestiques) [3].

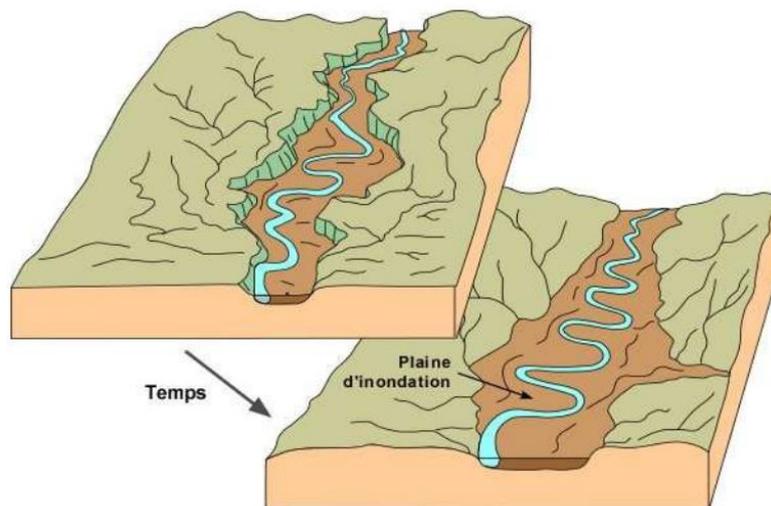


Figure I.3. Inondations dues à l'ensablement d'un cours d'eau

1.1.4. Composition

Le sédiment est une matrice relativement hétérogène constituée d'eau et de matériaux inorganiques et organiques [30]. Les composés inorganiques sont les argiles, les carbonates et les silicates dont la taille varie de 0,1 μm jusqu'à plusieurs mm [31]. L'activité humaine peut influencer cette composition naturelle.

1.1.4.1. L'eau contenue dans les sédiments

Il faut distinguer la quantité d'eau au-dessus du sédiment et celle de l'eau interstitielle dans celui-ci. L'eau interstitielle peut être découpée en quatre catégories [32] :

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

1.1.4.2. La composition minérale

La composition minérale des sédiments diffère selon leur provenance [3] :

- *Les blocs, les cailloux, les graviers et les sables* : Ce sont des particules grossières issues de l'érosion du sol et considérées comme terrigènes. Leur nature chimique dépend essentiellement des terrains érodés ;
- *Les sables quartzeux (silice SiO₂) ou silicatés* : Ils sont souvent accompagnés de minéraux lourds (amphiboles, grenats, disthène...) qui dépendent de la nature des sols érodés. On trouve aussi des sables calcaires ;
- *Les limons, vases et boues* : Ce sont les particules les plus fines, composées de minéraux argileux d'origine terrigène, et aussi des squelettes d'organismes d'origine endogène. Ces particules fines captent plus les contaminants que les particules grossières.

1.1.4.3. La teneur en matière organique (M.O)

Le terme « matière organique » définit la somme hétérogène de substances et composés carbonés d'origines végétale et animale sous forme de débris en cours de décomposition issus de la végétation et qui constituent la litière du sol. Elle est essentiellement localisée dans l'horizon superficiel du sol (0-20 cm) [33].

La M.O se décompose rapidement dans l'eau, ce qui donne lieu à des mauvaises odeurs et épuise l'oxygène dissous dans l'eau qui est nécessaire à leur décomposition et indispensable à la vie aquatique. Ceci affecte la biodiversité de l'eau en détruisant les habitats, les micro-organismes et les éléments vivants [34].

On peut distinguer quatre types de M.O :

- Matière organique vivante (biomasse active) ;

- Matière organique fraîche sous forme de débris végétaux et cadavres ;
- Composés en cours d'évolution ;
- Composés humiques.

Généralement, la teneur en matière organique dans la matière sèche des sédiments varie entre 2% pour les sables de rivière et plus de 90% pour la vase et la tourbe. [76]

1.1.4.4. *Composition argileuse :*

La partie argileuse qu'on trouve dans les sédiments présente une structure cristalline en feuillets permettant leur hydratation avec parfois un phénomène de gonflement très important [35]. Les argiles ont un comportement plastique vu qu'elles ont tendance à retrouver leur état initial au repos à cause de la souplesse entre les feuillets. À l'état liquide, elles perdent leur rigidité lorsqu'elles subissent une sollicitation mécanique. Il faut aussi prendre en considération que les argiles ont une forte interaction avec les contaminants notamment avec les métaux lourds : c'est le phénomène d'adsorption. Les sédiments fins ont ainsi la particularité de capter, retenir et accumuler les contaminants.

Parmi les multiples variétés d'argiles, il y en a 3 qui sont connues et trouvées fréquemment dans les sédiments [36] :

- ***La Kaolinite*** : Elle se trouve dans les roches argileuses, comme le kaolin, ou dans les roches magmatiques et se compose de plusieurs couches de feuillets de silice et d'alumine. Les argiles kaoliniques se caractérisent par une plasticité relativement faible mais qui sèchent rapidement et sans problème grâce à leur forte porosité à sec.
- ***L'illite*** : C'est un minéral argileux non gonflant qu'on trouve dans les sédiments, les sols et les roches argileuses sédimentaires ainsi que dans certaines roches métamorphiques. En règle générale, l'illite ne présente pas de problème de séchage et a une bonne résistance mécanique à la flexion à l'état sec.
- ***La smectite*** : Les smectites ont un caractère gonflant et leur présence dans les sols peut déclencher des glissements de terrain catastrophiques en période de fortes crues. En revanche, sa résistance mécanique à sec est importante.

1.1.5. *Granulométrie des sédiments*

Les sédiments fluviaux issus des canaux et des cours d'eau se composent généralement par des éléments et des particules fines contrairement aux sédiments marins qui peuvent

comporter plusieurs classes granulométriques. Le Tableau I.1 décrit les différentes classes de sédiments en fonction des dimensions de leurs particules :

Taille	Dénomination
> 20 cm	Blocs
2 cm à 20 cm	Galets et cailloux
2 mm à 2 cm	Graviers
63 μm à 2 mm	Sables (grossiers et fins)
2 μm à 63 μm	Limons (ou silt)
< 2 μm	Vases, boues argileuses

Tableau I.1. Dénomination des classes granulaires des sédiments [3]

Les particules d'un diamètre supérieur à 63 μm caractérisent les sédiments grossiers qui sont principalement constitués de sable et de matériel inorganique silicaté. Ces sédiments présentent une faible cohésion, les surfaces de contact des différentes particules sont peu importantes et donc sont peu associées aux contaminants. On distingue généralement les graviers (diamètre supérieur à 2 mm) et les sables (diamètre compris entre 63 μm et 2 mm).

Les particules dont le diamètre est inférieur à 63 μm sont constituées de minéraux argileux ayant un diamètre compris entre 0,2 et 2 μm et de silt ayant un diamètre compris entre 2 μm et 63 μm . Cette fraction fine peut contenir de la matière organique mais également les polluants et les contaminants [2].

Pour classer la partie fine des sédiments (diamètre inférieur à 2 mm), on utilise généralement le triangle des textures qui est sous forme de diagramme triangulaire particulièrement adapté à la classification des sédiments selon la taille et le pourcentage de chaque fraction. Il est représenté sur la Figure I.4.

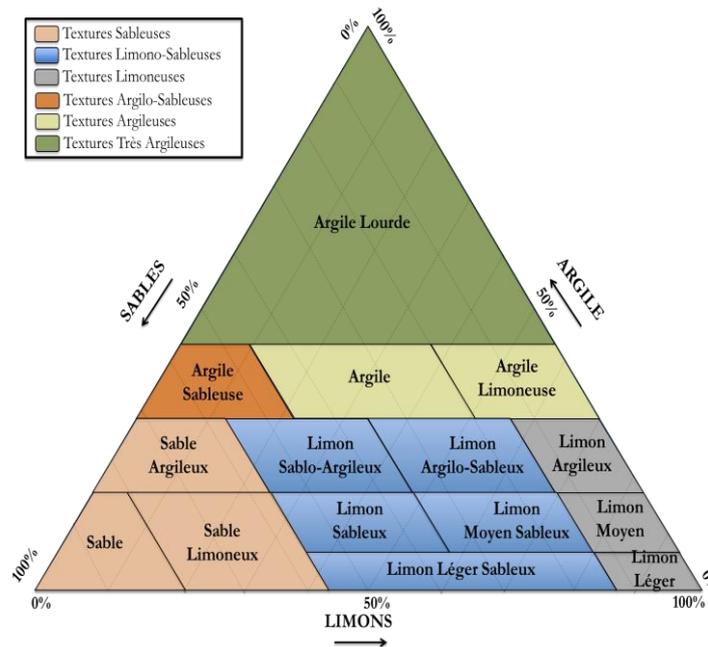


Figure I.4. Triangle de textures pour la classification des sols fins

1.2. Dragage des sédiments : Différence entre dragage et curage

Les termes « dragage » et « curage » ne sont pas distincts juridiquement. Leur différenciation relève d'une simple convention d'usage. D'après la circulaire du 4 juillet 2008, le dragage est défini comme une opération d'une certaine grandeur réalisée avec des outils lourds (pompe aspirante, drague, etc.).

Cependant, l'article 114 du code rural définit le curage comme étant des travaux obligatoires pour rétablir un cours d'eau dans sa largeur et sa profondeur naturelles en évacuant les excédents de sédiments mais qui peut par conséquent détruire des zones de frayères ou de croissance de la faune. Il faut vérifier dans ce cas si l'opération de curage relève, ou non, de la rubrique 3.1.5.0 de la nomenclature eau relative à la destruction de frayères [37] ; [38].

Le curage aussi couvre toute opération en milieu aquatique impliquant la mobilisation de matériaux, même d'origine végétale, dans un canal ou dans le lit mineur ou l'espace de mobilité d'un cours d'eau [Article. 3 de l'arrêté du 30 mai 2008].

1.2.2. Les principales raisons du curage

La région Nord-Pas de Calais est très diversifiée du point de vue contexte environnemental : il s'agit en fait d'une région à la fois rurale et urbaine. Ceci induit par conséquent une diversité des sources de sédimentation de ses voies d'eau [39].

Les facteurs qui poussent à réaliser des opérations de curage d'un cours d'eau sont liés principalement soit à des considérations hydrauliques, soit à l'entretien du milieu aquatique. Parmi ces facteurs, on peut citer [3] :

- l'érosion hydrique des sols du bassin versant qui conduit à apporter un certain volume de sédiments aux cours d'eau d'où l'encombrement du lit ;
- les inondations dues à l'envasement et à l'encombrement du lit ;
- la navigation gênée ou rendue impossible par l'envasement des cours d'eau ;
- l'envahissement du lit d'un cours d'eau par la végétation des berges ;
- la croissance des algues et des plantes aquatiques à la surface des lacs et canaux ;
- la divagation du cours d'eau et changement de sa topographie ;
- l'effondrement des berges comme le montre la Figure I.5.



Figure I.5. Berges éboulées après une opération de curage

Selon les statistiques réalisées en 2007, la quantité de matières en suspension apportées dans les voies d'eau en 2007 par l'érosion de l'ensemble des bassins versants du Nord - Pas de Calais a été estimée à environ 143.000 tonnes. Tandis que la quantité en suspension des rejets industriels s'élève à 4.300 tonnes, elle fait aujourd'hui l'objet d'une surveillance par la Direction Régionale de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement (DRIRE). [39]

1.2.3. Les objectifs du curage

Le recours au curage est limité principalement aux trois objectifs suivants [37] ; [38] :

- Affronter l'affection du transport naturel des sédiments de nature à remettre en cause les usages de l'eau, à empêcher le libre écoulement des eaux ou à nuire au bon fonctionnement des milieux aquatiques.

- Lutter contre la dégradation de l'écosystème aquatique par certains végétaux.
- Aménager une portion de cours d'eau, canal ou plan d'eau en vue de créer ou de rétablir un ouvrage ou de faire un aménagement.

Le dépôt ou l'épandage des produits de curage est subordonné à l'évaluation de leur innocuité vis-à-vis de la protection des sols et des eaux.

1.2.4. La quantité de sédiments de curage dans la région Nord-Pas De Calais

La quantité de sédiments à curer entre 2007 et 2027 a été estimée à 8,5 millions de m³ dans un but de rétablir les conditions optimales de navigations. Ces volumes ont été répartis selon la période de curage et la localisation des voies d'eau. [26] ; [27] ; [28].

Subdivision	Volume à curer en 2007 (m³)	Volume d'entretien jusqu'au 2027 (m³)
Cambrai	460 000	300 000
Dunkerque	580 000	560 000
Douai	599 000	840 000
Lille	427 710	367 500
Maubeuge	95 000	100 000
Saint-Omer	98 000	870 000
Valenciennes	1.903 000	1.320 000

Tableau I.2. Répartition des volumes à curer sur les voies d'eau en Nord-Pas de Calais [39]

1.2.5. Précautions à prendre lors du curage des sédiments :

Lors des opérations de curage, il est nécessaire de se référer aux différents paramètres suivants :

- La meilleure période préférable pour curer est l'automne et l'hiver vu que la végétation aquatique est moins développée pendant cette période ;
- Prendre en considération les risques d'altération et de dégradation des berges et réaliser les opérations de remise en état s'il le faut ;
- Intervenir par tronçons en fonction des priorités et en curant d'amont en aval sur chaque tronçon ;
- Mettre en œuvre des mesures complémentaires à l'échelle du bassin versant pour limiter les phénomènes d'érosion des sols.

1.2.6. Le principal intervenant dans l'opération de curage

Le domaine public fluvial (DPF) comprend les cours d'eau navigables ou flottables et leurs dépendances terrestres. Sa gestion a été confiée par l'État à Voies Navigables de France (VNF).

VNF est par définition un établissement public du Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'énergie (MEDDE) qui a été créé en 1991. Il gère et développe le plus grand réseau européen de voies navigables, il est composé de 6.700 km de canaux, fleuves et rivières navigables en France, de 40.000 hectares de domaine public fluvial le long de ces voies et de plus de 4.000 ouvrages.

VNF contribue également au développement des activités fluviales, qu'elles soient liées au transport ou au tourisme, et s'attache à fournir un service de qualité à ses usagers tout en respectant l'environnement et la biodiversité. C'est pour cela que VNF a choisi d'instaurer un système de management environnemental pour plusieurs activités stratégiques qui vise la gestion équilibrée des voies navigables. Cette gestion s'appuie sur une meilleure pratique environnementale et la mise en conformité réglementaire et ceci à un coût économiquement acceptable [39].

Dans cette orientation, VNF a réalisé des études pour établir un protocole pour les tests écotoxicologiques dans l'objectif de fixer des seuils de risque internes à l'établissement qui permettraient de déterminer la dangerosité des sédiments et ainsi justifier le choix pour leur devenir. Le protocole de toxicité va être étudié dans la suite du rapport.

Aujourd'hui, la loi n° 2012-77 du 24 janvier 2012 a élargi les missions confiées à VNF, son rôle consiste désormais à [40] :

- Exploiter, entretenir, maintenir, améliorer, étendre et promouvoir les voies navigables ;
- Promouvoir et développer le transport fluvial et contribuer au report modal ;
- Assurer la gestion hydraulique des voies et, à titre accessoire, l'exploitation de l'énergie hydraulique ;
- Concourir au développement durable et à l'aménagement du territoire ;
- Préserver de la biodiversité et la continuité écologique ;
- Gérer et exploiter le domaine confié par l'État ;
- Conserver le patrimoine et valoriser le domaine public fluvial ;
- Promouvoir le tourisme fluvial et les activités nautiques ;

- Apporter un appui technique aux autorités de l'État en matière de police de la navigation.

1.3. La pollution des cours d'eau

1.3.1. Origine

Les cours d'eau se localisent d'une manière générale dans des espaces urbains ou industriels, autour desquels, on trouve des espaces urbanisés, des terres agricoles ou des secteurs protégés à forte valeur écologique qui nécessitent des préventions contre la pollution.

Cependant, la majorité des activités anthropiques, surtout celles proches des cours d'eau, causent des nuisances et des pollutions dont une grande partie s'accumule dans les sédiments.

Les principales sources de contamination des sédiments sont principalement d'origine humaine dont on peut citer :

- les stations de traitement des effluents ménagers ;
- les débordements de réseaux unitaires ;
- les rejets urbains et industriels ;
- les ruissellements des décharges ;
- les ruissellements des parcelles agricoles et des terrains de stockage industriel.

En conditions normales, les polluants sont peu solubles dans l'eau. Ils se propagent dans les matières en suspension (MES), et lors de la sédimentation, ils s'intègrent dans les sédiments, qui deviennent alors des réservoirs de substances contaminées. Ces contaminants habituellement remobilisables peuvent se libérer et devenir toxiques lorsque les conditions physico-chimiques sont modifiées [35].

1.3.2. Les différents polluants existants dans les sédiments

1.3.2.1. Les éléments nutritifs

Les rivières transportent les éléments nutritifs (en particulier l'azote et le phosphore) vers l'aval du cours d'eau. Dans les systèmes aquatiques, la concentration des éléments nutritifs est un bon indicateur de la santé d'un cours d'eau et le contrôle du rythme de la photosynthèse. De plus, le phosphore limite la croissance des plantes et des algues.

Les activités humaines augmentent sérieusement ces quantités de phosphore et des composés azotés à travers les rejets d'eaux usées, les rejets animaux ainsi que les fertilisants et les effluents agricoles et industriels. Ces éléments sont à l'origine de l'eutrophisation des milieux aquatiques et l'accélération du vieillissement des lacs et des ruisseaux [*Les Moucheurs Endiablés*].

1.3.2.2. Les métaux lourds

Les métaux lourds sont des métaux qui ont une masse volumique supérieure à 5g/cm³. Ces polluants sont naturellement à l'état de traces mais une fois le seuil de tolérance dépassé, ces métaux sont considérés comme toxiques. Certains d'entre eux ont des propriétés mutagènes et cancérigènes (comme par exemple le cadmium). [41]

Les principaux métaux lourds sont : le cadmium (Cd), le cuivre (Cu), le mercure (Hg), l'étain (Sn), le zinc (Zn), le plomb (Pb), le cobalt (Co), le chrome (Cr), le nickel (Ni) et le vanadium (V) et sont reportés dans le Tableau I.3 :

Type de Polluants	Sources
Cadmium	Engrais phosphatés ; industries de traitement de surface des métaux ; industrie de stabilisation des matières plastiques ; fabrication des accumulateurs et des radiateurs automobiles ; fabrication de caoutchouc ; colorants ; eaux de ruissellement des voies de circulation.
Cuivre	Canalisation d'eau ; fils électriques ; radiateurs automobiles ; appareils de chauffage ; traitement de surface.
Zinc	Produits pharmaceutiques ou domestiques, conduites d'eau ; peintures ; piles ; galvanisation ; traitement de surface.
Nickel	Fabrication d'aciers et d'alliages spéciaux ; recouvrement de surface par électrolyse ; hydrogénation des huiles et substances organiques ; fabrication de peintures ; de laque et de produits cosmétiques.
Mercurure	Produits pharmaceutiques ou domestiques ; production et utilisation d'antifongiques ; appareils électriques ; produits électrolytiques du chlore et de la soude ; peintures ; pâte à papier ; fabrication de chlorure de vinyle et d'uréthane.
Chrome	Tannerie ; fabrication d'alliages spéciaux ; industries de traitement de surface.
Plomb	Canalisations d'eau ; bacs de batteries ; peintures ; additifs pour l'essence ; eaux de ruissellement des voies de circulation ; industries pharmaceutiques et sidérurgiques ; ateliers photographiques ; télévisions.
Sélénium	Fabrication de peintures et colorants ; verre ; semi-conducteurs ; insecticides ; alliages.
Arsenic	Pesticides ; herbicides ; fongicides ; insecticides ; raticides ; défoliants ; conservateurs du bois ; cellules solaires ; semi-conducteurs ; électrographie ; catalyse ; pyrotechniques ; céramiques ; produits pharmaceutiques ; épilage des peaux en tannerie et mégisserie ; durcissement du cuivre et du plomb ; fabrication des batteries.

Tableau I.3. Liste des principaux métaux lourds et leurs provenances [42]

1.3.2.3. Les substances organiques

Les PCB, dioxines, furanes et hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) appartiennent à la vaste gamme des Polluants Organiques Persistants (POPs). Ces POPs peuvent présenter des structures chimiques extrêmement variées mais ont tous en commun d'être des dérivés organiques [43]. Ces éléments sont souvent très toxiques, parfois cancérigènes (c'est le cas de certains HAP, par exemple), solubles ou adsorbés sur les matières en suspension. Ils sont le plus souvent solubles dans les graisses ; c'est le cas des PCB ou des dioxines.

a. Les Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)

Les HAP sont des composés organiques formés exclusivement d'atomes de carbone et d'hydrogène. Ils constituent une vaste classe de composés organiques constitués d'au moins deux cycles aromatiques condensés. Les HAP se trouvent généralement en mélange complexe, parfois constitué d'une centaine de composés [22].

La particularité des molécules des HAP c'est qu'elles peuvent provoquer des perturbations par une exposition chronique même à de faibles concentrations.

On distingue deux familles d'HAP :

- Les hydrocarbures saturés (alcane)
- les hydrocarbures insaturés regroupant les alcènes, alcynes et composés aromatiques.

Le nombre d'HAP susceptibles d'exister est sans limite. Non seulement le nombre possible de noyaux accolés est infini, mais le nombre d'isomères augmente avec le nombre de cycles, qui, de plus, peuvent être alkylés ou non.

Ils proviennent à la fois de sources naturelles (feux de forêt et éruptions volcaniques) et anthropiques (pyrolyse ou combustion incomplète de matières organiques comme le pétrole, le charbon, les ordures ménagères, le carburant de moteurs à essence et diesel). Ils font partie des polluants organiques persistants (POPs) qui ont des effets toxiques et cancérigènes avérés sur la santé humaine et nocifs pour l'environnement. [44]

b. Les polychlorobiphényles PCB

Par le terme "PCB" on désigne les polychlorobiphényles qui sont des composés aromatiques chlorés. Sur le plan chimique, ils représentent une famille de substances qui ont toutes la même structure générique constituée d'un biphényle comportant jusqu'à cinq atomes de chlore sur chaque phényle.

Il existe un grand nombre de combinaisons différentes liées au nombre d'atomes de chlore et aux positions qu'ils occupent, conduisant à 209 composés ou congénères avec des niveaux différents de toxicité. Les PCB représentent une famille de composés chimiques omniprésents dans l'environnement en quantité infime, mais présentant un niveau de toxicité élevé.

Une fois libérés dans l'atmosphère, les PCB peuvent être transportés sur de très longues distances lorsqu'ils sont adsorbés sur les particules atmosphériques, et ainsi contaminer des lieux éloignés de la source de pollution.

Ils peuvent polluer le compartiment aquatique via le lessivage des eaux de ruissellement, les dépôts atmosphériques ou des rejets directs (cette voie étant moins répandue actuellement) [43].

1.4. Devenir des sédiments

Les études montrent que la remise en suspension (33%) et la mise en dépôt (31%) sont les principaux modes utilisés pour le devenir des sédiments. Pour VNF, la mise en dépôt est de plus en plus prépondérante : elle concernait 55% entre les années 1990 et 2000 et elle porte sur 79% entre 2000 et 2005. Les coûts moyens d'extraction sont variables d'une technique à une autre et ont fortement augmenté depuis 1990. En 2005 le coût moyen du curage était de l'ordre de 15€/m³ [45].

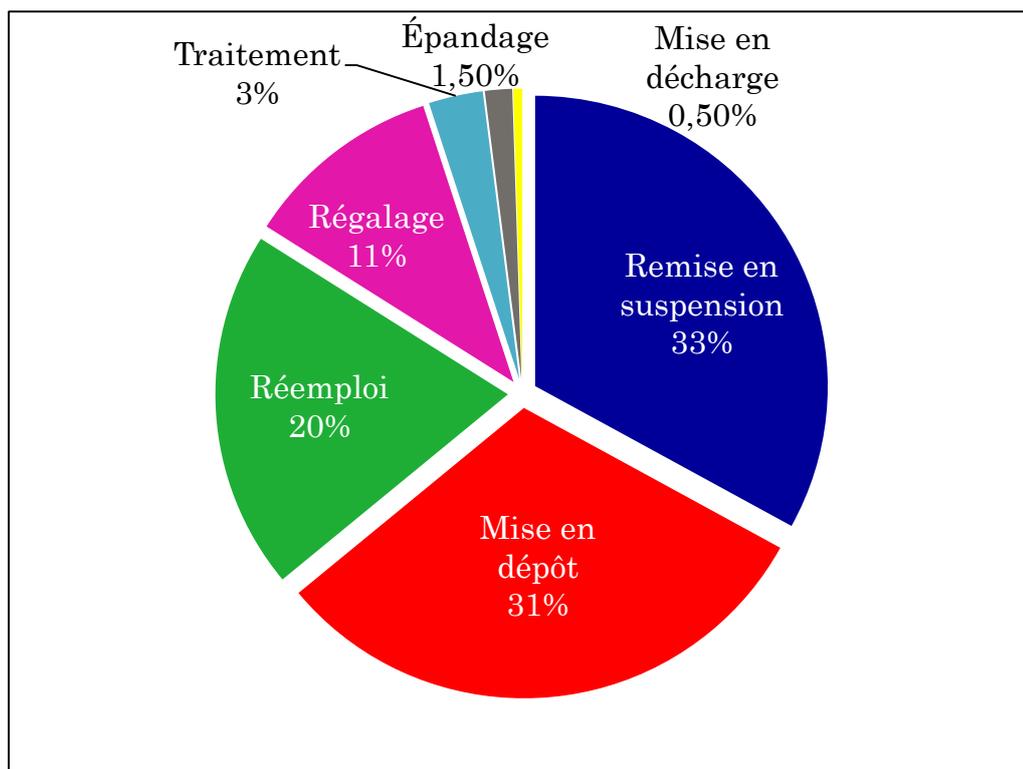


Figure I.6. Voies de gestion des sédiments

En fonction des caractéristiques du sédiment et de son degré de pollution, nous pouvons distinguer différents modes de gestion après le dragage selon l'organigramme suivant :

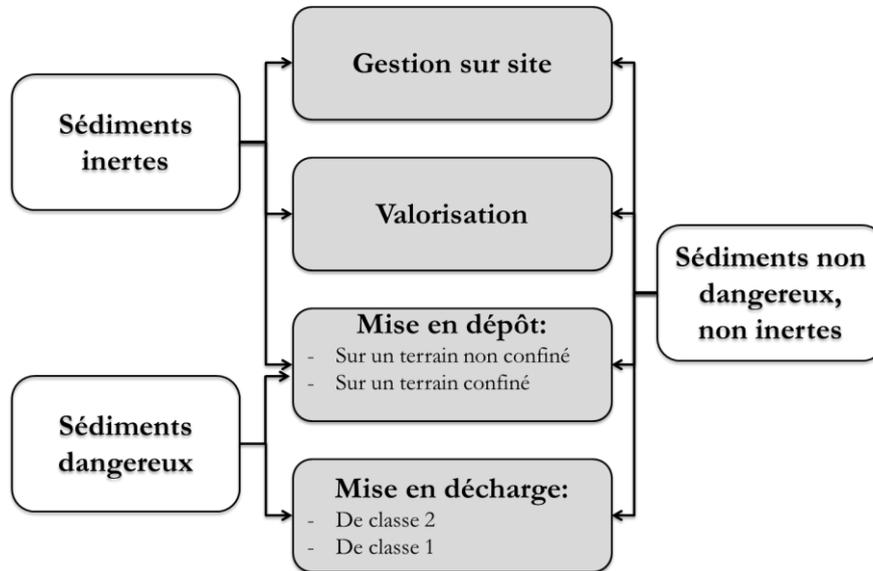


Figure I.1. Schéma de gestion des sédiments fluviaux [39]

1.4.1. Immersion et remise en suspension

Cette filière de gestion des sédiments est utilisée principalement pour 90% des sédiments marins, et elle est nécessaire pour l'évacuation des déblais issus du dragage d'entretien. Environ 20 à 40 millions de m³ de sédiments sont immergés ou remis en suspension chaque année à condition qu'ils soient inertes [35].

1.4.2. Régilage

Les produits de curage sont déposés sous forme d'une bande de terre (5 à 10 m de largeur et 10 à 30 cm d'épaisseur) le long des rives, avec des aménagements drainants, permettant l'écoulement des eaux de pluies. Dans certains cas, les sédiments sont projetés sur les berges par un canon [21].

1.4.3. Traitement des produits de curage

Étant donné le surcoût occasionné par ces traitements, il semble raisonnable de penser qu'ils sont presque exclusivement dévoués aux sédiments présentant des niveaux de pollution importants. Il est possible de distinguer [21] :

- **Le prétraitement** qui a pour but de réduire le volume des sédiments pour améliorer leur qualité ou faciliter un traitement ultérieur. Il peut consister en une déshydratation ou un

tri granulométrique. Le prétraitement peut être fait sur des sédiments non pollués préalablement à un réemploi ;

- **Le traitement** : citons notamment :
 - Traitement chimique : qui consiste à détruire les substances organiques et extraire les métaux existants ;
 - Techniques végétales : Les plantes sont utilisées pour gérer ou décontaminer les sédiments pollués ;
 - Traitement biologique : à travers l'utilisation de micro-organismes pour dégrader les substances organiques ou pour accélérer la décomposition naturelle des contaminants organiques ;
 - Traitement physique : permet de concentrer les polluants par des procédés physiques de manière à pouvoir ensuite mieux confiner les matières polluantes ;
 - Traitement par immobilisation (inertage) : sert à fixer les contaminants dans la matrice solide du sédiment afin qu'ils ne soient plus mobiles. Des analyses à long terme sont donc nécessaires pour assurer l'efficacité de ce type de traitement. Parmi les nombreuses techniques disponibles d'inertage on peut citer l'immobilisation et l'inertage thermique ;
 - Traitement par lavage des sédiments.
- **L'incinération** : consiste à la destruction des sédiments et des boues curés dans des unités spéciales de traitement des ordures ménagères.

1.4.4. Mise en dépôt

1.4.4.1. Clapage (mise en dépôt sous-eau)

Les sédiments sont déversés dans le milieu aquatique dans des zones officiellement définies pour cet usage : soit une zone de grande profondeur, en aval du cours d'eau concerné, soit en milieu marin. L'objectif visé est le stockage sous grande hauteur d'eau ou la dispersion des sédiments dans le milieu naturel.

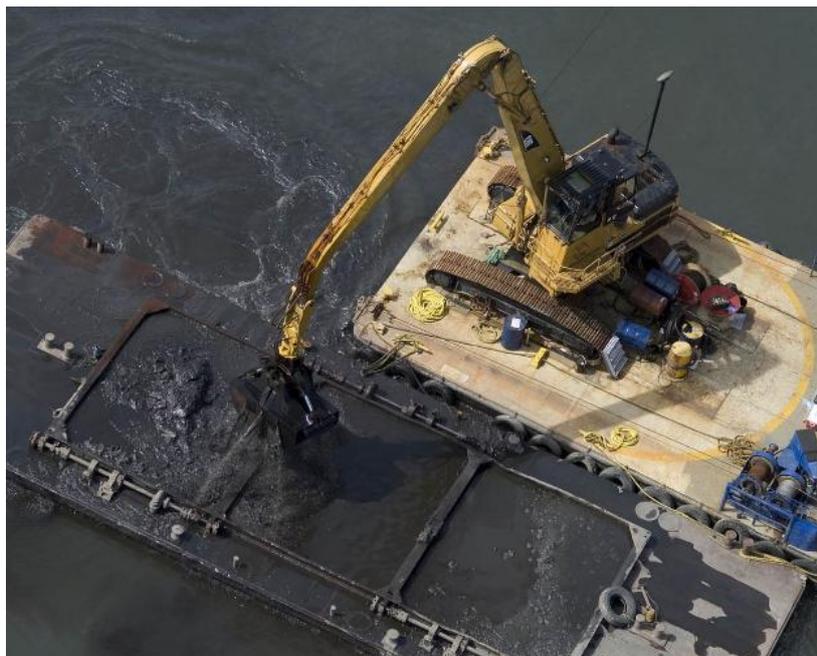


Figure I.2. Principe du clapage

1.4.4.2. Mise en dépôt non confiné

Lorsque l'état ou la configuration du site ne permet pas de disposer d'espace sur les berges, la mise en dépôt est à envisager. Ce site de dépôt peut consister en un simple bassin creusé à même la terre sans étanchéité particulière. Il est ensuite remis en état pour d'éventuelles cultures alimentaires ou non, ou pour des aménagements (zones de loisirs, réserves faunistiques et floristiques)...



Figure I.3. Bassin de stockage provisoire et non confiné des sédiments

1.4.4.3. Mise en dépôt confiné

Le stockage sur un terrain de dépôt confiné concerne les déchets définis comme dangereux. Leur mise en dépôt est soumise à autorisation au titre des ICPE avec la loi du 19

juillet 1976 (transposée dans le code de l'environnement) et son décret d'application du 21 septembre 1977. [18].



Figure I.4. Terrain de dépôt étanche

1.5. La classification des sédiments

1.5.1. Classification GTR

L'utilisation des matériaux en remblai ou en couches routières est directement liée à leur comportement lors de leur mise en place. Le GTR (Guide de Terrassements Routiers : réalisation des remblais et des couches de forme) de 1992 propose une classification de ces matériaux dans le domaine routier. [47]

Le GTR permet de classer un matériau à partir des résultats de différents essais d'identifications physique et mécanique. La classification primaire est obtenue en se basant sur la granulométrie, l'argilosité et la consistance du matériau.

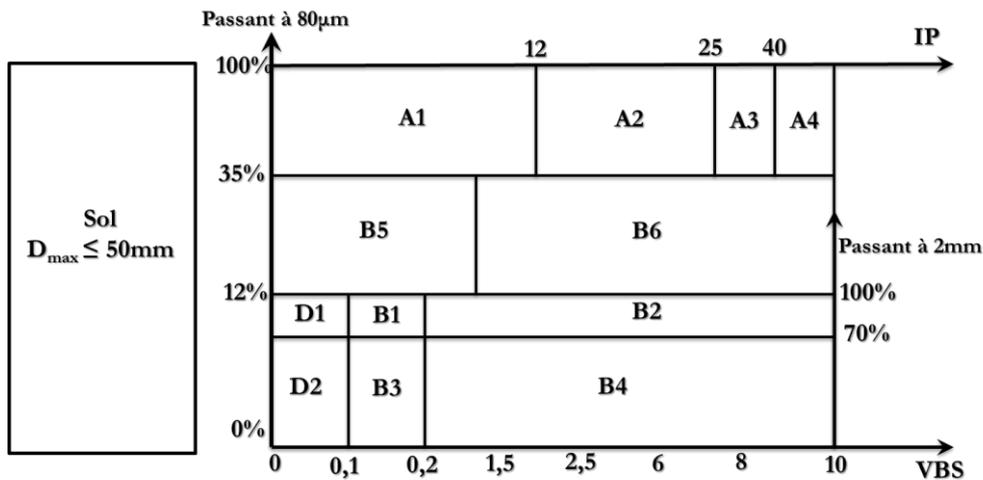


Figure I.5. Tableau de classification GTR des matériaux selon leur nature

1.5.2. Classification USCS

L'USCS (*Unified Soil Classification System*) est basé sur l'identification des sols en fonction de leur texture, leur plasticité et sur leur comportement. Dans l'USCS, tous les sols sont placés dans l'une de ces trois grandes catégories :

- Sols à grains grossiers ;
- Sols à grains fins ;
- Sols hautement organiques.

Sur une base de texture, les sols grossiers sont ceux qui ont 50% ou plus en poids de l'échantillon de sol retenu sur le tamis 200 μm et les sols à texture fine sont ceux qui ont plus de 50% de passant à 200 μm . Cependant les sols fortement organiques sont facilement identifiés par un simple examen visuel [47]. L'USCS classe ces catégories de sols par des symboles, comme suit :

Classe des matériaux						Sous-classe des matériaux			
Lettre	C	G	M	O	S	H	L	P	W
Définition	Calcaire	Gravier	Limon	Organique	Sable	Haute plasticité	Faible plasticité	Mal classé	Bien classé

Tableau I.4. Classes et sous-classes des matériaux selon l'USCS [10]

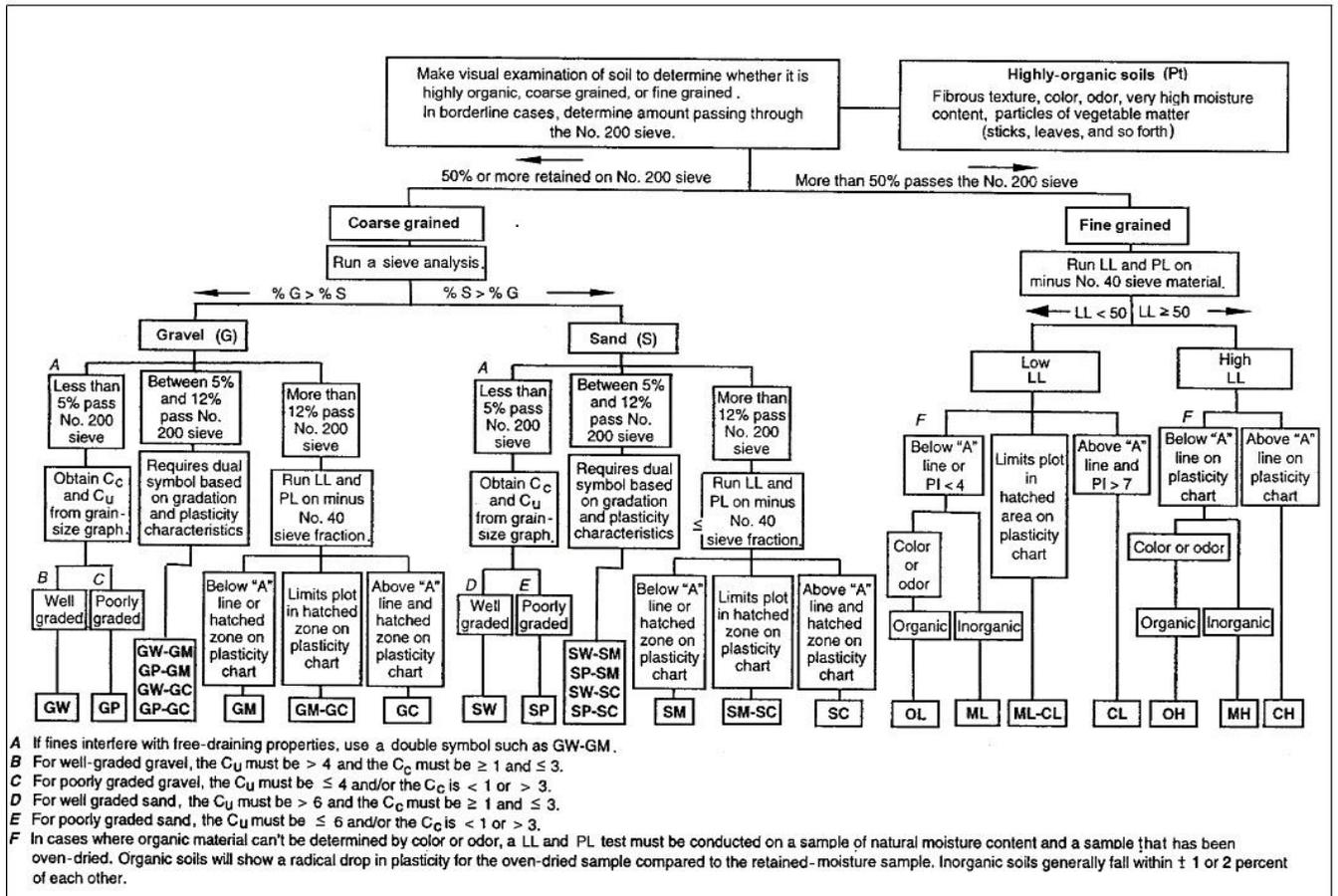


Figure I.6. Tableau de classification USCS

1.5.3. Classification AASHTO

L'AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) a été créé par Tarzaghi¹ et Hogentogler² en 1928. C'était l'un des premiers systèmes de classification d'ingénierie, conçu spécifiquement pour une utilisation dans la construction de routes. Le système AASHTO utilise à la fois la granulométrie et les données des limites d'Atterberg pour attribuer une classification des sols et matériaux. Les gammes de classification varient de A1 (bons sols) à A7 (sols médiocres) [48].

¹ Karl Von Terzaghi (1883-1963) : Ingénieur civil et géologue autrichien

² Hogentogler : Ingénieur colombien en mécanique des sols

General Classification	Granular Materials (35% or less passing the 0.075 mm sieve)						
Group Classification	A-1		A-3	A-2			
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7
Sieve Analysis, % passing							
2.00 mm (No. 10)	50 max	...	...	...	...	...	...
0.425 (No. 40)	30 max	50 max	51 min	...	...	...	...
0.075 (No. 200)	15 max	25 max	10 max	35 max	35 max	35 max	35 max
Characteristics of fraction passing 0.425 mm (No. 40)							
Liquid Limit	...		...	40 max	41 min	40 max	41 min
Plasticity Index	6 max		N.P.	10 max	10 max	11 min	11 min
Usual types of significant constituent materials	Stone fragments, gravel and sand		Fine sand	Silty or clayey gravel and sand			
General rating as a subgrade	Excellent to good						

Tableau I.5. Tableau de classification AASHTO pour les sols grossiers

General Classification	Silt-Clay Materials (>35% passing the 0.075 mm sieve)			
Group Classification	A-4	A-5	A-6	A-7
				A-7-5 A-7-6
Sieve Analysis, % passing				
2.00 mm (No. 10)	...	...	...	...
0.425 (No. 40)	...	...	...	...
0.075 (No. 200)	36 min	36 min	36 min	36 min
Characteristics of fraction passing 0.425 mm (No. 40)				
Liquid Limit	40 max	41 min	40 max	41 min
Plasticity Index	10 max	10 max	11 min	11 min
Usual types of significant constituent materials	Silty soils		Clayey soils	
General rating as a subgrade	Fair to poor			

Tableau I.6. Tableau de classification AASHTO des sols limono-argileux

1.6. La réglementation et les lois relatives à la gestion et au curage des sédiments

1.6.1. *Réglementation française*

La réglementation liée à la problématique de curage des sédiments est très complexe et se recoupe fréquemment. Elle se réfère essentiellement aux lois et conventions régionales et internationales dans le but de trouver des solutions de traitement alternatives à l’immersion ou au stockage quand les sédiments présentent des caractéristiques toxiques indéniables. [35]

Du point de vue juridique, les opérations de curage relèvent principalement du code de l’environnement et en particulier des articles L210 à L215 [loi sur l’eau], L511 à L517 [loi ICPE] et L541-1.

1.6.1.1. *La qualité des sédiments et leur extraction*

a. *Historique de la loi sur l’eau*

C’est en 1964 que la 1^{ère} loi sur l’eau a eu lieu. Son principal objectif était de s’imposer au développement industriel et aux problèmes de pollution qu’il cause. Pour cela, elle a fixé des conditions financières et techniques pour une meilleure gestion de l’eau et ses ressources à travers :

- une démarche de gestion selon les grands bassins hydrographiques,
- la création d’un comité de bassin et d’une agence de l’eau ayant comme missions respectives l’élaboration d’une politique de gestion de l’eau et sa mise en œuvre,
- l’instauration d’un organisme de consultation auprès du premier ministre par la création d’un comité national de l’eau.

Cette loi a mis en place un inventaire national pour établir le degré de pollution des eaux superficielles dans le but d’améliorer leurs qualités et lutter contre la pollution. En 1971, le ministère de l’environnement et les agences de l’eau ont réalisé un premier état des lieux de la qualité des cours d’eau et de leurs usages [49].

b. *Lois relatives à la qualité des sédiments et leur stockage à terre*

Pour connaître la qualité des sédiments fluviaux extraits des cours d’eau, la réglementation Française a défini dans le 1^{er} article de l’arrêté du **09 Août 2006** les seuils de qualité qui influencent le régime de l’opération de curage ou qui analysent les rejets dans les eaux de surface. Ces seuils s’appliquent à 8 métaux lourds, ainsi qu’aux HAP et PCB totaux. De plus, il est nécessaire de prendre en considération les niveaux de référence prescrits par la législation

réglementant l'épandage des boues de stations d'épuration sur des terres cultivées par l'application de l'arrêté du **8 Janvier 1998**.

Paramètres	Loi sur l'eau	Valeurs limites acceptées dans les boues en mg/kg MS (8janvier1998)	
	Seuil S1	Épandage	Reconstitution d'un sol
Métaux traces			
Arsenic	30	--	--
Cadmium	2	15	2
Chrome	150	1000	150
Cuivre	100	1000	100
Mercure	1	10	1
Nickel	50	200	50
Plomb	100	800	100
Zinc	300	3000	300
Sélénium		100	300
Contaminants organiques			
PCB	--	0,8	--
PCB Totaux	0,68	--	--
HAP Totaux	22,8	--	--
Fluoranthène	--	5	--
Benzo (b) fluo	--	2,5	--
Benzo (a) pyrène	--	2	--

Tableau I.7. Niveaux relatifs aux éléments et composés traces (en mg/kg MS analysé sur la fraction < à 2 mm)

- **Décret n° 2006-881 du 17 juillet 2006 modifiant le décret n° 93-743 du 29 mars 1993** : relatif à la nomenclature des opérations soumises à autorisation ou à déclaration en application de l'article 10 de la loi n° 92-3 du 3 janvier 1992 sur l'eau et le décret n° 94-354 du 29 avril 1994 relatif aux zones de répartition des eaux.

Pour des raisons de simplification administrative et de sûreté juridique, les opérations de dragage sont autorisées au titre du plan de gestion. Le dossier d'autorisation doit tenir compte des prescriptions suivantes : [Tableaux I.9, I.10].

- **Arrêté du 30 mai 2008** : Il fixe les prescriptions générales applicables aux opérations d'entretien de cours d'eau ou canaux soumis à autorisation ou à déclaration en application de la rubrique 3.2.1.0 de la nomenclature eau du code de l'environnement. L'autorisation est valable pour une durée qui ne peut être supérieure à 10 ans. L'autorisation prend également en compte les éventuels sous-produits et leur devenir.

Volume de sédiments extraits au cours de 12 mois consécutifs	< 2 000 m ³	> 2 000 m ³
	Teneur des sédiments extraits ≤ S1	Déclaration	Autorisation
Teneur des sédiments extraits ≥ S1	Autorisation	

Tableau I.8. Rubrique 3.2.1.0 relative aux conditions pour lesquelles les travaux de curage sont soumis au régime de déclaration ou d'autorisation

Destruction des frayères (surface)	< 200 m ²	> 200 m ²
		Déclaration	Autorisation

Tableau I.9. Rubrique 3.1.5.0 relative aux installations, ouvrages, dans le lit mineur d'un cours d'eau, étant de nature à détruire les frayères, les zones de croissance ou les zones d'alimentation

- **Arrêté du 28 novembre 2007** : fixant les prescriptions générales applicables aux installations, ouvrages, travaux ou activités sur l'eau.

Modification du profil du cours d'eau sur une longueur	< 100 m	> 100 m
		Déclaration	Autorisation

Tableau I.10. Rubrique 3.1.2.0 relative aux installations, ouvrages, conduisant à modifier le profil en long ou le profil en travers d'un cours d'eau

- **Circulaire du 4 juillet 2008** relative à la procédure concernant la gestion des sédiments lors de travaux ou d'opérations impliquant des dragages ou curages maritimes et fluviaux.

1.6.1.2. Lois propres à l'admission des déchets en décharge

a. Définition d'un déchet

La notion « déchet » est définie par la 1^{ère} loi en la matière datant du 15 juillet 1975 comme étant " tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau ou produit ou plus généralement, tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon".

D'une façon générale, chaque déchet doit subir un certain nombre d'essais afin de déterminer ses caractéristiques et obtenir les informations nécessaires pour son identification. Outre son comportement à la lixiviation, la composition du déchet doit être connue ou précisée par des essais. Les essais utilisés pour la caractérisation de base doivent toujours inclure les essais relatifs à la vérification de la conformité [18].

La directive 91/156/CEE a élaboré le catalogue européen des déchets, publié le 20 décembre 1993 et transcrit en France par le décret du 18 avril 2002. Quant à la directive 91/689/CEE, elle a conduit à l'élaboration d'une liste minimale des déchets dangereux, accompagnée de 14 critères de danger. Ces critères sont utilisés généralement pour déclasser certains déchets, au niveau national ou européen [50].

La dangerosité des déchets est déterminée par un test de lixiviation [norme NF EN 12457-2] permettant d'extraire les éléments étudiés pour quantifier le risque maximal de transfert. Il permet donc d'analyser la disponibilité potentielle des polluants en milieux aqueux. Le test de lixiviation comprend deux phases :

- Une filtration à froid d'un mélange avec récupération des filtrats ;
- Dosage des éléments étudiés dans les lixiviats obtenus.

b. Valeurs limites pour les déchets admissibles dans les décharges

i. Déchets inertes (ISDI)

En application de l'arrêté du 28 octobre 2010 relatif aux installations de stockage des déchets inertes, les valeurs limites de lixiviation sont calculées, en terme de relargage cumulé, sur la base d'un ratio liquide-solide ($\frac{L}{S}$) soit de 2l/Kg soit de 10l/Kg. Elles sont directement exprimées en mg/l dans la colonne C₀ (premier éluât de l'essai de percolation, avec un rapport L/S = 0,1 l/kg). Les seuils limites figurent dans les tableaux suivants :

Composant	L/S = 2 l/kg M.S (mg/kg)	L/S = 10 l/kg M.S (mg/kg)	C ₀ (mg/l)
As	0,1	0,5	0,6
Ba	7	20	4
Cd	0,03	0,04	0,02
Cr Total	0,2	0,5	0,1
Cu	0,9	2	0,6
Hg	0,003	0,01	0,002
Mo	0,3	0,5	0,15
Ni	0,2	0,4	0,12
Pb	0,2	0,5	0,15
Sb	0,02	0,06	0,1
Se	0,06	0,1	0,04
Zn	2	4	1,2
Chlorures	550	800	460
Fluorures	4	10	2,5
Sulfate	560	1000	1500
Indice Phénols	0,5	1	0,3
COT sur éluât	240	500	160
FS (Fraction soluble)	2500	4000	-

Tableau I.11. Valeurs limites de lixiviation pour les déchets inertes

Paramètre	Valeur mg/kg
COT	30 000
BTEX	6
PCB	1
Hydrocarbures (C10 à C40)	500
HAP	50

Tableau I.12. Valeurs limites pour les contaminants organiques

ii. Déchets non dangereux (ISDND)

Au sens de l'article 1 de l'arrêté du 2 Août 2011 modifiant l'arrêté du 09 septembre 1997 relatif aux installations de stockage de déchets non dangereux n'ayant subi aucune modification physique, chimique ou biologique importante, les valeurs seuils à mettre en évidence sont les suivantes :

Composant	<i>L/S = 2 l/kg</i> M.S (m/kg)	<i>L/S = 10 l/kg</i> M.S (mg/kg)	<i>C₀</i> (mg/l)
As	0,4	2	0,3
Ba	30	100	20
Cd	0,6	1	0,3
Cr Total	4	10	2,5
Cu	25	50	30
Hg	0,005	0,2	0,03
Mo	5	10	3,5
Ni	5	10	3
Pb	5	10	3
Sb	0,2	0,7	0,15
Se	0,3	0,5	0,2
Zn	25	50	15
Chlorures	10 000	15 000	8 500
Fluorures	60	150	40
Sulfate	10 000	20 000	7 000
COT sur éluât	380	800	250
FS (Fraction soluble)	40 000	60 000	-

Tableau I.13. Valeurs limites de lixiviation pour les déchets non dangereux

iii. Déchets dangereux (ISDD)

Une Installation de Stockage de Déchets Dangereux (ISDD) est une installation d'élimination de déchets dangereux par dépôt ou enfouissement sur ou dans la terre. L'arrêté du 30 décembre 2002 relatif au stockage des déchets dangereux fixe les seuils de lixiviation pour les différents composants chimiques qui y existent.

Composant	<i>L/S = 2 l/kg</i> M.S (mg/kg)	<i>L/S = 10 l/kg</i> M.S (mg/kg)	<i>C₀</i> (mg/l)
As	6	25	3
Ba	100	300	60
Cd	3	5	1,7
Cr Total	25	70	15
Cu	50	100	60
Hg	0,5	2	0,3
Mo	20	30	10
Ni	20	40	12
Pb	25	50	15
Sb	2	5	1
Se	4	7	3
Zn	90	200	60
Chlorures	17 000	25 000	15 500
Fluorures	200	500	120
Sulfate	25 000	50 000	17 000
COT sur éluât	480	1 000	320
FS (Fraction soluble)	70 000	100 000	-

Tableau I.14. Les valeurs limites de lixiviation pour les déchets dangereux

Filière	Conditions	Réglementation	Références
Valorisation en technique routière	Sédiment inerte ou non dangereux	--	- Guide des Terrassements Routiers (GTR). - Guide acceptabilité de matériaux alternatifs en techniques routières, Évaluation environnementale (SETRA, mars 2011). - Guide technique CFTR - traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques - Application à la réalisation des assises de chaussées - Guide technique CFTR - traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques - Application à la réalisation des remblais et couches de forme
Valorisation agricole Sédiment	inerte ou non dangereux	--	- Arrêté du 8 janvier 1998.
Valorisation en aménagement paysager	Sédiment inerte ou étude spécifique selon EN 12920+ A1	--	- Arrêté du 28 octobre 2010 relatif aux installations de stockage de déchets inertes
Valorisation en renforcement des berges	Sédiment inerte ou acceptable en immersion	- Code de l'environnement pour le rejet dans les eaux de surface (article R. 214-1).	- Arrêté du 28 octobre 2010 relatif aux installations de stockage de déchets inertes - Arrêté du 9 août 2006 dit arrêté "Géode"
Remblaiement de carrière	Sédiment inerte	- Arrêté du 22 septembre 1994 relatif aux exploitations de carrières (article 12.3).	- Arrêté du 28 octobre 2010 relatif aux installations de stockage de déchets inertes
Couverture d'installation de stockage de déchets	Sédiment inerte ou non dangereux selon type d'utilisation	- Arrêté du 9 septembre 1997 relatif au stockage de déchets « non dangereux »	- Arrêté du 28 octobre 2010 relatif aux installations de stockage de déchets inertes
Travaux maritimes	Sédiment inerte ou étude spécifique selon EN 12920+A1	--	- Arrêté du 28 octobre 2010 relatif aux installations de stockage de déchets inertes
Produits de construction	Sédiment inerte ou étude spécifique selon EN 12920+ A1	--	Arrêté du 28 octobre 2010 relatif aux installations de stockage de déchets inertes

Tableau I.15. Réglementations et référentiels applicables selon les filières de valorisation

1.6.1.3. Évaluation des propriétés de dangerosité d'un sédiment

Par application du décret n° 2011-828 du 11 juillet 2011 portant diverses dispositions relatives à la prévention et à la gestion des déchets on définit le déchet comme suit :

Déchet dangereux : «*tout déchet qui présente une ou plusieurs des propriétés de dangers.* » ;

Déchet non dangereux : «*tout déchet qui ne présente aucune des propriétés qui rendent un déchet dangereux.* » ;

Déchet inerte : «*tout déchet qui ne subit aucune modification physique, chimique ou biologique importante, qui ne se décompose pas, ne brûle pas, ne produit aucune réaction physique ou chimique, n'est pas biodégradable et ne détériore pas les matières avec lesquelles il entre en contact d'une manière susceptible d'entraîner des atteintes à l'environnement ou à la santé humaine.* ».

L'annexe I à l'article R. 541-8 relative aux propriétés qui rendent les déchets dangereux définit les propriétés de dangerosité suivantes :

H1 « Explosif » : Substances et préparations pouvant exploser sous l'effet de la flamme ou qui sont plus sensibles aux chocs ou aux frottements que le dinitrobenzène.

H2 « Comburant » : Substances et préparations qui, au contact d'autres substances, notamment de substances inflammables, présentent une réaction fortement exothermique.

H3-A « Facilement inflammable » : Substances et préparations qui se présentent à l'état :

- Liquide : (y compris les liquides extrêmement inflammables), dont le point d'éclair est inférieur à 21 °C.
- Solide : Elles peuvent s'enflammer facilement par une brève action d'une source d'inflammation et qui continuent à brûler ou à se consumer après l'éloignement de cette source.
- Gazeux : Substances inflammables à l'air à une pression normale ; qui, au contact de l'eau ou de l'air humide, produisent des gaz facilement inflammables en quantités dangereuses. Ces substances peuvent s'échauffer au point de s'enflammer à l'air à une température ambiante sans apport d'énergie.

H3-B « Inflammable » : substances et préparations liquides, dont le point d'éclair est égal ou supérieur à 21 °C et inférieur ou égal à 55 °C.

H4 « Irritant » : substances et préparations non corrosives qui, par contact immédiat, prolongé ou répété avec la peau et les muqueuses, peuvent provoquer une réaction inflammatoire.

H5 « Nocif » : substances et préparations qui, par inhalation, ingestion ou pénétration cutanée, peuvent entraîner des risques de gravité limitée.

H6 « Toxique » : substances et préparations (y compris les substances et préparations très toxiques) qui, par inhalation, ingestion ou pénétration cutanée, peuvent entraîner des risques graves, aigus ou chroniques, voire la mort.

H7 « Cancérogène » : substances et préparations qui, par inhalation, ingestion ou pénétration cutanée, peuvent produire le cancer ou en augmenter la fréquence.

H8 « Corrosif » : substances et préparations qui, en contact avec des tissus vivants, peuvent exercer une action destructrice sur ces derniers.

H9 « Infectieux » : matières contenant des micro-organismes viables ou leurs toxines, dont on sait ou on a de bonnes raisons de croire qu'ils causent la maladie chez l'homme ou chez d'autres organismes vivants.

H10 « Toxique pour la reproduction » : substances et préparations qui, par inhalation, ingestion ou pénétration cutanée, peuvent produire ou augmenter la fréquence d'effets indésirables non héréditaires dans la progéniture ou porter atteinte aux fonctions ou capacités reproductives.

H11 « Mutagène » : Substances et préparations qui peuvent produire des défauts génétiques héréditaires par inhalation, ingestion ou pénétration cutanée.

H12 : Substances et préparations qui dégagent un gaz toxique au contact de l'eau, de l'air ou d'un acide.

H13 « Sensibilisant » : Substances et préparations qui, par inhalation ou pénétration cutanée, peuvent donner lieu à une réaction d'hypersensibilisation telle qu'une nouvelle exposition à la substance ou à la préparation produit des effets néfastes caractéristiques. Cette propriété n'est à considérer que si les méthodes d'essai sont disponibles.

H14 « Écotoxique » : substances et préparations qui présentent ou peuvent présenter des risques immédiats ou différés pour une ou plusieurs composantes de l'environnement.

H15: Substances et préparations susceptibles, après élimination, de donner naissance, par quelque moyen que ce soit, à une autre substance, par exemple un produit de lixiviation, qui possède l'une des caractéristiques énumérées ci-avant. [Article R. 541-8].

Les termes « substances » et « préparations » sont définis dans les articles R. 4411-2 à R. 4411-6 du code du travail.

La nouvelle directive-cadre sur les déchets n°2008/98/CE du 19 novembre 2008 précise certaines définitions, notamment celles des différents modes de traitement (valorisation ou élimination) :

- **Réemploi** : Toute opération par laquelle des produits ou des composants qui ne sont pas des déchets sont utilisés de nouveau pour un usage identique à celui pour lequel ils avaient été conçus.
- **Préparation en vue du réemploi** : Toute opération de contrôle, de nettoyage ou de réparation en vue de la valorisation, par laquelle des produits ou des composants de produits qui sont devenus des déchets soient préparés de manière à être réutilisés sans autre opération de prétraitement.
- **Élimination** : Toute opération qui n'est pas de la valorisation même lorsque ladite opération a comme conséquence secondaire la récupération de substances ou d'énergie.
- **D1** : Dépôt sur ou dans le sol (par exemple, mise en décharge).
- **D2** : Traitement en milieu terrestre (par exemple, biodégradation de déchets liquides ou de boues dans les sols).
- **D3** : Injection en profondeur (par exemple, injection de déchets pompables dans des puits, des dômes de sel ou des failles géologiques naturelles).
- **D4** : Lagunage (par exemple, déversement de déchets liquides ou de boues dans des puits, des étangs ou des bassins).
- **D5** : Mise en décharge spécialement aménagée (par exemple, placement dans des alvéoles étanches séparées, recouvertes et isolées les unes des autres et de l'environnement).
- **D6** : Rejet dans le milieu aquatique, sauf l'immersion.
- **D7** : Immersion, y compris enfouissement dans le sous-sol marin.
- **D8** : Traitement biologique aboutissant à des composés ou à des mélanges qui sont éliminés selon un des procédés numérotés D1 à D12.

- **D9**: Traitement physico-chimique aboutissant à des composés ou à des mélanges qui sont éliminés selon l'un des procédés numérotés D1 à D12 (par exemple, évaporation, séchage, calcination).
- **D10**: Incinération à terre.
- **D11**: Incinération en mer.
- **D12**: Stockage permanent.
- **D13**: Regroupement ou mélange préalablement à l'une des opérations numérotées D1 à D12.
- **D14**: Reconditionnement préalablement à l'une des opérations numérotées D1 à D13.
- **D15**: Stockage préalablement à l'une des opérations numérotées D1 à D14 (à l'exclusion du stockage temporaire, avant collecte, sur le site de production des déchets). [54].

1.6.1.4. Mode d'évaluation du critère d'écotoxicité H14

a. *Projet de janvier 1998*

Le décret du 15 mai 1997, transposant la décision 94/904/CE, a été accompagné en septembre 1997 (modifié en janvier 1998) d'un projet de guide technique d'application du critère H14.

Ce projet vise à évaluer l'écotoxicité directe des déchets, ainsi que des éluâts qu'ils génèrent. Il fixe aussi les analyses chimiques sur éluâts et matrices solides, ainsi qu'une batterie de bio-essais :

- Écotoxicité aiguë d'éluats (CE50 10%): Essais vis-à-vis de bactéries bioluminescentes (5 à 30 min) et de daphnies (24 ou 48 h). Le déchet est considéré « écotoxique » si une concentration inférieure ou égale à 10 % de son éluât provoque 50 % d'inhibition d'une fonction vitale chez les organismes mis en expérimentation.
- Écotoxicité chronique d'éluats (CE20 0,1%) : Essais vis-à-vis de microalgues (3 jours) et de cériodaphnies (7 jours). Le déchet est considéré « écotoxique » si une concentration inférieure ou égale à 0,1 % de son éluât provoque 20 % d'inhibition de la croissance des populations d'organismes testés.
- Écotoxicité du déchet solide (CE50 10%) : Essais sur les plantes et les vers de terre. Le déchet est considéré « écotoxique » si une concentration inférieure ou égale à 10 % de déchet dans un substrat de sol artificiel cause 50 % de mortalité dans la population de vers de terre ou 50 % d'inhibition de la germination et de la croissance des végétaux mis en expérimentation. [41].

Le paramètre généralement calculé correspond à la valeur de la concentration théorique entraînant un effet sur 50 % des organismes testés. Il s'agit de :

- la CL50 (concentration létale) pour des tests de mortalité (vers de terre).
- la CI50 (concentration inhibitrice) ou CE50 (concentration efficace) lorsque les effets observés sont des paramètres discrets (mobilité, germination) ou continus (croissance des végétaux, luminescence) [51].

Notons que, la composition chimique est utilisée uniquement comme critère positif d'attribution du caractère dangereux pour l'environnement et ne permet pas de conclure qu'un déchet est « non dangereux pour l'environnement ». Les bio-essais sont utilisés comme :

- *Critère positif* : Une réponse positive à au moins un des tests d'écotoxicité permet de classer le déchet comme « dangereux pour l'environnement » ;
- *Critère négatif* : Une réponse négative à tous les tests d'écotoxicité est requise pour classer le déchet comme « non dangereux pour l'environnement ».

La normalisation, et particulièrement celle des essais d'écotoxicologie, a progressé depuis 1998. La description des essais tient compte de l'état actuel des normes.

Pour apporter une aide aux prescripteurs d'analyses ainsi qu'aux utilisateurs des résultats, l'ADEME (Agence française De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie), en collaboration avec POLDEN et l'INERIS, ont élaboré un guide méthodologique de bonnes pratiques des essais d'écotoxicologie dans le domaine des déchets [25].

Test Norme	Seuils H14 (%)*	Organisme	Espèce	Niveau trophique	Critère de toxicité
Microtox 30 min NF EN ISO 11348-3	CE50 < 10	Bactérie	Vibrio fischeri	Décomposeur	Inhibition de luminescence
Daphnies 48 h NF EN ISO 6341 (T90-301)	CE50 < 10	Microcrustacé	Daphniamagna Straus	Consommateur primaire	Mobilité
Algues 3 jours NF T90-375	CE20 < 0,1	Algue unicellulaire	Pseudokirchneriella subcapitata	Producteur primaire	Croissance
Cériodaphnies 7 jours NF T90-376	CE20 < 0,1	Microcrustacé	Ceriodaphnia dubia	Consommateur primaire	Survie et reproduction
Plantes ISO 11269-2	CE50 < 10	Végétaux supérieurs	2 espèces à choisir dans une liste	Producteur primaire	Émergence et croissance
Vers de terre ISO 11268-1	CE50 < 10	Lombriens	Eisenia fetida	Consommateur primaire	Mortalité
* « % d'éluat » pour les tests Microtox, daphnies, algues et cériodaphnies ; « % de déchet » pour les essais sur plantes et vers de terre.					

Tableau I.16. Batterie de bioessais composant le projet de 1998 de procédure H14 du ministère

b. Méthodologie VNF

Devant l'absence des valeurs seuils reconnaissant juridiquement la définition du degré de pollution des sédiments, VNF a mis en place en la collaboration avec IRSTEA³ (Ex CEMAGREF) et CETMEF⁴ sa propre méthodologie de détermination des seuils en fonction de la toxicité des substances identifiables dans les sédiments. Trois critères permettant d'aboutir à la caractérisation du sédiment ont été mis en évidence : la contamination, la dangerosité et l'inertage d'un sédiment donné.

Critère	Techniques d'analyse
Contamination	Calcul de l'indice de risque QSm
Dangerosité	Test écotoxicologique Brachionus Calyciflorus
Inerte	Test de lixiviation

Tableau I.17. Les trois critères identifiés par VNF

i. Indice de risque QSm

L'indice de risque QSm permet d'évaluer les effets de mélanges de polluants en les rapportant au nombre de contaminants, et de comparer les échantillons entre eux. Il s'écrit sous la forme suivante :

$$QSm = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Ci}{Si}}{n} \quad \text{Eq. I. 1}$$

Avec :

C_i : concentration du polluant *i* dans les sédiments.

S_i : valeur seuil du polluant *i* [l'arrêté du 9 août 2006, J.O. n°222].

n : nombre de polluants mesurés.

- **Si QSm > 0,5** : les sédiments présentent un risque non négligeable et nécessitent un diagnostic approfondi.
- **Si 0,1 < QSm < 0,5** : les sédiments présentent un risque faible, toutefois leur non dangerosité doit être vérifiée.
- **Si QSm < 0,1** : les sédiments présentent un risque négligeable pour le milieu aquatique et la probabilité d'effets toxiques des sédiments est réduite.

³ Institut de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture

⁴ Centre d'Études Techniques Maritimes et Fluviales

Ainsi lorsque l'indice $QSm > 0,1$, la dangerosité doit être vérifiée à travers des essais sur le test *Brachionus calyciflorus* normalisé NF T90-377. Notons que c'est le test écotoxicologique minimum à réaliser. Lorsque les sédiments présentent une pollution importante sur sédiments bruts, d'autres tests écotoxicologiques peuvent être menés comme le test de bioaccumulation ou *Daphnies*.

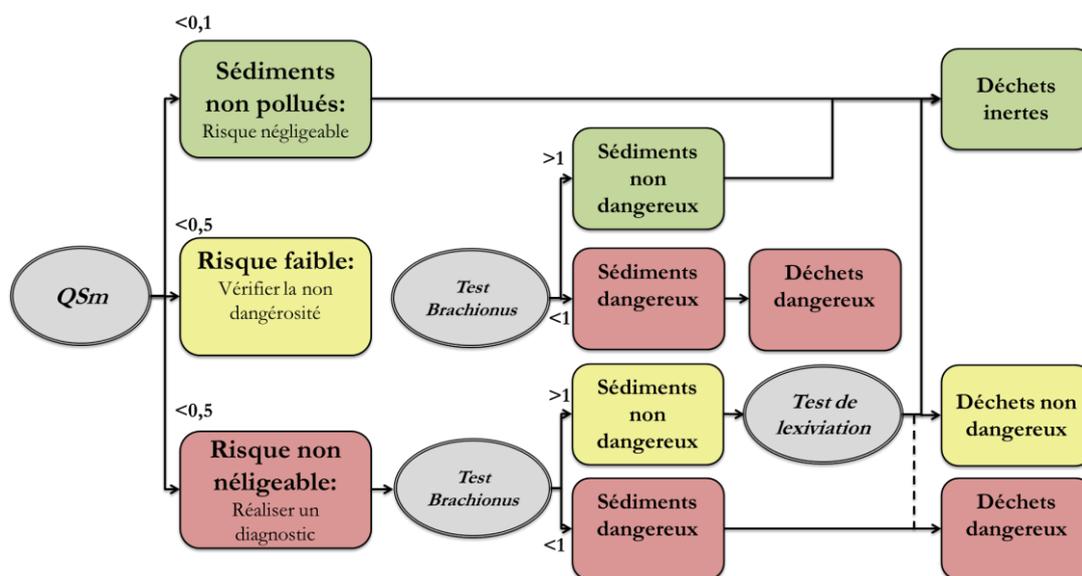


Figure I.7. Schéma simplifié du protocole de caractérisation des sédiments selon leurs indices de risque

ii. Essai *Brachionus*

Le test *Brachionus calyciflorus* normalisé [NF T90-377] vise à mesurer les effets de l'eau interstitielle des sédiments sur la reproduction des organismes pendant 48 h. À partir du lixiviat du sédiment à analyser, une gamme d'échantillons de concentrations différentes (0 à 100 %) est préparée. Les individus (*Brachionus calyciflorus*) sont mis en contact avec ces échantillons. Au bout de 48h, nous observons à quelle concentration 20% des individus sont inhibés (blocage de la reproduction). Le paramètre ainsi mesuré est le CI20 [41].

Sur base de la circulaire interne de VNF, les sédiments sont classés de la façon suivante :

- Si test (CE 20c-48 h) < 1% (il faut moins de 1% du lixiviat du produit pour avoir une inhibition de 20% de la population) alors le sédiment est écotoxique et donc dangereux ;
- Si test (CE 20c-48 h) > 1% (il faut plus de 1% du lixiviat du produit pour avoir un impact), alors le sédiment est non écotoxique et donc non dangereux.

iii. Essai *daphnies* (24 ou 48 h)

La norme NF EN ISO 6341 (T90-301) est généralement applicable :

- aux substances chimiques solubles ou pouvant être maintenues en suspension ou en dispersion stable dans les conditions de l'essai.
- aux effluents industriels et urbains, épurés ou non.
- aux eaux de surface et aux eaux souterraines. [52]

Les daphnies sont des microcrustacés d'eaux douces. Elles servent à l'évaluation d'un effet toxique par mesure de l'inhibition de la mobilité sachant que celle-ci précède généralement la mort. [53]

Les essais se réalisent généralement sur des *Daphnia magna* âgées de moins de 24 h. L'expérimentation se déroule dans des récipients maintenus à 20 ± 2 °C à l'obscurité ou sous des cycles jour/nuit de 16 h/8 h. La durée d'exposition est de 24 ou 48 h. À l'issue de la période d'essai, les daphnies mobiles sont dénombrées [51]. Ainsi, la concentration de l'échantillon qui immobilise 50 % des *Daphnia magna* est déterminée. Cette concentration, dite concentration efficace inhibitrice, est désignée par « **CE50-t** », où *t* représente la durée d'exposition (24 ou 48 h).

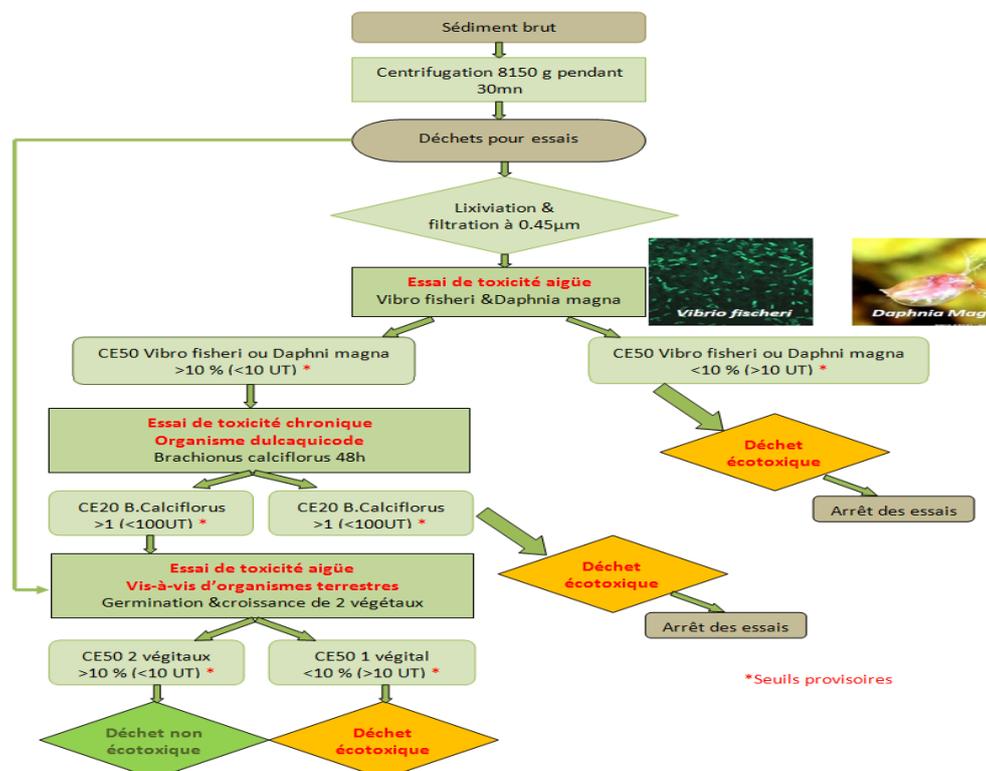


Figure I.8. Protocole V.N.F pour la mesure du paramètre H14

1.6.2. Réglementation Européenne

À l'échelle mondiale, la gestion de l'eau est largement entachée par la pollution et malgré les efforts de dépollution engagés, nous constatons une lente dégradation de la qualité de l'eau ainsi qu'une réduction de la qualité biologique des milieux aquatiques.

La Directive 2000/60/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 octobre 2000 ont donc établi un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau, dite «Directive Cadre sur l'Eau» (DCE), entrée en vigueur en décembre 2000. Cette directive s'applique principalement aux pays membres de l'Union Européenne et définit un nouveau cadre dans le domaine de l'eau en vue d'une meilleure gestion des milieux aquatiques. Son objectif général est d'atteindre en 2015 un bon état chimique et écologique des eaux de surface et souterraines. [84].

La DCE gère la majorité des législations communautaires antérieures relatives à l'eau et elle établit un calendrier commun aux États membres pour son application. Ce calendrier conduit les États à financer et à engager des actions pour que la qualité de l'eau des rivières, des nappes souterraines et du littoral s'améliore réellement. [54]

L'article 8 de la DCE définit un programme de surveillance des masses d'eau mené d'un plan de gestion, de manière à dresser un tableau cohérent et complet de l'état des eaux au sein de chaque bassin hydrographique. Pour répondre à cette demande, chaque bassin hydrographique a ainsi défini différents réseaux de contrôles dans le cadre des Schémas Directeurs des Données sur l'Eau (SDDE) effectués par la circulaire du 26 mars 2002 du Ministère chargé de l'Environnement (MEEDDM⁵).

Le programme de surveillance défini par la DCE comprend quatre types de contrôles :

- Le contrôle de surveillance définissant les paramètres biologiques et physico-chimiques précisés par l'arrêté du 25 janvier 2010 et modifiés par l'arrêté du 29 juillet 2011 pour établir le programme de surveillance.
- Le contrôle opérationnel, mis en place sur les masses d'eau à risque de non-respect des objectifs environnementaux et qui porte sur les paramètres responsables de la mauvaise qualité des masses d'eau.
- Le contrôle d'enquête, servant à rechercher les causes d'une mauvaise qualité en l'absence de réseau opérationnel, ou à évaluer l'incidence d'une pollution accidentelle.

⁵ Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de la Mer

- Le contrôle additionnel, ayant pour but de vérifier les pressions qui s'exercent sur les zones protégées ou soumis à une réglementation européenne [55].

1.7. Voies de valorisation des sédiments dans le génie civil

En fonction de leur nature granulométrique et de leur composition chimique, plusieurs voies de valorisation peuvent être envisagées. L'École des Mines de Douai a mené des recherches afin de trouver des voies de valorisation des sédiments en génie civil. Plusieurs pistes ont été étudiées dans des travaux de thèses telles que les assises de chaussée, le béton et les granulats artificiels ; et on a même passé à l'étape de la réalisation comme l'exemple de la route de Freycinet 12 [12]. Il y a cependant de nouvelles pistes qui restent en cours d'étude comme la valorisation en éco-modélé paysager.

1.7.1. Valorisation des sédiments dans la construction des routes

Le curage des sédiments est nécessaire pour maintenir une navigation fluviale fluide mais les sédiments extraits sont souvent pollués. Plusieurs projets de recherche ont permis la mise au point d'un procédé pour les traiter et permettre ainsi d'envisager une valorisation permettant de retirer tous les métaux lourds des fines des sédiments et d'en détruire leur matière organique.

De même, des travaux de réalisation à l'échelle industrielle ont eu lieu notons à titre d'exemple la route de Freycinet 12 et le plot expérimental à Dunkerque [12] et [5].

D'un point de vue mécanique, les mélanges réalisés avec les sédiments sont conformes aux normes routières. Les tests environnementaux sur les matériaux incorporant les sédiments traités montrent que le relargage est similaire à celui sur matériaux témoins.

À cet effet, les sédiments fluviaux sont valorisés en techniques routières puisqu'ils répondent aux normes environnementales et aux résistances mécaniques pré-requises.

1.7.2. Valorisation des sédiments dans la fabrication des briques cuites

L'incorporation de sédiments dans les produits de terre cuite et dans la céramique rouge est de nos jours une solution environnementale très prometteuse pour répondre au problème de valorisation d'une grande variété de déchets solides. Plusieurs types de déchets ont été utilisés comme matière première pour la fabrication de brique cuite.

Les recherches de valorisation des sédiments fluviaux dans le domaine de fabrication des briques cuites nous indiquent que 35% de la quantité totale de sable dans une brique cuite peut

être remplacée par des sédiments [2]. Ces nouvelles briques cuites possèdent des propriétés physicochimiques et environnementales très satisfaisantes.

Aujourd'hui, il existe un procédé breveté au niveau national : Procédé VBC 3000 – brevet 04 022 88. Ce procédé n'a pas trouvé aujourd'hui de développement ou de part de marché certainement à cause des coûts d'exploitations de cette méthode et des processus de mise en ouvres utilisés.

À l'échelle européenne, on peut citer la briqueterie allemande HZG Jan Peter Ulbricht qui est une usine spécialement conçue pour produire plus de cinq millions de briques à partir des sédiments de dragage du port de Hambourg. Le but de cette usine était de prouver que la fabrication de briques avec des sédiments était techniquement faisable, écologiquement durable et économiquement viable.

1.7.3. Valorisation des sédiments en éco-modélé paysager

Dans le cadre de notre projet, nous allons tenter d'étudier le potentiel de valorisation des sédiments fluviaux (LMCU) pour la création d'un éco-modélé paysager, du point de vue de son comportement mécanique et de sa stabilité. Il est à signaler que ces ouvrages, en plus de leur esthétique dans le paysage, permettent d'atténuer les bruits engendrés par la circulation qui perturbe la population proche des grands axes routiers, sachant que la loi « Bruit » de décembre 1992 oblige en effet les maîtres d'ouvrage des infrastructures à résoudre les impacts sonores par l'installation de protections acoustiques et une amélioration du cadre de vie.

1.7.4. Valorisation des sédiments en mortier et en béton

L'une des filières les plus étudiées par Mines Douai est la valorisation des sédiments en béton : Plusieurs travaux de thèses ont fait l'objet d'étude de sédiments pour l'élaboration de béton [12] ; [14] ; [56].

Ces travaux ont montré la possibilité de confection de matériaux cimentaires à base de sédiments de dragage. D'autres travaux ont fait l'objet de la réalisation de mortier et l'étude de son comportement à partir des sédiments traités par un procédé industriel [18]. Ils également démontré que les sédiments peuvent remplacer une partie du sable et/ou une partie du ciment, et les fines peuvent remplacer une partie de l'argile naturelle dans la fabrication du ciment. [14].

1.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons défini les sédiments et leurs types, les différentes opérations et moyens de curage nécessaires pour entretenir les cours d'eau et les voies navigables ainsi que les différentes filières de gestion de ces sédiments.

Le problème de pollution de ces sédiments nous pousse à trouver de nouvelles voies de valorisation en génie civil tout en satisfaisant les exigences techniques, économiques et environnementales. Ces voies de valorisation doivent également satisfaire les réglementations françaises et européennes qui sont devenues de plus en plus contraignantes quant à la gestion à terre des sédiments pollués.

Ces sédiments de dragage pollués sont donc considérés et traités en tant que déchets, et leur immersion n'est souvent pas autorisée vu qu'ils peuvent endommager la faune et la flore marine. Il faut donc s'assurer que leur utilisation en génie civil ne cause pas d'impacts nuisibles pour l'environnement ni pour la santé publique.

Dans ce contexte, et toujours dans la démarche de valorisation des sédiments en génie civil, les sédiments faisant l'objet de cette thèse seront valorisés en couches routières, en éco-modèle paysager et dans des applications à base cimentaire. Pour cela, il nous a été nécessaire de faire toute une étude de caractérisation physico-chimique, mécanique et environnementale afin de pouvoir connaître leurs propriétés, leurs degrés de pollution et afin d'identifier les traitements adéquats à leurs valorisations. Ceci fera l'objet du deuxième chapitre.

Chapitre 2

APPROCHE EXPÉRIMENTALE DE CARACTÉRISATION

1.9. Introduction

Dans ce chapitre, une caractérisation physico-chimique, mécanique et environnementale a été effectuée sur trois différents sédiments fluviaux prélevés de la région Nord-Pas-de-Calais dans le but de bien les identifier, les classer selon des guides techniques et évaluer leurs impacts environnementaux. Ces sédiments sont le sédiment du bras des près du Hem, le sédiment du bras de la Deûle et le sédiment du bras de la Croix. En fonction des résultats obtenus, cette caractérisation nous permettra d'optimiser l'adéquation sédiments-filière de valorisation.

1.10. Sites de prélèvement des sédiments fluviaux LMCU

1.10.1. Bras des près du HEM (SH)

Le premier sédiment fluvial, que nous allons étudier, provient du bras des près du HEM à Armentières qui est un lac artificiel créé à la fin des années 1970 pour constituer une réserve hydraulique pour la région de Lille. Il compte plus de 120 hectares de nature et qui se trouve à quelques minutes du cœur de Lille Métropole. Les 5 prélèvements, effectués au milieu d'un lac à la benne, ont été réalisés en Mars 2012 et sont représentés sur la figure ci-après.



Figure II.1. Site de prélèvement des sédiments fluviaux du bras des près du HEM

1.10.2. *Bras de la Deûle (SD)*

Situé à la frontière de Saint André-les-Lille, la Madeleine et Lille, le bras de la Deûle se trouve dans un contexte industriel et urbain très prononcé présentant une pollution généralisée de ses sédiments sur l'ensemble de son linéaire. Il compte quatre points de rejets d'eaux pluviales et deux fossés.

Aujourd'hui, ce parc d'activités industrielles compte une entreprise de négoce de matériaux de construction, une entreprise de traitement du bois et une station de pompage. Ces industries sont à l'origine d'un risque de pollution estimé moyen. 5 prélèvements ont été réalisés au milieu de ce canal dans des zones bien déterminées.



Figure II.2. Site de prélèvement des sédiments fluviaux du bras de la Deûle

1.10.3. *Branche de la Croix (SC)*

Le canal de la branche de la Croix se trouve au croisement entre les communes de Wasquehal, Croix et Villeneuve d'Ascq. C'est un véritable écosystème en effervescence caractérisé par son histoire industrielle, ses activités en mutations et son paysage.



Figure II.3. Site de prélèvement des sédiments fluviaux de la branche de la Croix

Quant aux quantités de sédiments utilisées le long de ces travaux de thèse, elles nous ont été fournies comme suit :

Point de curage	Désignation	Période	Quantité
Bras des près du Hem	SH	Mars 2012	15 fûts de 34 litres
Bras de la Deûle	SD	Déc 2012	17 fûts de 34 litres
Branche de la Croix	SC	Nov 2013	39 fûts de 34 litres

Tableau II.1. Quantité de sédiments prélevés

1.11. Caractérisation des sédiments fluviaux LMCU

1.11.1. Caractérisation physique

1.11.1.1. La teneur en eau : (NF P 94-050)

La teneur en eau définit l'état hydrique d'un matériau en fonction de la porosité et la perméabilité du sol. Elle est déterminée par la perte en masse, dans des conditions définies, résultant du processus de séchage spécifié [19]. Elle est le rapport de la masse de l'eau par rapport à la masse sèche d'un échantillon et elle s'exprime en pourcent ou en grammes par kilogramme, désignée par W :

$$W(\%) = \frac{m_w}{m_s} = \frac{m_h - m_s}{m_s} \times 100 \quad \text{Eq II. 1}$$

Avec :

- m_w : c'est la masse de l'eau d'un échantillon ;
- m_h : définit la masse humide d'un échantillon ;
- m_s : la masse sèche d'un échantillon.

La teneur en eau a été déterminée pour les 3 sédiments fluviaux SH, SD et SC à l'étuve à 105°C pour une durée minimale de 4h comme l'indique la norme NF P 94-050.

Nous avons aussi déterminé la siccité de chaque sédiment qui se définit comme le pourcentage massique de matière sèche ou l'inverse du taux d'humidité. Le suivi de ce taux permet de connaître la stabilité d'une boue et évaluer sa consistance. La siccité notée S s'écrit généralement sous cette forme :

$$S(\%) = \frac{m_s}{m_h} \times 100 = \frac{1}{1+w} \times 100 \quad \text{Eq II. 2}$$

Avec : w : la teneur en eau de l'échantillon.

Les mesures de teneur en eau et de la siccité ont été réalisées selon la norme NF P 94-050 sur deux échantillons. Les résultats moyens obtenus sont reportés dans le Tableau II.2:

	SH			SD			SC		
W	129,43	137,55	131,46	78,28	87,53	83,69	234,5	229,45	233,5
W_{moy} (%)	133,49			83,16			232,48		
S_{moy} (%)	42,82			54,59			30,07		

Tableau II.2. Mesure de la teneur en eau des sédiments fluviaux

Comme mentionné dans le tableau, on remarque bien la grande différence entre les teneurs en eau des trois sédiments. Cette différence est due principalement à la nature de chaque sédiment ainsi que les techniques de dragage utilisées.

1.11.1.2. Masse volumique des particules solides (ρ_s) : (NF P 94-054)

Un sol étant composé de grains solides, d'eau et de l'air, on peut rassembler chaque phase en volume partiel.

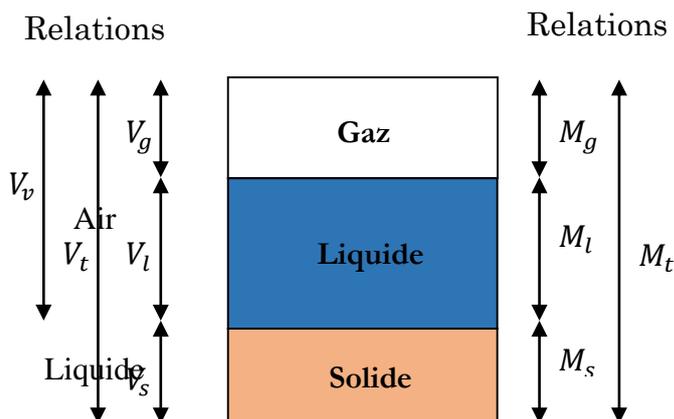


Figure II.4. Composition générale d'un sol donné

- Avec :
- V_t : Volume total de l'élément considéré
 - V_s : Volume des particules solides
 - V_l : Volume de la phase liquide
 - V_g : Volume de la phase gazeuse
 - V_v : Volume des vides
 - M_t : Masse totale
 - M_s : Masse de la phase solide
 - M_l : Masse de la phase liquide
 - M_g : Masse de la phase gazeuse

La masse volumique des grains solides ρ_s est le rapport de la masse des grains solides m_s correspondant au volume V_s du matériau.

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} \quad \text{Eq II. 3}$$

Type de sol	Masse volumique
Sols minéraux	$2,6 \text{ g/cm}^3 < \rho_s < 2,7 \text{ g/cm}^3$
Matière organique	$1,2 \text{ g/cm}^3 < \rho_s < 1,5 \text{ g/cm}^3$
Sols organiques (MO > 30%)	$1,4 \text{ g/cm}^3 < \rho_s < 2,0 \text{ g/cm}^3$
Eau (4°C)	1.0 g/cm^3
Air	$0,001 \text{ g/cm}^3 < \rho_s < 0,0015 \text{ g/cm}^3$

Tableau II.3. Masse volumique réelle de quelques sols et constituants

Dans notre étude, la masse volumique absolue a été déterminée par un pycnomètre à hélium de type Accupyc 1330 (Micromeritics). L'Accupyc 1330 est un pycnomètre à déplacement

de gaz qui mesure le volume de solide V_S d'un échantillon de poudres de masse connue en s'appuyant sur la loi des gaz parfaits :

$$pV = nRT \quad \text{Eq II. 4}$$

Où :

- p est la pression du gaz (en pascal) ;
- V est le volume occupé par le gaz (en mètre cube) ;
- n est la quantité de matière (en mole) ;
- R est la constante universelle des gaz parfaits : $R = 8,3144621 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$;
- T est la température absolue (en kelvin).

Ce pycnomètre à hélium vient remplacer les pycnomètres à liquides avec un avantage d'éviter le gonflement du matériau étudié et donc permettre une détermination plus précise de la masse volumique [57]. La mesure a été effectuée sur un matériau broyé et séché à 40°C. Les résultats sont regroupés dans le Tableau II.4.

Masse Volumique (g/cm ³)			
Sédiment	SD	SH	SC
Masse volumique	2,531	2,487	2,381
Moyenne	2,466		

Tableau II.4. Masse volumique absolue

Généralement, la masse volumique est liée à la teneur en matière organique. Lorsque la teneur en matière organique augmente, la masse volumique diminue [58]. Pour le cas des sols minéraux, la masse volumique des particules solides ρ_S présente est voisine de 2.7 t/m³ tant dis que celle calculée pour nos sédiments fluviaux était de l'ordre de 2.466 g/cm³. On suppose que les sédiments fluviaux contiennent un pourcentage de matière organique. L'essai de détermination de la Matière Organique nous permettra de confirmer ces constatations.

1.1.1.1. Valeur au bleu de méthylène : (NF P 94-040) ; (NF P 94-068)

La valeur de bleu est déterminée à l'aide des normes NF P94 040 et NF P 94-068. Cet essai exprime la quantité de bleu de méthylène absorbée par les particules d'un sol donné. Cette quantité est dite la valeur au bleu, notée VBS et exprimée en grammes de bleu par grammes de sol, tel que montre l'équation 1.4. Il est utile de préciser que la VBS s'applique à tous les sols

puisque c'est une grandeur qui exprime globalement la quantité et l'activité de l'argile contenue dans l'échantillon de sol et elle est nécessaire pour sa classification selon «Le guide technique de réalisation des remblais et des couches de forme, GTR 1992 ».

$$VBS = \frac{B}{m_0} \times 100 \text{ (ml/g)} \quad \text{Eq II. 5}$$

Où : B : Masse de bleu introduite (solution à 10 g/l) avec $B = V \times 0.01$ Eq II. 6

m_0 : Masse sèche de la prise d'essai avec $m_0 = \frac{m_h}{1+w}$ Eq II. 7

On considère que cet essai exprime globalement la quantité et la qualité de l'argile contenue dans un sol. En pratique, on détermine la VBS sur la fraction 0/5 mm, la valeur trouvée est rapportée à la fraction 0/50 mm par une règle de proportionnalité.

L'essai a été réalisé sur 3 échantillons différents en provenance des Bras du Hem, la Deûle et la Croix. Les résultats des mesures de VBS sont reportés dans le Tableau II.5:

	SH	SC	SD
V.B.S (g/100g)	1,99	3,42	0,53

Tableau II.5. Valeur du bleu pour les différents sédiments fluviaux

Valeur de VBS	État du sol
$VBS \leq 0.2$	Sols sableux (sol insensible à l'eau)
$0.2 < VBS \leq 2.5$	Sols limoneux (sol peu plastique et sensible à l'eau)
$2.5 < VBS \leq 6$	Sols limono-argileux (sol de plasticité moyenne)
$6 < VBS \leq 8$	Sols argileux
$VBS > 8$	Sols très argileux

Tableau II.6. Classification de l'argile d'un sol selon VBS



Figure II.5. Classification des sédiments en fonction de VBS

Les valeurs de bleu obtenues lors de l'essai présentent différents états de sols pour les sédiments étudiés. Le sédiment de la Croix est considéré comme un sol limoneux-argileux, cependant le sédiment du Hem et celui de la Deûle avec leur faible teneur en argile sont classés comme un sol limoneux.

1.1.1.2. *Analyse granulométrique (NF ISO 13320-1)*

L'essai d'analyse granulométrique permet essentiellement de déterminer et répartir la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles des grains d'un échantillon, de diamètres compris entre 0 et 80mm [1].

Les techniques d'analyse granulométrique sont multiples. Elles sont basées sur des principes variés : séparation mécanique (tamisage) ou par l'intermédiaire d'un fluide, gaz ou liquide, variation de résistance électrique, imagerie, diffraction ou absorption de rayonnements.

Dans cette étude, l'analyse granulométrique des sédiments a été réalisée par diffraction de rayon laser. La granulométrie laser existe depuis les années 70. Cette technique sert à mesurer la taille des particules, ou plus précisément leurs rayons, et déterminer leur fréquence statistique en fonction de leur taille. Elle peut mesurer des diamètres compris entre $0,05\mu\text{m}$ et $900\mu\text{m}$. [59].

Son principe est basé principalement sur la diffraction de la lumière. Elle s'appuie sur la théorie de Fraunhofer⁶ qui utilise les hypothèses suivantes :

- considérer les particules sphériques non poreuses et non opaques. Ces particules ont un diamètre supérieur à la longueur d'onde et sont animées d'un mouvement aléatoire.
- Les particules diffractent la lumière de la même efficacité indépendamment de leur taille. Lorsqu'un faisceau laser éclaire une particule, on peut observer des franges de diffraction. Selon Fraunhofer, l'intensité du rayonnement diffracté et l'angle de diffraction sont fonction de la taille des particules.
- Plus la particule est grosse, plus elle dévie de lumière, et plus l'angle de déviation par rapport à la propagation sera faible.

Notre essai a été réalisé à l'aide d'un granulomètre laser de type *Coulter LS 230* qui permet d'identifier des particules avec des tailles comprises entre $0,04\mu\text{m}$ et $2000\mu\text{m}$. Pour chaque

⁶ **Joseph Von Fraunhofer** : Opticien et physicien allemand (1787 - 1826), inventeur du spectroscope avec lequel il repéra les raies du spectre solaire.

sédiment, une série d'analyses a été effectuée. Les courbes granulométriques de nos sédiments fluviaux sont illustrées sur la Figure II.6.

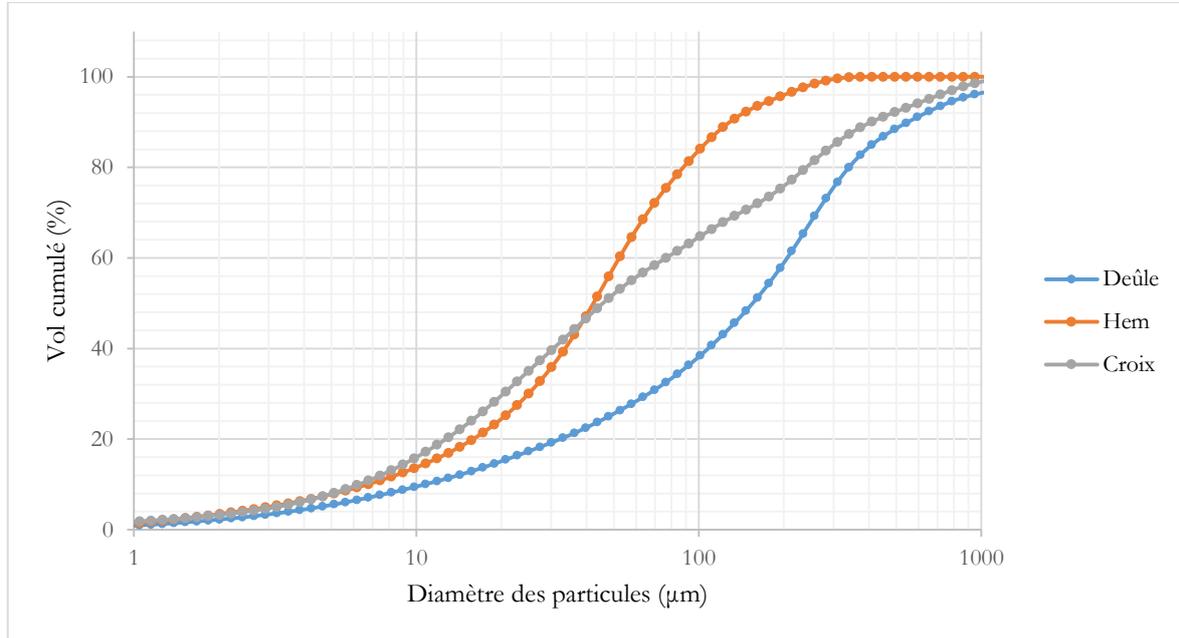


Figure II.6. Courbes granulométriques des sédiments fluviaux étudiés

À partir de ces différentes courbes granulométriques, nous avons pu déterminer leurs classes en fonction des tailles et des distributions des particules de grains. Et pour mieux connaître le type de granulométrie des sédiments et son degré d'étalement, nous avons déterminé le facteur d'uniformité C_u et le coefficient de courbure C_c avec :

$$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad \text{Eq II. 8}$$

$$C_C = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}} \quad \text{Eq II. 9}$$

(D_X : Étant la dimension du tamis correspondant à X% de passant).

- Si $C_U < 2$: la granulométrie est dite uniforme (ou serrée).
- Si $C_U > 2$: la granulométrie est dite étalée (ou variée).
- Si $1 < C_C < 3$: la granulométrie est bien graduée.

Lorsque certaines conditions sur C_U et C_C sont satisfaites, le sol est dit bien gradué c'est à dire que sa granulométrie est bien étalée, sans prédominance d'une fraction particulière. Quand sa granulométrie est discontinue, avec prédominance d'une fraction particulière, il est dit mal gradué.

Les sols bien gradués constituent des dépôts naturellement denses avec une capacité portante élevée. Ils peuvent être aisément compactés en remblais et forment des pentes stables. Les résultats obtenus sont récapitulés dans le Tableau II.7 :

Taille des grains	Classification	SH	SC	SD
Grains < 2µm	Argile	3.5 %	3,3 %	2,25 %
2µm < Grains < 63µm	Limons	65 %	53,5%	27 %
63µm < Grains	Sable	31,5 %	43,2%	70,75 %
D ₁₀		7	6	10
D ₃₀		25	20,5	69
D ₆₀		52	80	210
Cu		7,42	13,33	21
Cc		1,71	1,93	2,26
Type de granulométrie	Granulométrie étalée bien graduée – continuité bien répartie			

Tableau II.7. Caractéristiques granulométriques des sédiments de dragage

À partir des résultats d'analyse granulométrique, on peut classer nos sédiments fluviaux en fonction des pourcentages des argiles, des limons et des sables et à travers le triangle des textures (Figure II.7). Le sédiment du bras du HEM est classé comme étant un sol limoneux moyennement sableux, le sédiment de la Deûle est classé en sablo-limoneux, tandis que celui de la Croix est considéré comme limoneux-sableux (ou aussi légèrement sableux).

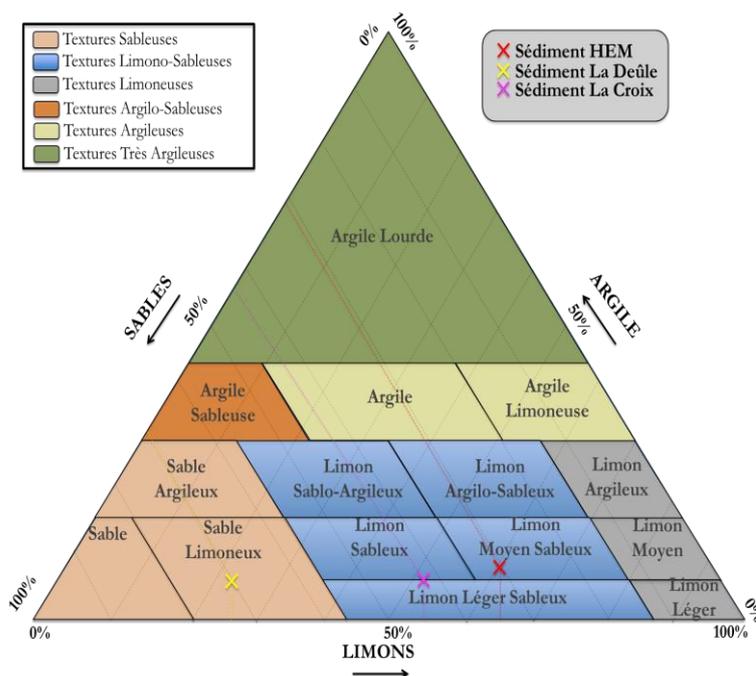


Figure II.7. Classification granulométrique des sédiments

1.1.1.3. Limites d'Atterberg: (NF P94-051)

Le passage d'un état à un autre est généralement très progressif, c'est pourquoi il était nécessaire de fixer une limite de chaque état. L'ingénieur suédois Atterberg a donc défini en 1911, des teneurs en eau limites séparant le passage du sol d'un état de consistance à un autre. Ces teneurs en eau sont ainsi appelées limites de consistance ou limites d'Atterberg.

L'essai de limite d'Atterberg est considéré comme un élément important d'identification des sols, qui permet déjà de prévoir certaines propriétés et déterminer ses états de consistance.

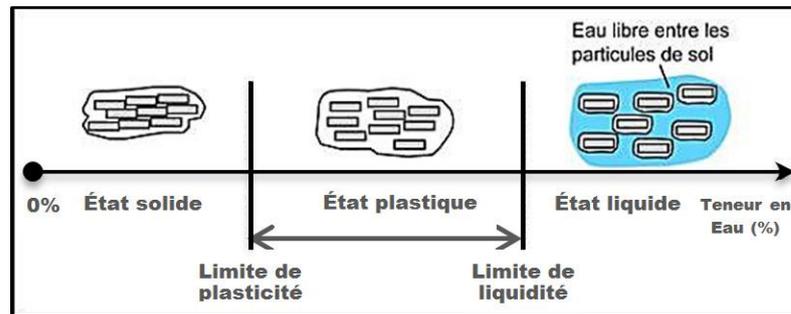


Figure II.8. Les états de consistance d'un sol

- *Limite de liquidité* (W_L) : c'est la teneur en eau (pourcentage) à laquelle le sol passe de l'état liquide à l'état plastique.
- *Limite de plasticité* (W_P) : La limite de plasticité W_P définit la transition entre l'état solide et l'état plastique. Cette limite indique la teneur en eau maximale nécessaire pour un sol tout en évitant sa compaction.
- *Indice de plasticité* (I_P) : c'est le domaine situé entre les états de liquidité et de plasticité. Il est déterminé par la différence entre la limite de liquidité et la limite de plasticité :

$$I_p = W_L - W_P \quad \text{Eq II. 10}$$

a. *Limite de liquidité* : (norme NF P 94-051)

L'essai de limite de liquidité W_L consiste à déterminer la relation entre la teneur en eau et le nombre de chocs, imposé à une coupelle contenant le matériau, induisant la fermeture, sur 1cm, d'une rainure préalablement formé dans le matériau. Par définition, la limite de liquidité est la teneur en eau qui correspond à une fermeture sur un centimètre pour 25 chocs.

Comme il est difficile d’obtenir la fermeture à 25 coups, il existe une relation permettant de trouver W_L à partir d’un seul essai pour que le nombre de coups de fermeture soit compris entre 15 et 35. Cette relation s’écrit sous la forme :

$$w_L = w \left(\frac{N}{25} \right)^{0.121} \quad \text{Eq II. 11}$$

Avec :

w : La teneur en eau du matériau au moment de l’essai

N : Le nombre de coups correspondant à la fermeture du mortier sur 1 cm dans la coupelle.

	SH	SC	SD
WL_{25} (%)	69	78	34

Tableau II.8. La limite de liquidité des sédiments étudiés

b. Limite de plasticité W_P : (norme NF P 94 051) :

La limite de plasticité W_P est déterminée par la méthode du rouleau. Par définition, la limite de plasticité est définie comme la teneur en eau du cylindre qui se brise en 2 ou 3 morceaux au moment où son diamètre atteint 3mm. Elle est déterminée en se basant sur deux séries d’essais pour chaque échantillon.

	SH	SC	SD
W_P (%)	53,62	48,24	31,81

Tableau II.9. Limite de plasticité des sédiments fluviaux

c. Indice de plasticité :

L’indice de plasticité I_P mesure l’étendue du domaine de plasticité du sol caractérise la largeur de la zone où le sol étudié a un comportement plastique. Il s’exprime donc par la relation :

$$I_P = W_L - W_P \quad \text{Eq II. 12}$$

Un sol, qui a un grand indice de plasticité, est très sensible aux conditions atmosphériques car plus I_P est grand, plus le gonflement par humidification de la terre et son retrait par dessiccation seront importants. Donc I_P précise aussi les risques de déformation du matériau.

Indice de plasticité	État du sol
0 – 5	Non plastique
5 – 15	Peu plastique
15 – 40	Plastique
> 40	Très plastique

Tableau II.10. Classification d'un sol selon son indice de plasticité

	W _L (%)	W _p (%)	I _p (%)	Observations
SH	69	53,62	15,38	Sédiment plastique (argileux)
SC	78	48,24	29,76	Sédiment plastique (argileux)
SD	34	31,81	2,19	Sol non plastique

Tableau II.11. Classification de la consistance des sédiments fluviaux étudiés

Les sédiments sont ensuite identifiés sur l'abaque de classification des sédiments en fonction des limites d'Atterberg (Figure II.9). La ligne A sur l'abaque permet d'obtenir plusieurs classes de classification d'un sol donné, elle est déterminée par la formule suivante :

$$I_p = 0,73 (W_L - 20)$$

Eq II. 13

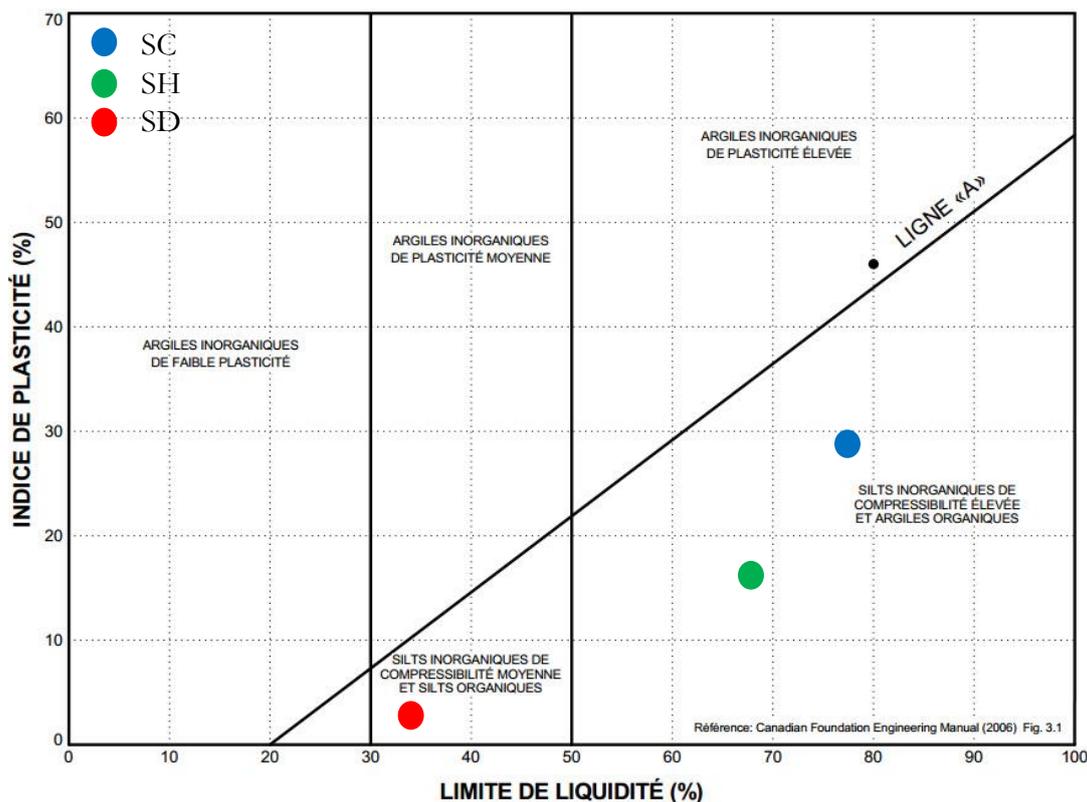


Figure II.9. Classification des sédiments en fonction des limites d'Atterberg

1.1.1.4. Teneur en matière organique et pertes au feu :

L'essai de teneur en M.O a été réalisé par calcination selon la norme XP P94-047 sur des échantillons séchés à 40°C et broyés. Après la calcination pendant 3h dans le four à une température fixée à 450°C, on mesure la teneur en M.O qui n'est autre que la proportion de masse perdue par rapport à la masse initiale.

Pour la perte au feu (PAF), on s'est référé à la norme NF EN 12879, La détermination est effectuée sur un échantillon préalablement séché dans le four dans une température égale à $(550 \pm 25)^{\circ}\text{C}$ pendant une durée de 3h. La valeur de la (PAF) est la différence de masse avant et après le processus de chauffage. Les résultats sont reportés dans le tableau suivant :

T (C°)	SH	SC	SD
450 C°	8,87	12,79	6,92
550 C°	9,44	14,06	7,86

Tableau II.12. Teneur en matière organique des sédiments

MO (%)	Qualificatif
$C_{MO} \leq 3$	Non organique
$3 < C_{MO} \leq 10$	Faiblement organique
$10 < C_{MO} \leq 30$	Moyennement organique
$C_{MO} > 30$	Très organique

Tableau II.13. Classification des sols par teneurs en matière organique

D'après les résultats obtenus, on note que les sédiments étudiés sont faiblement à moyennement organique avec une teneur en matière organique comprise entre 7% (sédiment de la Deûle) et 14% (sédiment de la Croix). Ces proportions restent tout de même importantes et peuvent bloquer toute valorisation des sédiments étudiés (Exemple : La norme exige 3% de M.O comme pourcentage maximale à être présent pour une valorisation en technique routière, GTS). Des traitements préalables par ajout granulaire ou par ajout de liants hydrauliques sont donc nécessaires.

1.1.1.5. *Analyse thermogravimétrique (ATG)*

L'analyse thermogravimétrique (ATG) consiste à suivre la perte en masse d'un composé en fonction d'un cycle thermique de chauffage jusqu'à 1000°C ou plus. L'ATG permet d'identifier des produits ou gaz dégagés lors du cycle thermique. Cette technique permet aussi des informations sur la cinétique d'oxydation en corrosion à température élevée. La courbe obtenue met en évidence les pertes d'eaux et les phénomènes d'oxydation de la matière organique. La proportion du carbone inorganique est obtenue donc par la relation suivante :

$$C_{in} (\%) = \frac{M_C}{M_{CO_2}} \times \frac{\text{Perte de masse}}{\text{Masse échantillon}} \times 100 \quad \text{Eq II. 14}$$

Les résultats de l'analyse thermogravimétrique sur les trois sédiments sont illustrés sur les figures suivantes :

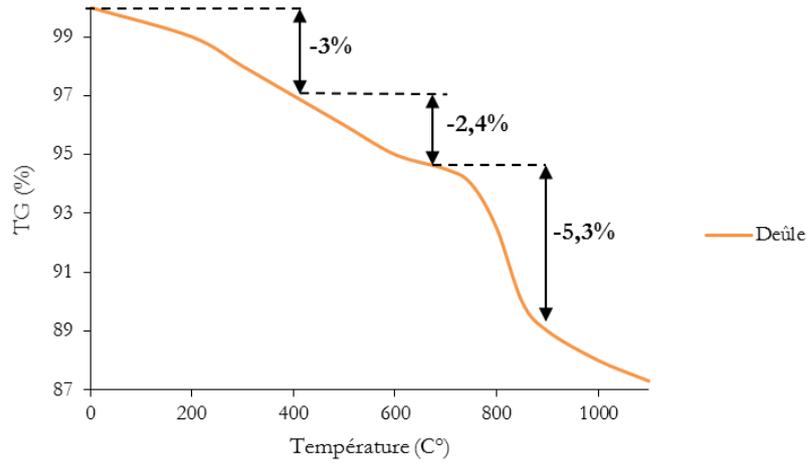


Figure II.10. Courbe thermogravimétrique du sédiment de la Deîle

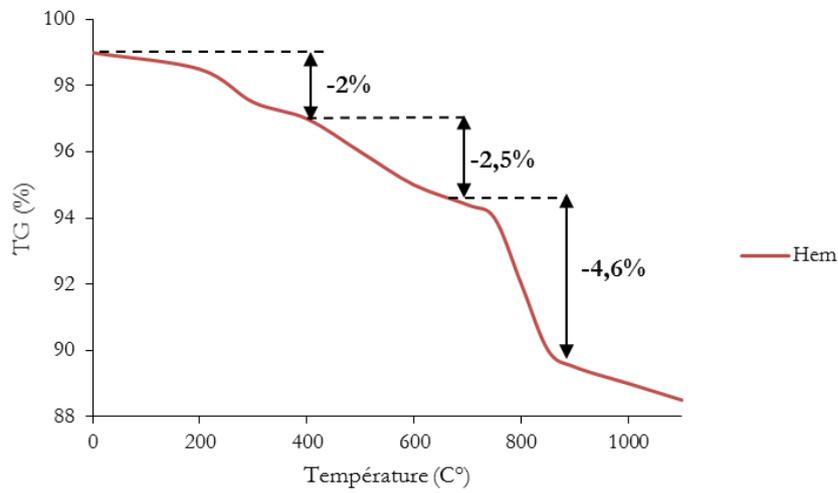


Figure II.11. Courbe thermogravimétrique du sédiment du HEM

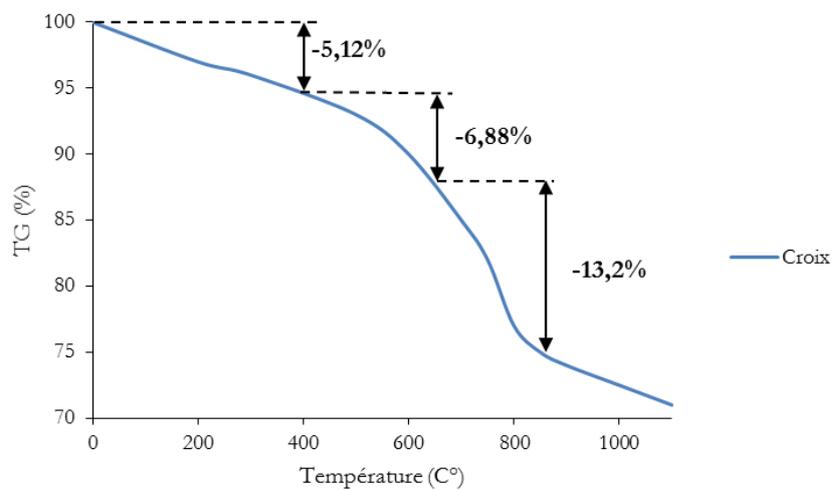


Figure II.12. Courbe thermogravimétrique du sédiment de Croix

Les courbes obtenues comportent différents paliers de perte de masse qui correspondent à :

- Une déshydratation : perte de l'eau adsorbée vers 100-200°C ;
- Détérioration de la matière organique entre 200 et 550°C.
- Dégagement du dioxyde de carbone CO₂ et décomposition de la phase calcite entre 600 et 800 °C. Les sédiments du Hem et de la Deûle présentent une perte de masse de 3% environ, tandis que celui de la Croix est plus carbonaté avec une perte de masse de 13%.

1.1.1.6. Teneur en carbone total (COT)

La quantification du carbone organique total (COT) est déterminée généralement par fluorescence aux rayons X, il est la somme du carbone organique et du carbone inorganique ou minéral. Dans l'impossibilité de déterminer la COT par notre propre analyseur du laboratoire, les échantillons de sédiments bruts ont été envoyés et mesurés à l'Institut Pasteur à Lille. Les résultats obtenus étaient comme suit :

	SH	SC	SD
COT (%)	4,89	9,11	4,56

Tableau II.14. Teneur en carbone total des sédiments Hem, Croix et Deûle

La teneur en carbone organique total du sol peut s'obtenir aussi en estimant que le rapport $\frac{\text{matière organique}}{\text{carbone}}$ est à peu près constant et égal à : $\frac{\text{M.O}(\%)}{\text{C}(\%)} = 1,72$. Il est important de signaler que ces deux méthodes d'essais présentent une légère différence au niveau des résultats obtenus. [1]

1.1.2. **Analyse minéralogique**

1.1.2.1. Diffraction aux rayons X

Les analyses minéralogiques consistent à déterminer les minéraux argileux et non argileux par diffraction aux rayons X, en utilisant un diffractomètre muni d'un monochromateur à anticathode de cuivre qui sert à émettre la radiation K α du cuivre. Cette méthode consiste à utiliser la propriété de diffraction d'un faisceau monochromatique de rayons X par les plans réticulaires, en se basant sur la loi de Bragg :

$$n\lambda = 2 d \sin \theta \quad \text{Eq II. 15}$$

Avec :

- n : nombre entier λ : 1,54Å°

- d : distance de deux plans réticulaires
- θ : angle d'incidence

a. *Détermination des minéraux non argileux*

Les minéraux non argileux sont déterminés à partir de l'analyse minéralogique du sédiment total par la « la méthode de poudre». Cette méthode consiste à irradier l'échantillon bien broyé par les rayons X.

Le pourcentage semi-quantitatif de chaque minéral est déterminé par le rapport de hauteur du pic principal du minéral sur la somme des hauteurs des pics principaux des autres minéraux présents.

b. *Détermination des minéraux argileux*

Les minéraux argileux sont déterminés par analyse des fractions fines concernées. Les minéraux sont reconnus sur les diffractogrammes grâce à leurs raies caractéristiques. La teneur semi quantitative de chaque minéral est déterminée en mesurant les surfaces des pics. [60].

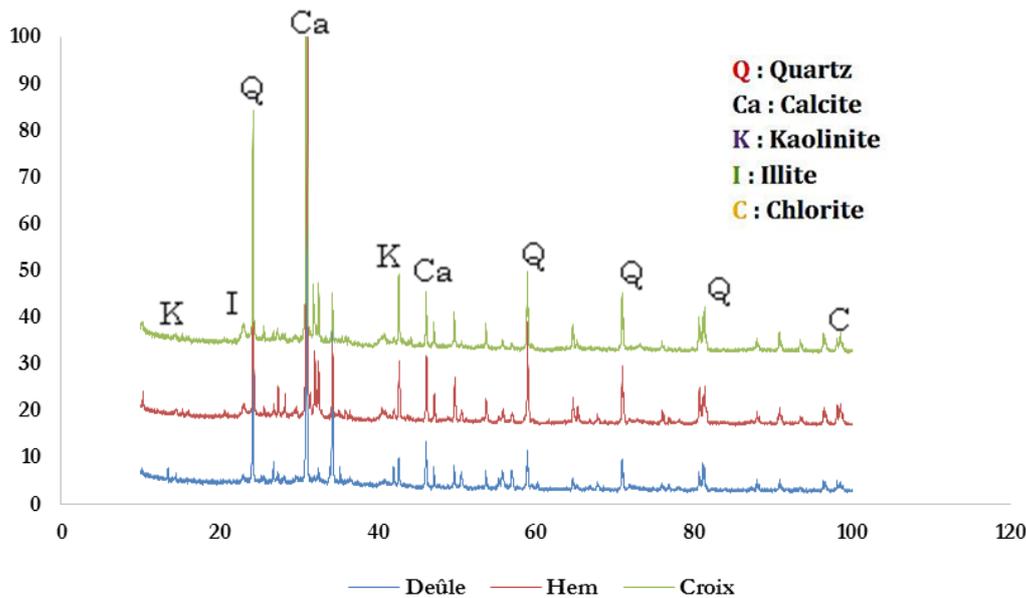


Figure II.13. Phases cristallines des sédiments étudiés

Les sédiments étudiés sont composés principalement de Quartz (Q) et de Calcite (Ca) avec quelques traces de Chlorite (C), Kaolinite (K) et d'Illite (I).

1.1.2.2. *Spectrométrie de Fluorescence par rayon X*

La spectrométrie de fluorescence X notée (FX) est une méthode d'analyse chimique élémentaire utilisant une propriété physique de la matière, la fluorescence de rayons X. Le spectre

des rayons X émis par la matière est caractéristique de la composition de l'échantillon, en analysant ce spectre, on peut en déduire la composition élémentaire, c'est-à-dire les concentrations massiques en éléments.

L'analyse du spectre peut se faire de deux manières :

- Par analyse dispersive en longueur d'onde (WD-XRF)
- Par analyse dispersive en énergie (ED-XRF).

L'analyse FX des sédiments en question a été effectuée au sein du laboratoire des analyses chimiques de l'EMD situé au département GCE2. Les résultats d'analyse sont reportés dans le Tableau II.15 :

Élément	SH	SC	SD
C	1,2	Déecté	Déecté
O	52,2	50,9	48,7
Na	0,6	0,5	0,5
Mg	0,6	0,8	0,7
Al	6,1	6,6	4,9
Si	27,6	28,0	18,1
P	0,4	0,6	2
S	0,3	1,0	3
Cl	0,0	0,1	0,1
K	1,8	2,1	1,3
Ca	5,6	4,4	13,3
Ti	0,4	0,5	0,5
Cr	Traces	Traces	Traces
Mn	Traces	Traces	Traces
Fe	2,8	3,9	5,5
Cu	Traces	Traces	Traces
Zn	Traces	0,1	0,5
Sr	Traces	Traces	Traces
Zr	Traces	Traces	Traces
Ba	Traces	Traces	0,2
Pb	Traces	Traces	0,2
Total	99,9	99,8	99,8

Tableau II.15. Résultat de l'analyse semi - quantitative par fluorescence X exprimée en pourcentages massiques

Les principaux composants élémentaires des sédiments SH, SD et SC sont : l'oxygène, le silicium, le calcium, le fer et l'aluminium conformément aux phases minérales principales mises en évidence dans les essais de diffraction.

1.1.3. Caractéristiques de portance et de compactage

1.1.3.1. Définition

Le but du compactage est d'obtenir un sol suffisamment compact et dense dans l'objectif de :

- Réduire ses tassements et augmenter sa portance
- Accroître sa résistance au cisaillement
- Améliorer son comportement sous l'action de l'eau.

Dans ce contexte, on opte généralement pour l'essai Proctor qui permet de tracer la courbe du poids volumique sec en fonction de la teneur en eau, pour une énergie de compactage donnée. Cette courbe permet de mettre en évidence un optimum de poids volumique.

En construction de remblai en grande masse (barrages, remblais routiers...) on se réfère généralement à l'essai *Proctor Normal*, tant dis qu'en couches de chaussée on se réfère exclusivement à l'essai *Proctor Modifié*, réalisé avec une énergie supérieure. Cet essai permet de déterminer deux grandeurs fondamentales, en particulier pour le déroulement et le contrôle des chantiers de terrassement :

- W_{OPN} (ou W_{Opm}) : Teneur en eau à l'Optimum Proctor Normal (ou Modifié)
- $\gamma_{d_{OPN}}$ (ou $\gamma_{d_{Opm}}$) : Poids volumique sec à l'Optimum Proctor Normal (ou modifié)

Si l'énergie de compactage croît, les courbes deviennent plus pointues. L'eau étant incompressible, ces diverses courbes ont pour enveloppe l'hyperbole :

$$\gamma_{sat} = \frac{\gamma_w}{\gamma_d} - \frac{\gamma_w}{\gamma_s} \quad Eq II. 16$$

1.1.3.2. Essai Proctor Modifié et l'indice portant immédiat (IPI)

Dans le but de déterminer la masse volumique sèche du sédiment pour une valorisation en génie civil, nous nous avons humidifié nos 3 sédiments à 5 différentes teneurs en eau et on les a compactés dans des moules selon un procédé et une énergie de compactage normalisés.

Quant à l'indice de portance immédiat (IPI) exprimé en %, c'est le rapport entre les pressions produisant dans le même temps un enfoncement donné dans le sol étudié d'une part et dans un matériau type d'autre part. Par définition cet indice est pris égal à la plus grande des deux valeurs des équations suivantes :

$$IPI = Max \left\{ \begin{array}{l} \frac{\text{Effort de pénétration à 2,5 mm d'enfoncement (kN)} \times 100}{13,35} \\ \frac{\text{Effort de pénétration à 5 mm d'enfoncement (kN)} \times 100}{19,93} \end{array} \right. \quad Eq II. 17$$

La courbe $\rho_d = f(W)$ illustrée sur la Figure II.14 nous permet d'apprécier le comportement au compactage des 3 sédiments comme on peut caractériser aussi les différents états hydriques par l'écart relatif entre leurs teneurs en eau et leurs optimums OPM (W/W_{OPM}). De même, les résultats de l'indice de portance immédiat sont aussi reportés sur la Figure II.15

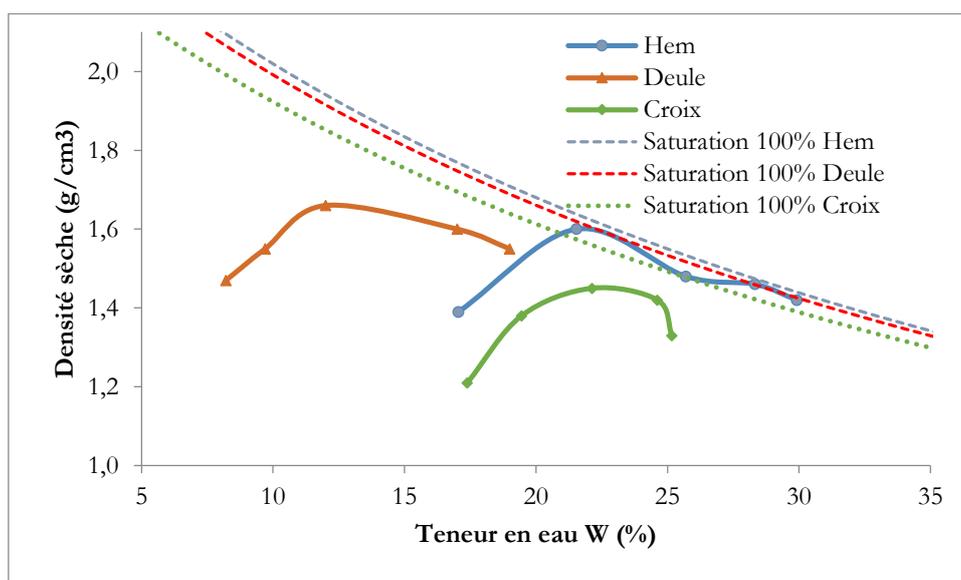


Figure II.14. Courbes de compactage des sédiments utilisés

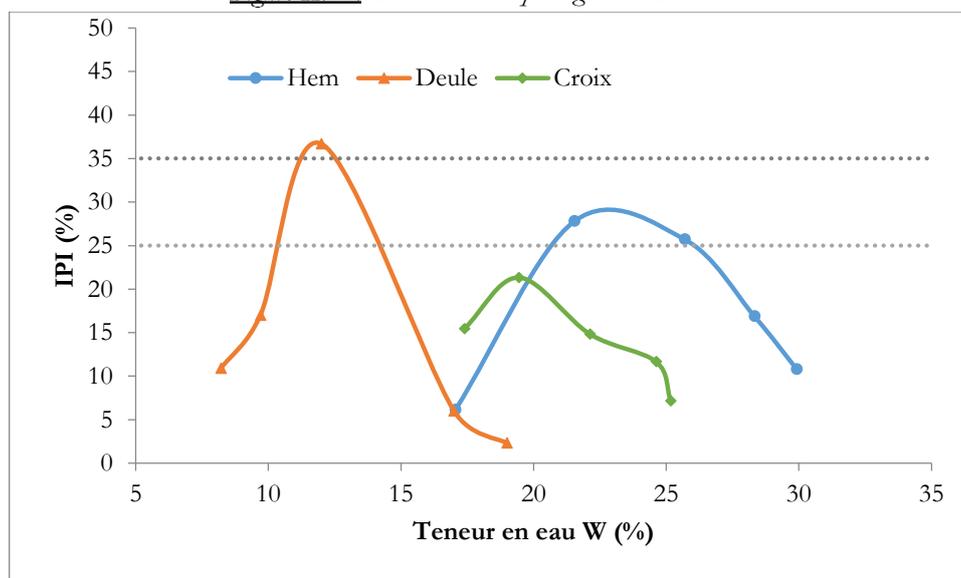


Figure II.15. Courbes de portance (IPI) des sédiments fluviaux étudiés

	SH	SC	SD
Teneur en eau optimale(%)	21,5	22	12
Densité sèche optimale (g/cm³)	1,56	1,45	1,66
IPI (indice portant immédiat) à W_{opm}	27,8	14,82	36

Tableau II.16. Résultats de l'essai Proctor modifié et l'indice de portance sur les sédiments

Les résultats de l'essai Proctor ont montré une différence entre les 3 sédiments, celui de la Deûle présente un optimum Proctor de 12% contre 21,5% pour le sédiment du Hem et 22% pour celui de la Croix, au-delà de ces pourcentages, nous remarquons une chute brusque de la densité sèche optimale. La densité sèche optimale varie de 1,45 g/cm³ pour SC à 1,66 g/cm³ pour SD. Cette différence est due principalement à la nature et au comportement de chaque sédiment.

Concernant l'indice de portance immédiat, il est de l'ordre de 27,8% pour le sédiment du Hem et 36% pour celui de la Deûle contre 14,82% seulement pour le sédiment de Croix donc d'un point de vue mécanique à court terme, le sédiment de la Deûle présente la meilleure portance immédiate en raison de sa nature sableuse, celui du Hem aussi répond aux exigences établies par le guide GTR et les engins peuvent circuler librement. Cependant, le sédiment de la Croix avec un IPI= 14,82 < 25 ne peut pas être valorisé en technique routière et d'où un traitement adéquat est obligatoire.

1.1.4. Classification GTR

Une fois on a terminé les différents essais de caractérisation, on procède à une classification de nos sédiments fluviaux selon le « Guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme » [47] en fonction du secteur de valorisation envisagé.

Pour la classification des sédiments selon leurs teneurs en matière organique, les sédiments de la Deûle et HEM font partie de la classe F des sols organiques avec une concentration en matière organique comprise entre 3% et 10% leur permettant d'être en sous-classe F₁₁ tant dis que le sédiment de Croix appartient à la sous-classe F₁₂.

En se référant à leurs degrés d'argilosité et leurs indices de plasticité, les sédiments fluviaux sont classés comme suit :

	SH	SC	SD
IP	15,38	29,76	2,19
VBS	1,99	3,42	0,53
Classe	A2	A3	B5

Observations	Emploi en remblai ou en couche de forme est envisageable.	Sols cohérents avec une perméabilité très réduite.	Emploi en couche de forme sans traitement avec des LH nécessite de connaître sa résistance mécanique
---------------------	---	--	--

Tableau II.17. Classification des sédiments selon leur argilosité et plasticité

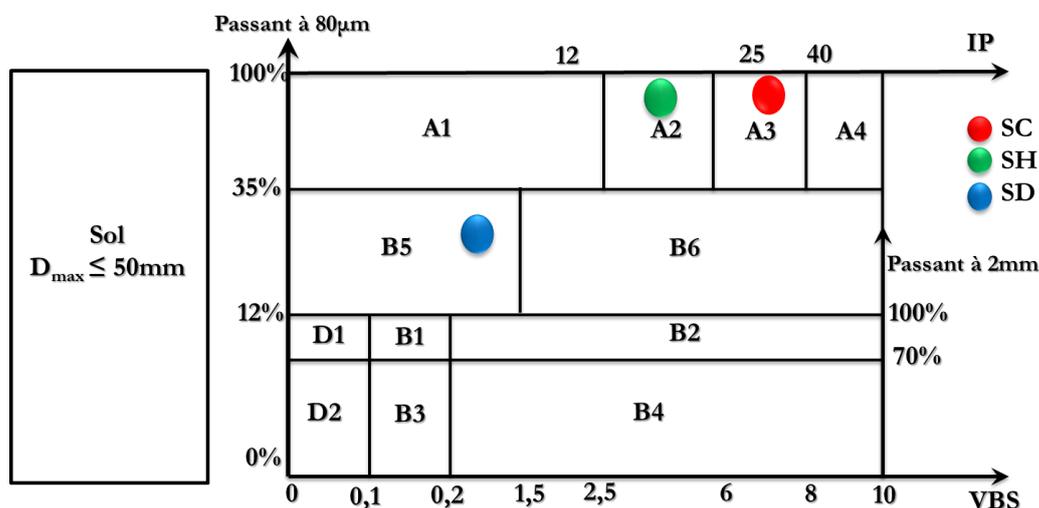


Figure II.16. Classification des sédiments selon GTR, 1992

1.1.5. Impact environnemental

Pour bien gérer les sédiments et leurs voies de valorisation, il est indispensable d'étudier l'impact sur l'environnement et la pollution causé par les métaux lourds, aussi connues comme éléments traces métalliques. L'étude environnementale a été effectuée à travers des tests de lixiviation sur des éluats et sur des matrices solides, en se référant à la loi de l'eau de 2006 qui fixe les seuils de qualité s'appliquent à 8 métaux lourds, ainsi qu'aux HAP et PCB totaux. Dans la même démarche, on a appliqué l'arrêté de 28 octobre 2010 propre aux installations de stockage des déchets inertes, dangereux et non dangereux ainsi que le guide d'acceptabilité des matériaux alternatifs [61].

1.1.5.1. Diagnostic initial : (Loi de l'eau)

L'objectif du diagnostic initial est de fournir une image instantanée de la qualité du sédiment permettant d'envisager les investigations complémentaires à réaliser en fonction de la quantité et la qualité des sédiments.

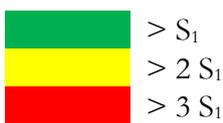
Cette étape de reconnaissance des sédiments permet donc de :

- Définir le degré de contamination des sédiments ;
- Mieux évaluer les futurs travaux et opérations de curage ;

- Orienter le devenir des matériaux extraits ;
- Orienter le choix des mesures correctives à mettre en œuvre.

Dans cette démarche, la réglementation française a défini dans le 1^{er} article de l'arrêté du 09 Août 2006 les seuils de qualité qui influencent le régime de l'opération de curage. Ces seuils s'appliquent à 8 métaux lourds, ainsi qu'aux HAP et PCB totaux (Tableau II.18). Lorsque la valeur S_1 est atteinte pour un paramètre au moins, selon l'article 2 de l'arrêté du 9 Août 2006, l'échantillon est classé « $> S_1$ ».

Éléments	Niveau S_1 (mg/kg)	SH	SC	SD	
Arsenic (As)	30	7,07	11,1	9,81	
Cadmium (Cd)	2	1,45	1,5	24,6	
Chrome (Cr)	150	28,7	61,6	13,2	
Cuivre (Cu)	100	34	58,7	32,3	
Nickel (Ni)	50	24,5	50,1	11,1	
Plomb (Pb)	100	40,1	71,3	144	
Zinc (Zn)	300	203	317	389	
Mercure (Hg)	1	0,31	1,12	0,75	
Polluants organiques					
PCB Totaux	0,68	0,14	1,19	0,21	
HAP Totaux	22,8	7,62	21,43	2,39	



$> S_1$
 $> 2 S_1$
 $> 3 S_1$

Tableau II.18. Seuils de qualité S_1 pris pour les sédiments de cours d'eau ou de canaux

Pour le sédiment du Bras de HEM, tous les éléments analysés sont en-dessous du seuil S_1 , l'impact potentiel des opérations de curage est donc jugé neutre, contrairement au sédiment de la Deûle où certains éléments chimiques dépassent largement le seuil, avec un taux très élevé de Cadmium, de Zinc et du plomb. Un dépassement du seuil de Nickel et du Zinc ainsi que celui des polluants organiques a été constaté pour le sédiment de Croix. L'opération de curage a dans ce cas une incidence sur le milieu aquatique, et donc l'immersion ne n'est pas possible. Il faut procéder dans ce cas à la gestion à terre de ces deux sédiments. Pour cela, un essai de lixiviation doit se faire pour pouvoir estimer l'éventuelle pollution des sédiments avant leurs gestions.

1.1.5.2. Paramètres d'admission des déchets en stockage

L'arrêté du 30/12/2002 relatif au stockage des déchets définit des seuils d'admission qui portent sur la fraction extraite de l'éluât du déchet stabilisé sec. Les catégories des déchets déjà définies précédemment sont classées selon le centre de stockage comme suit :

- Déchet dangereux (ISDD) : Classe I
- Déchets non dangereux (ISDND) : Classe II

- Déchets inertes (ISDI) : Classe III

La satisfaction au test de lixiviation est l'étape clé pour l'admission des déchets étudiés en ISDND tout en respectant une valeur de pH comprise entre 4 et 13. Les sédiments peuvent être refusés lorsque la fraction soluble dépasse la valeur limite.

Les tests de lixiviation sur les éluats et sur la matrice solide ont été réalisés pour les sédiments du Hem et de la Deûle réalisés avec un rapport $L/S = 10$. Les résultats des essais sont reportés dans les tableaux II.19 et II.20, les 3 sédiments sont en dessous du seuil autorisé pour les différents éléments chimiques.

Paramètre	Valeur (mg/kg)	SH	SC	SD
COT	30 000	360	630	140
BTEX	6	0,78	1,8	0,26
PCB	1	<0,14	0,19	0,21
Hydrocarbures (C10 à C40)	500	480	410	330
HAP	50	7,62	23,5	12,2

Tableau II.19. Valeurs de lixiviation sur éluats pour l'admission en décharge (mg/kgsec)

	Décision 2003-33 du 19/12/2002					
	ISDI	ISDND	ISDD	SH	SD	SC
Fraction soluble	4000	60 000	100 000	3270	3980	3380
Chlorure	800	15 000	25 000	591	588	487
Fluorure	10	150	500	5,33	9,2	5,01
Sulfate	1 000	20 000	50 000	920	985	974
Indice Phénol	1	--	--	0,53	0,51	0,5
COT	500	800	1 000	360	490	430
Arsenic (As)	0,5	2	25	0,2	0,41	0,2
Baryum (Ba)	20	100	300	0,35	0,24	0,11
Chrome (Cr)	0,5	10	70	<0,11	0,1	<0,1
Cuivre (Cu)	2	50	100	0,32	<0,20	0,23
Molybdène (Mo)	0,5	10	30	0,45	0,36	0,46
Nickel (Ni)	0,4	10	40	0,19	0,11	0,37
Plomb (Pb)	0,5	10	50	0,11	0,1	<0,1
Zinc (Zn)	4	50	200	<0,21	0,41	0,22
Mercure (Hg)	0,01	0,2	2	<0,001	<0,001	<0,001
Antimoine (Sb)	0,06	0,7	5	0,001	0,056	0,002
Cadmium (Cd)	0,04	1	5	0,006	0,005	0,035
Sélénium (Se)	0,1	0,5	7	0,036	0,055	0,092

Tableau II.20. Valeurs de lixiviation sur le solide pour l'admission en décharge (mg/ kgsec)

Les résultats des analyses sur les éluâts et la matrice solide de lixiviation montrent que les teneurs en métaux lourds sont en-dessous des seuils autorisés par la loi avec une faible contamination de nos sédiments qui sont considérés comme des déchets inertes et peuvent être admis dans un site de décharge de classe I.

1.1.5.3. Critères d'acceptabilité selon le guide SETRA

Une autre comparaison a été réalisée en se référant au guide méthodologique d'Acceptabilité de matériaux alternatifs en technique routière « SETRA » qui sert à fournir une démarche d'évaluation de l'acceptabilité environnementale des matériaux alternatifs élaborés à partir des déchets pour une éventuelle utilisation en technique routière. Cette évaluation est effectuée sur la base d'essais de lixiviation et d'analyses en contenu total avec un rapport $L/S = 10$

Éléments	SD	SH	SC	Seuil
As	0,41	0,2	0,2	1,5
Ba	0,24	0,35	0,11	60
Cr	0,1	<0,11	<0,1	1,5
Cu	<0,20	0,32	0,23	6
Mo	0,36	0,75	0,56	1,5
Ni	0,11	0,19	2,77	1,2
Pb	0,1	0,11	<0,1	1,5
Zn	0,41	<0,21	0,22	12
Hg	0,003	0,002	<0,002	0,03
Sb	0,13	0,001	0,002	0,18
Cd	0,005	0,106	0,245	1,5
Se	0,155	0,136	0,092	0,3
Chlorure	588	591	487	2400
Fluorure	29,2	5,33	5,01	30
Sulfate	1240	1020	1280	3000
Fraction soluble	3980	4270	4380	12000
PH	7,45	8	8,05	5,5-13

Tableau II.21. Valeurs limites en lixiviation à respecter par 100% des échantillons (mg/ kg Ms)

Éléments	SC	SD	SH	Seuil
COT	630	490	360	6000
BTEX	1,8	4,14	0,78	6
PCB	<0,19	<0,97	<0,14	1
HAP	23,5	12,2	7,62	50

Tableau II.22. Valeurs limites sur la matrice solide en (mg/kg Ms)

D'après les essais de lixiviation, les 3 sédiments ne présentent pas de dépassements par rapport aux différents seuils fixés par le guide. L'acceptabilité en technique routière ou pour des usages routiers des 3 sédiments fluviaux est donc vérifiée. Par conséquent, les sédiments SH, SD et SC peuvent être candidats pour une utilisation dans la construction des routes.

1.2. Conclusion

Ce deuxième chapitre a été consacré aux études de caractérisation de nos sédiments fluviaux à travers des essais physiques, minéralogiques, mécaniques et environnementaux.

La caractérisation physique des trois sédiments en provenance des différents sites (Hem, croix et Deûle) a montré qu'ils présentent une forte teneur en eau $> 100\%$ et une teneur en matière organique considérablement élevée, ce qui nous conduit à prévoir des moyens de séchage et un prétraitement pour améliorer l'aspect mécanique et réduire la M.O.

Les analyses minéralogiques nous ont donnés une idée sur les principaux minéraux et composants présents dans nos sédiments, Ceci permettra de savoir comment réagissent ces derniers dans un environnement bien déterminé. En se référant aux résultats issus de notre étude bibliographique, on peut remarquer que les sédiments fluviaux étudiés ont une composition minéralogique semblable.

L'évaluation de l'impact environnemental des trois sédiments a été réalisée par l'essai de lixiviation en se référant à la norme NF EN 12457-2. En analysant les résultats obtenus en fonction des conditions d'admission dans les centres de stockage des déchets, il s'avère que les seuils fixés par le guide pour une classification en déchet inerte sont tous respectés. Ceci confirme donc la valorisation potentielle des sédiments étudiés en Génie Civil.

Dans le troisième chapitre, nous allons étudier les différentes pistes possibles de valorisation de ces sédiments. En fonction des résultats des essais physico-chimiques et mécaniques obtenus, il a été décidé de choisir le sédiment du Hem et de la Deûle pour une valorisation en technique routière. Pour les applications à base cimentaire, nous utiliserons le sédiment de la Deûle en raison de son caractère sableux et de sa faible teneur en argile et en M.O. Pour la valorisation en éco modelé paysager, nous envisageons un mélange de sédiments de la Deûle et de Croix en raison de la faible portance de ce dernier.

CHAPITRE 3 :
VALORISATION DES SEDIMENTS
DE DRAGAGE EN GENIE CIVIL
APPLICATION :

- **BUTTE PAYSAGERE**
- **TECHNIQUE ROUTIERE**
- **MATERIAUX A BASE
CIMENTAIRE**

Filière 1 :
APPLICATION ÉCO-MODELÉ
PAYSAGER

Filière 1 :

APPLICATION : ÉCO-MODELÉ PAYSAGER

3.1. Introduction

Parmi les ouvrages en terre les plus utilisés dans le monde, on distingue généralement les digues à talus, les merlons ou encore les éco-modelés paysagers (appelés aussi buttes paysagères). Un éco-modelé paysager est un ouvrage de protection constitué généralement d'un talus de terre entourant une installation ou une zone pour la protéger de l'extérieur mais aussi pour l'isoler visuellement et/ou phoniquement. [62]. Il permet aussi de créer de meilleurs aménagements urbains, ou de développer des projets environnementaux. Les buttes en terre existent sous plusieurs formes et selon des usages bien déterminés :

De nos jours, l'éco-modelé paysager est considéré comme l'une des filières innovantes de valorisation des sédiments qui a été étudiée par le GPMD vu l'importance du volume de sédiments à valoriser et la facilité de la mise en œuvre. À ce jour, il existe 5 buttes paysagères à Dunkerque faites avec plus de 100 000 m³ de sédiments marins.

Dans le cas où l'étude d'impact met en évidence un risque sanitaire ou environnemental lié à une utilisation en éco-modelé paysager, l'ouvrage est installé sur une membrane géotextile permettant d'isoler les sédiments du sol afin d'éviter un risque de contamination du sol et de la nappe phréatique.

Dans ce chapitre, nous étudions un éco-modelé paysager végétalisé à base d'un mélange de deux sédiments fluviaux SD et SC (en raison de la faible portance de ce dernier). Pour cela, nous allons étudier les différentes propriétés et caractéristiques mécaniques qui sont indispensables pour le dimensionnement et la réalisation d'éco-modelé à travers les essais œdométriques, triaxiaux et de cisaillement direct. Une planche expérimentale à base du mélange de sédiments élaborée a été réalisée et instrumentée. Ayant eu l'opportunité de faire un suivi environnementale et mécanique d'un éco-modelé paysager à base de sédiments marin située au GPMD, nous avons entrepris une étude comparative entre les deux ouvrages.



Figure.III. 1. 1 Les éco-modelés paysagers de Dunkerque réalisés avec des sédiments marins

3.2. Les facteurs de stabilité

Pour le suivi d'un éco-modélé paysager, plusieurs facteurs entrent en rigueur liés à la nature de l'ouvrage ou du milieu et du terrain qui la contient :

Facteurs géométriques de l'ouvrage

Les facteurs d'ordre géométriques sont constitués des paramètres suivants :

- La hauteur de l'ouvrage ;
- L'angle de pente des talus ;
- Le rayon de courbure de l'ouvrage sur le plan horizontal.

Facteurs liés à la nature des terrains

- Poids volumique ;
- Structure ;
- Résistance au cisaillement ;
- Résistance à la traction.

Facteurs liés à l'eau souterraine et à l'eau de surface

Le suivi des eaux interstitielles joue un rôle important dans la stabilité de l'ouvrage. En effet ces eaux doivent pouvoir circuler librement à l'intérieur de l'ouvrage. Une activité irrégulière des eaux interstitielles, par mauvais drainage ou remontée non maîtrisée de la nappe, va créer des

forces de pression importantes au sein de l'ouvrage. Ce phénomène risque de compromettre sa stabilité.

Facteurs liés aux actions externes et la végétation

Les actions externes susceptibles d'affecter la stabilité de l'ouvrage peuvent être naturelles ou liées à l'activité humaine. Elles peuvent se manifester sous forme de :

- Modifications des pentes de talus (phénomène d'érosion, actions humaines) ;
- Suppression de la butée de pied ;
- Déboisements ;
- Vibrations sismiques.

La végétation sur une butte végétalisée permet de réduire l'entassement du sol et sa résistance ainsi que sa cohésion peuvent être améliorées grâce à l'inclusion ou la présence de racines. De façon générale, les plantes ligneuses sont très utilisées pour stabiliser une pente : le saule fait partie de ces plantes qui stabilisent les versants.

3.3. Règles de dimensionnement

En fonction de l'objectif recherché et du choix de la voie d'usage, il est possible de faire varier les caractéristiques d'un éco-modélé comme sa hauteur, sa largeur ou aussi son épaisseur,...etc. Les dimensions de la structure à protéger et les paramètres de la charge (hauteur, puissance) conditionnent les différentes caractéristiques de l'éco-modélé. Cependant, il n'existe pas de règles précises de dimensionnement. Les principales caractéristiques d'un éco-modélé paysager sont sa hauteur, son épaisseur et sa longueur :

- La hauteur H : la hauteur de la barrière de protection doit être légèrement supérieure à la hauteur de la structure à protéger et à la hauteur de la charge (les recommandations préconisent que la hauteur de la barrière de protection soit supérieure de 2 m à la hauteur de la charge).
- L'épaisseur E : les recommandations ne préconisent que l'épaisseur au sommet soit supérieure à 0,5 m.
- La longueur L : la longueur doit être 2 fois supérieure à la longueur des structures que l'on souhaite protéger.
- L'emprise au sol : il est recommandé que l'emprise au sol du merlon soit comprise entre trois et huit fois la hauteur du merlon.

3.4. Méthodes de suivi au laboratoire et in situ

Le suivi de la stabilité géotechnique des buttes paysagères consiste principalement à faire un suivi topographique de surface réalisé avec un appareillage adéquat. En plus de la topométrie, les tassements internes de l'ouvrage doivent être vérifiés ainsi que l'état hydrique et la perméabilité du matériau.

Il est important avant de réaliser la butte de vérifier sa stabilité et les propriétés mécaniques du matériau ou du sédiment à utiliser tout en tenant compte de certains facteurs comme les coefficients de cohésions, des contraintes de cisaillement, l'indice des vides ou encore l'angle de frottement. Les différents paramètres qu'on peut suivre sont reportés dans le tableau suivant :

Paramètre Suivi	Moyen (instrument)	Fréquence	Observations
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Granulométrie ▪ Limites d'Atterberg ▪ VBS ▪ Teneur en eau 	Laboratoire	Phase amont du projet	Identification du matériau
Densité sèche	Le pycnomètre à liquide ou à gaz	Annuelle	Suivi de l'évolution de la porosité
Perméabilité	Essai à eau Lefranc	Annuelle	Suivi de la perméabilité
Indice des vides et tassement	Essai œdométrique	Phase amont du projet	Suivi des paramètres intrinsèques
Cohésion et angle de frottement	Essai de cisaillement	1 fois tous les 2 ans	Suivi des paramètres intrinsèques
Pollution	Essai de lixiviation	1 fois/ mois	Suivi de l'impact sur l'environnement

Tableau.III.1. 1. Différents paramètres à suivre pour la stabilité d'une butte

3.5. Choix et dosage du mélange de l'éco-modélé paysager

Le choix du sédiment à valoriser en éco-modélé paysager a été défini en se basant sur leurs caractéristiques géotechniques déterminées précédemment. On s'est référé aux deux sédiments fluviaux Croix et Deûle (SC et SD) et un sédiment marin (SGPMD) sous forme de carottes prélevées en haut de la butte de Dunkerque. Le choix de ce sédiment marin servira à faire une comparaison des différents résultats obtenus.

Quant aux deux sédiments fluviaux SC et SD, nous avons réalisé un essai de compacité en se basant sur le modèle d'empilement compressible destiné pour des matériaux de compacité ou

de classe granulaire différente [63]. Ceci permettra de diminuer la teneur en matière organique trop élevée du sédiment de la Croix mais aussi d'avoir le meilleur squelette granulaire possible.

Pour déterminer la meilleure compacité du mélange, on a fait recours au logiciel René LCPC qui permet de trouver les différentes compacités théoriques du mélange étudié. Pour cela, nous avons fait entrer les masses volumiques absolues, les données granulométriques et la compacité de chaque mélange. Les résultats sont reportés dans le Tableau.III.1. 2:

Sédiment Deûle	Sédiment Croix	Masse vol. mélange (g/cm ³)	Compacité (%)
0	100	2,38	62,52
10	90	2,41	63,13
20	80	2,42	63,94
30	70	2,45	65,27
40	60	2,46	66,86
50	50	2,46	66,63
60	40	2,47	66,22
70	30	2,48	65,75
80	20	2,50	63,34
90	10	2,52	62,89
100	0	2,53	62,42

Tableau.III.1. 2. Compacités des mélanges de sédiments

L'observation des différentes compacités et masses volumiques des mélanges des deux sédiments montrent que la meilleure proportion c'est celle de 40% de SD et 60% de SC. Cette proportion fera l'objet d'une étude mécanique et environnementale.

3.6. Étude mécanique des sédiments étudiés

3.6.1. Essai Proctor sur le mélange

Afin de déterminer le besoin en eau et la masse volumique sèche optimale du mélange retenu avec 60% SC et 40% SD pour une valorisation en remblai (éco-modélé paysager), nous avons réalisé un essai de Proctor normal en humidifiant le matériau obtenu à 5 différentes teneurs en eau et en le compactant dans des moules selon un procédé et une énergie de compactage normalisés.

La courbe $\rho_d = f(W)$ illustrée sur la figure ci-après nous permet d'apprécier le comportement au compactage de notre mélange de sédiments comme on peut caractériser aussi son état hydrique par l'écart relatif entre sa teneur en eau et son OPN (W/W_{OPN}) :

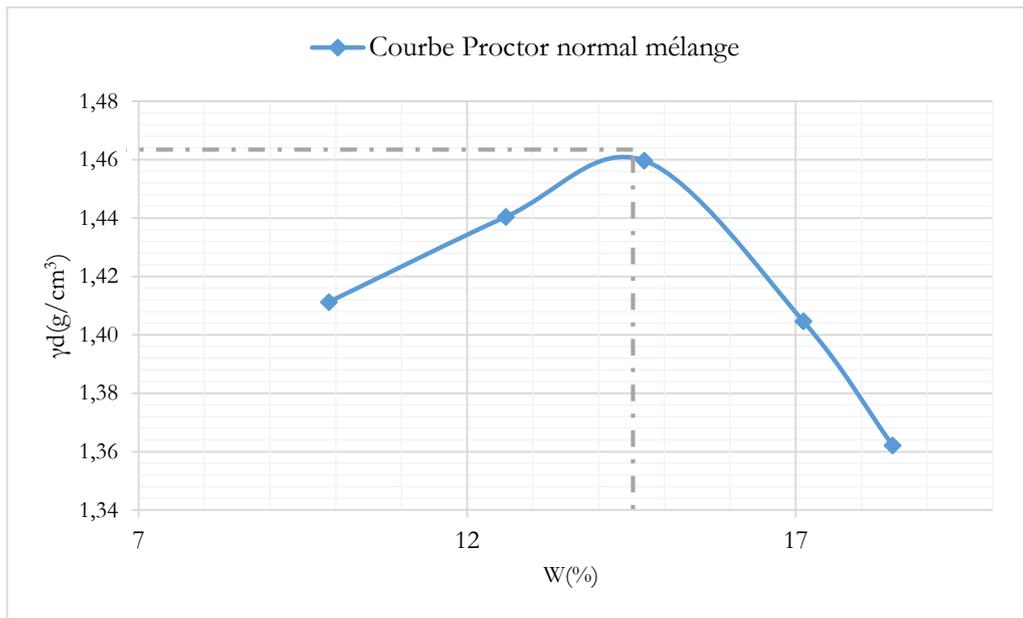


Figure.III. 1. 2 Courbe de Proctor normal réalisé sur le mélange des deux sédiments fluviaux

Comme l'on peut constater, la densité sèche augmente avec l'ajout de l'eau pour atteindre une valeur maximale de 1,46 g/cm³. Cette phase de densification est liée à la lubrification et à la réorganisation des grains qui optimisent la compacité [11]. La teneur en eau optimale du mélange à base de 60% SC et 40% SD est de 14,7%.

3.6.2. Préconsolidation

Afin de réduire leurs teneurs en eaux et rendre l'échantillonnage possible, nous avons procédé à une préconsolidation de nos deux sédiments fluviaux SD et SC ainsi que le mélange des deux. La contrainte de préconsolidation a été fixée à 56 KPa [5]. Quant aux paliers de chargement, il était défini à 5 KPa par palier soit 11 paliers au total [19]. Le temps de stabilisation du tassement pourrait être calculé théoriquement par le coefficient de consolidation :

$$T = \alpha \times Tv \times H^2 / Cv \quad \text{Eq. II. 1}$$

Où : T : Temps (s)

α : Coefficient lié au type de drainage du sol :

$\alpha = 4$ Lors de la couche drainée sur les deux faces, $\alpha = 1$ lors de la couche drainée sur les deux faces, $\alpha = 1$ lors de la couche drainée d'un seul côté ;

Tv : Facteur de temps, le facteur temps à 90% de consolidation est donné sur l'abaque de Casagrande, égal à 0,848 ;

H : Epaisseur de l'échantillon ;

C_v : coefficient de consolidation déterminé par la relation :

$$C_v = k \times E' / \gamma_w \text{ (cm}^2/\text{s)} \quad \text{Eq. II. 2}$$

Avec : k : le coefficient de perméabilité du sol, E' : le coefficient d'élasticité œdométrique et γ_w : le poids spécifique de l'eau.



Figure.III. 1. 3 Préconsolidation et préparation des échantillons

3.6.3. Essai œdométrique (XP P94-090-1)

3.6.3.1. Protocole de l'essai

L'essai œdométrique a pour but de déterminer la compressibilité des sols soumis à une série de charges verticales, drainés suivant la direction verticale et fixés latéralement par des anneaux. Les essais œdométriques ont été effectués selon la norme [XP P94-090-1], en visant à encadrer la contrainte de 56 kPa. Le principe de l'essai œdométrique se résume en 4 principales phases :

Phase1 : Un chargement suivant les paliers suivants : 0 ; 24,75 ; 37,25 ; 49,5 et 111,37 kPa ;

Phase2 : Un déchargement à vide en respectant les paliers de la phase 1 ;

Phase3 : Un rechargement selon les paliers suivants : 24,75 ; 37,25 ; 111,37 ; 222,75 ; 445,5 et 940,5kPa ;

Phase4 : un dernier déchargement à 0 kPa suivant les anciens incréments de pression.

Cet essai nous permet de suivre le tassement des échantillons des sédiments en fonction du chargement appliqué. La courbe de compressibilité du sol est tracée dans un système de

coordonnées semi-logarithmiques sous forme $[e, \log(\sigma)]$, Elle nous donne la variation de l'indice des vides du sol en fonction de la contrainte effective verticale appliquée à l'éprouvette,

Les indices de recompression (C_s) et les indices de compression (C_c) sont les valeurs des pentes des droites précédemment citées, Ils sont calculés selon les formules suivantes :

$$C_s = \Delta e / (\Delta \log \sigma_v')$$
 de la droite de la première phase,

$$C_c = \Delta e / (\Delta \log \sigma_v')$$
 de la droite de la troisième phase.

Éventuellement, la courbe œdométrique nous donne aussi la variation de la hauteur de l'éprouvette ΔHc en fonction du temps ainsi que le coefficient de consolidation c_v pour chacun des paliers de chargement correspondant à des contraintes appliquées σ_v supérieures à la contrainte de préconsolidation.

3.6.3.2. Présentation des résultats

L'essai a été réalisé sur 3 échantillons différents ; le 1^{er} c'est le sédiment de la Deûle à l'état brut, le 2^{ème} c'est celui de la branche de la Croix et le 3^{ème} c'est le mélange des deux avec 60% SC et 40% SD.

Les résultats représentent l'évolution de l'indice des vides «e» en fonction des paliers de charges choisis. L'indice des vides « e » est un paramètre important dans la compréhension des phénomènes mécaniques, car il relate la bonne structuration du milieu granulaire et l'état de consolidation du sol. Plus l'indice de compression est important, plus le sol aura tendance à tasser. Les résultats sont reportés dans les figures ci-après :

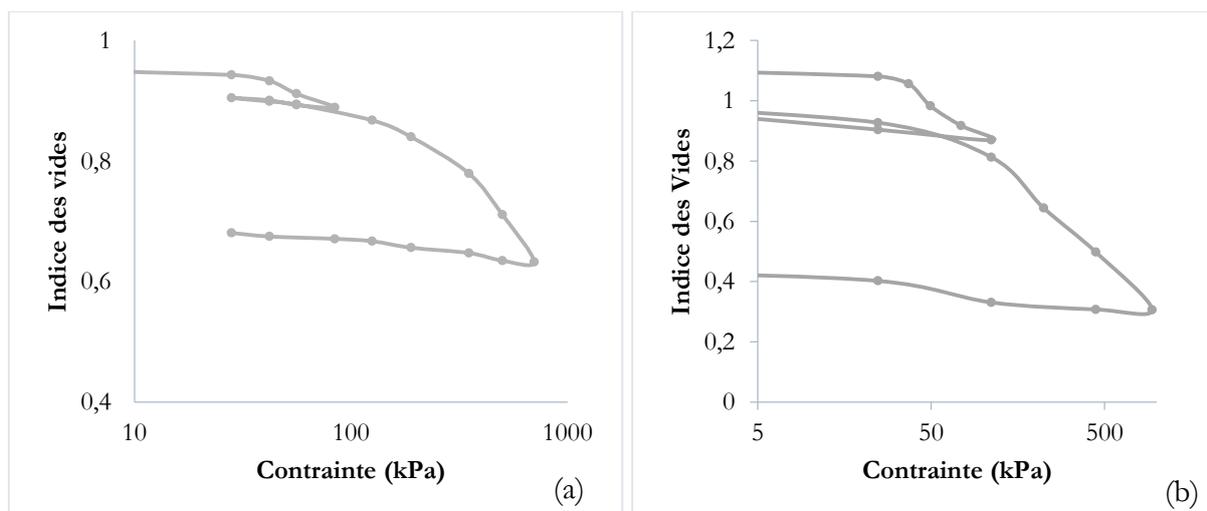


Figure.III. 1. 4 (a) Courbe œdométrique du sédiment SD ; (b) Courbe œdométrique du sédiment SC

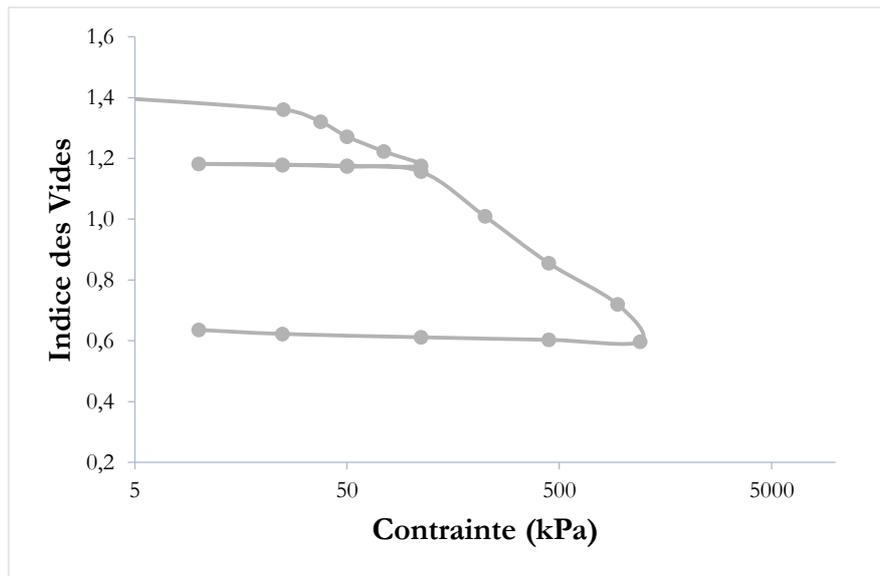


Figure.III. 1. 5 Courbe œdométrique du mélange

La contrainte de préconsolidation est ainsi déterminée par l'intersection des droites représentatives du domaine sur-consolidé et du domaine normalement consolidé. Le mélange de sédiments présente une meilleure contrainte égale à 52,13 kPa.

Sédiment	e_0	σ'_p (kPa)	C_s	C_c
SC	1,104	39,37	0,17	0,22
SD	0,95	32,45	0,11	0,09
Mélange	1,42	52,13	0,14	0,16

Tableau.III.1. 3. Résultats des essais œdométriques des sédiments utilisés

Or d'une manière générale, On peut considérer qu'un sol est :

Type	Condition	Exemple
Incompressible	$C_c < 0,02$	Sables
très peu compressible	$0,02 < C_c < 0,05$	
Peu compressible	$0,05 < C_c < 0,10$	
Moyennement compressible	$0,10 < C_c < 0,20$	Kaolinites
Assez fortement compressible	$0,20 < C_c < 0,30$	Illites
Très compressible	$0,30 < C_c < 0,50$	
Extrêmement compressible	$0,50 < C_c$	Montmorillonite

Tableau.III.1. 4. Ordres de grandeur de l'indice de compression pour différents types de sols

Selon les résultats obtenus, on remarque que le mélange des deux sédiments est moyennement compressible et présente un faible indice de gonflement ne nécessitant pas de prescription ou de règles particulières en matière de construction de l'ouvrage.

3.6.4. Essai de cisaillement direct (XP CEN ISO/TS 17892-10)

L'essai de cisaillement à la boîte des paramètres de résistance au cisaillement des sols et principalement la cohésion et l'angle de frottement, Il existe alors deux types d'essai :

- l'essai non drainé : Donne les indications sur le comportement du sol à court terme, avec une prise en compte de surpressions interstitielles.
- l'essai drainé : reproduit le comportement du sol à long terme, après stabilisation des surpressions interstitielles.

L'essai s'effectue sur une éprouvette de sol placée dans une boîte de cisaillement constituée de deux demi-boîtes indépendantes. Le plan de séparation des 2 demi-boîtes constitue un plan de glissement correspondant au plan de cisaillement de l'éprouvette.

Les essais de cisaillement ont été réalisés dans le domaine normalement consolidé, à contraintes normales fixées à 100, 200, et 300kPa : des charges peu importantes permettant d'étudier le comportement mécanique des sédiments à l'état normalement consolidé.

Le traçage des graphes représente la contrainte de cisaillement en fonction du déplacement de la boîte, La droite intrinsèque du sol est ensuite tracée à partir des points de mesure (σ_1, τ_1 et σ_2, τ_2, \dots), on en déduit alors la cohésion et l'angle de frottement du sol.

L'essai a été réalisé sur le sédiment SC, SD et le mélange des deux, Les résultats sont reportés dans les graphes ci-après :

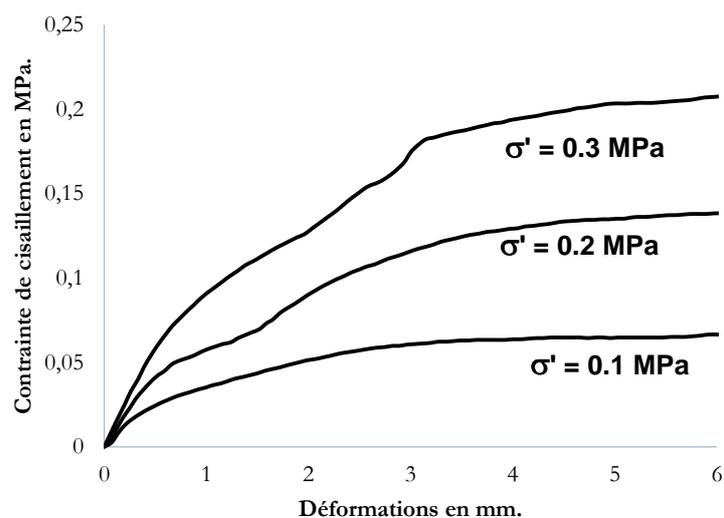


Figure.III. 1. 6 Courbe de cisaillement du sédiment de la croix

On peut définir la relation entre la contrainte de cisaillement τ et la contrainte normale σ d'après la formule $\tau = \sigma \times \tan(\varphi) + c$ Eq. II. 3

Des paramètres comme l'angle de frottement φ et la cohésion C' sont déterminés par le modèle Mohr-Coulomb. On obtient les résultats suivants pour le premier sédiment fluvial SC :

- $\tau = 0,6562\sigma + 0,010$
- Cohésion effective C'_{CD} : **10 kPa**
- Angle frottement effectif ϕ'_{CD} : **33,27°**

Le sédiment de la croix présente un angle de frottement égal à 33° et une cohésion effective de 10 kPa. De même, nous avons aussi déterminé les différents paramètres de cisaillement du sédiment.

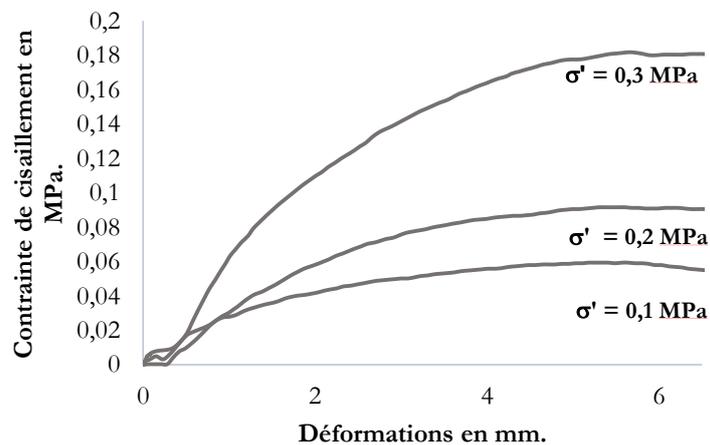


Figure.III. 1. 7 Courbe de cisaillement du sédiment de la Deûle SD

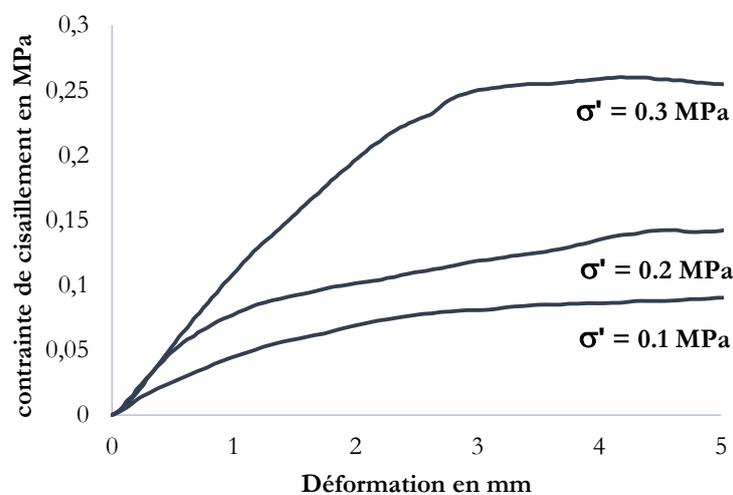


Figure.III. 1. 8 Courbe de cisaillement du mélange des deux sédiments

Une fois nous avons réalisé l'essai de cisaillement pour les 3 différents sédiments, nous pourrions déterminer les différents paramètres mécaniques de nos sédiments, les résultats sont reportés dans le tableau suivant :

	Contrainte normale σ' en kPa	Résistance au cisaillement τ_f en kPa	C' (kPa)	ϕ' (°)
SC	100	68	10	33,27°
	200	138		
	300	208		
SD	100	61	12	31,46
	200	92		
	300	183		
Mélange	100	96	34	39,37
	200	148		
	300	260		

Tableau.III.1. 5. Paramètres déterminés à la boîte de cisaillement pour les essais de cisaillement

Nous remarquons une différence de l'angle de frottement et de la cohésion effective entre les sédiments, plus précisément en comparaison des deux sédiments bruts avec le mélange. Ceci pourrait être influencé par la distribution granulométrique qui s'est améliorée, de la forme des grains ou encore de la diminution de la matière organique.

3.6.5. Essai triaxial : (NF P 94-070 et NF P 94-074)

3.6.5.1. Description de l'essai et du mode opératoire

L'essai triaxial permet d'étudier le comportement mécanique des échantillons de sols soumis à des contraintes normales et latérales. Ils sont placés dans une cellule étanche et remplie d'eau. [5]. L'échantillon subit une pression hydrostatique imposée à l'intérieur de l'enceinte par l'eau et une déformation axiale due au déplacement de deux embases.

Le dispositif nécessaire pour la réalisation de cet essai est composé par une centrale d'acquisition qui permet de récupérer et d'enregistrer toutes les données des deux vérins GDS et de lire les déplacements du capteur force et du capteur de déplacement axial.

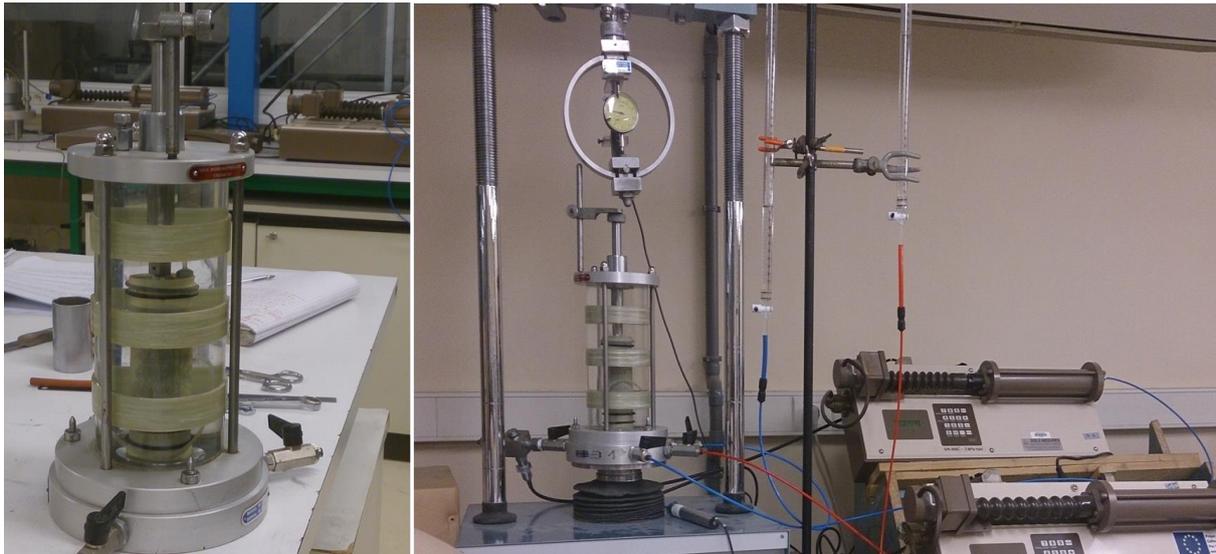


Figure.III. 1. 9 Dispositif expérimental pour l'essai triaxial

Trois phases principales existent pour la réalisation de cet essai :

- Une phase de saturation par une burette puis par le GDS, pour éliminer les bulles d'air existantes et saturer l'échantillon ;
- Une phase de consolidation, selon les contraintes déjà fixées avant le début de l'essai ;
- Une phase de cisaillement jusqu'à la rupture selon les conditions drainées ou non drainées.

Au cours de l'essai et selon le type d'essai, nous mesurons :

- La pression latérale hydrostatique imposée dans l'enceinte : σ
- La force axiale à laquelle est soumise l'éprouvette : F
- La variation de hauteur (longueur axiale) de l'éprouvette : H

Quant au mode opératoire de l'essai, nous commençons par placer un échantillon cylindrique de sol ou de sédiments sur une embase rigide munie d'un disque drainant, à l'intérieur d'une enceinte étanche, Sur sa surface latérale, l'éprouvette est recouverte d'une membrane souple et imperméable. (Figure.III. 1. 10).

A la partie supérieure de l'éprouvette est placée une embase rigide munie d'un disque drainant. Sur laquelle vient, en général, s'appliquer un piston. La force de cisaillement est mesurée par le capteur de force placé en haut du bâti de la presse.



Figure.III. 1. 10 Mise en place de la cellule pour l'essai triaxial

Les pressions de confinement choisies sont 300 kPa, 400 kPa et 500 kPa, qui correspondent au domaine normalement consolidé. L'essai a été réalisé sur le mélange à base des deux sédiments fluviaux SD et SC destinés pour la réalisation de l'éco-modélé paysager. Ci- après les résultats de l'essai triaxial consolidé-drainé.

3.6.5.2. Résultats de l'essai

Les paramètres illustrés sur les courbes sont le déviateur (q), le déviateur (u), la déformation axiale (ϵ_a) et la déformation radiale (ϵ_r). Les déformations axiales et radiales représentent les sommes des déformations relatives entre deux points de mesure :

$$\epsilon_a = \sum_{i=0}^n \frac{H_i - H_{i-1}}{H_{i-1}} \quad \text{Eq. II. 4}$$

$$\text{et } \epsilon_r = \sum_{i=0}^n \frac{D_i - D_{i-1}}{D_{i-1}} \quad \text{Eq. II. 5}$$

Avec : H_i : les hauteurs obtenues en soustrayant à la hauteur initiale, le déplacement axial mesuré, à l'instant i , par le capteur déplacement ;

Di : Les diamètres obtenus à partir de la surface transversale de l'échantillon à l'instant i .

La relation entre la déformation axiale ε_a et la déformation radiale ε_r est présentée sur la Figure.III. 1. 13. La relation théorique $\varepsilon_a = -2\varepsilon_r$ a été vérifiée d'après les essais expérimentaux.

▸ **Relation $q - \varepsilon_a$**

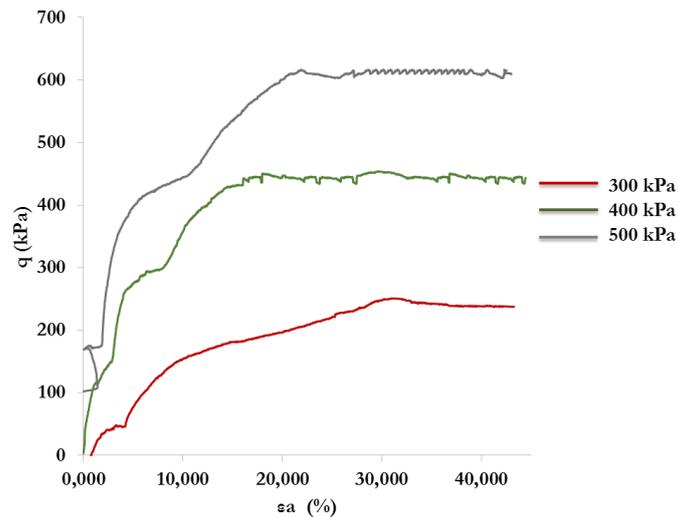


Figure.III. 1. 11 Relation entre le déviateur q et la déformation axiale ε_a pour le mélange des deux sédiments

L'état de de rupture est choisi parmi les cas suivants :

- Le maximum du déviateur des contraintes ;
- Le maximum du rapport des contraintes effectives σ'_1 / σ'_3 ;
- L'état critique déterminé lorsque le déviateur se stabilise et les variations de pression interstitielle et de volume deviennent négligeables.

L'allure des courbes du déviateur q en fonction de la déformation axiale ε_a confirme le domaine normalement consolidé vu que dans la plupart des cas, et pour les sols normalement consolidés, il n'y a pas de pic de déviateur lors de la rupture. [NF P 94-070].

Des perturbations et des déformations peuvent être visualisées sur le graphe. Elles pourraient être dues à la préparation de l'échantillon ou de sa mise en œuvre lors de l'essai.

▸ **Relation $u - \varepsilon_a$**

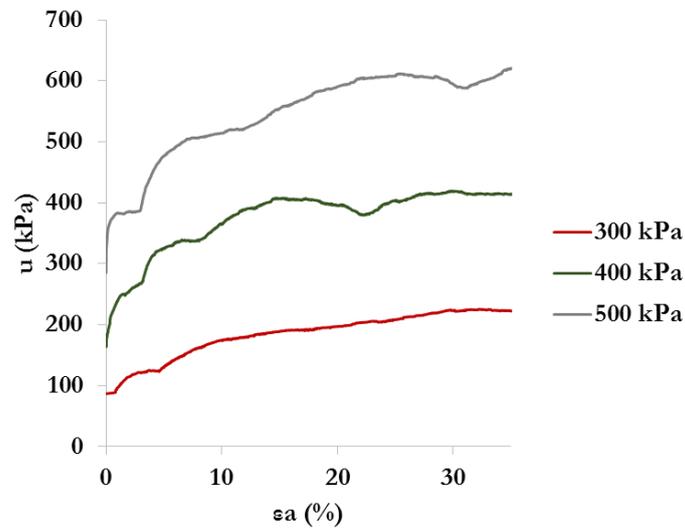


Figure.III. 1. 12 Relation entre le déviateur contrainte u et la déformation axiale ε_a pour le mélange des deux sédiments

▸ **Relation $\varepsilon_r - \varepsilon_a$**

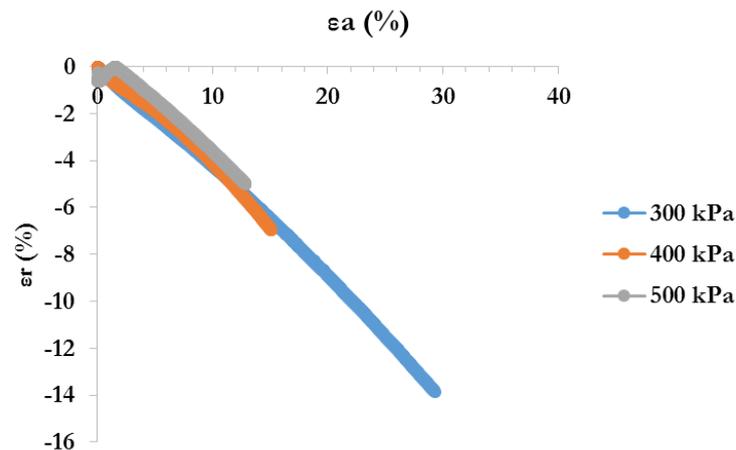


Figure.III. 1. 13 Evolution des déformations radiales en fonction des déformations axiales

L'observation de l'échantillon au cours et à la fin du cisaillement montre que la force verticale appliquée sur l'éprouvette provoque un gonflement de l'échantillon (Figure.III. 1. 14). La rupture par gonflement est généralement constatée dans les essais type consolidé-drainé (CD), pour le type consolidé- non drainé, un plan de cisaillement longitudinal est souvent observé. [5].



Figure.III. 1. 14 Echantillon après cisaillement (CD)

À la fin de l'essai, la valeur de l'angle de frottement est déduite à partir des valeurs de σ'_1 et σ'_3 à la stabilisation du déviateur q en utilisant le modèle Mohr-Coulomb. Notons que la valeur obtenue pour l'angle de frottement effective pour le mélange des deux sédiments fluviaux SC et SD est égale à 37° . Cette valeur vient confirmer les résultats obtenus dans l'essai de cisaillement à la boîte (39°) avec une légère différence due principalement à la méthode de préparation des échantillons et aux imprécisions de leur mise en œuvre.

3.7. Réalisation et suivi de la planche expérimentale

3.7.1. Introduction

Les éco-modelés paysagers réalisés avec des sédiments de dragage sont des ouvrages surveillés particulièrement par les autorités sanitaires. Ainsi, les autorisations de travaux sont très souvent accompagnées d'un planning de suivi sur les risques sanitaires et environnementaux.

Il est à signaler que le suivi et le contrôle des buttes paysagères se partagent sur deux grands volets, un sur la géotechnique et l'autre sur l'aspect environnemental d'où notre proposition de réaliser un prototype de l'éco-modélé paysager.

La réalisation de la planche a pour objectif de valider les résultats obtenus au laboratoire, tout en répondant aux critères de référence fixés dans les normes et guides d'application, tel que le GTR. Ces critères représentent le comportement environnemental et mécanique souhaité dans le temps, de l'ouvrage exposé dans la nature et soumis aux intempéries. Le suivi environnemental et mécanique doit vérifier les données et les mesures obtenues en laboratoire.

3.7.2. Étapes de réalisation de la planche expérimentale :

La mise en place de la planche expérimentale a commencé par une conception du prototype en étudiant les différentes possibilités de réalisation jusqu'à l'achèvement.

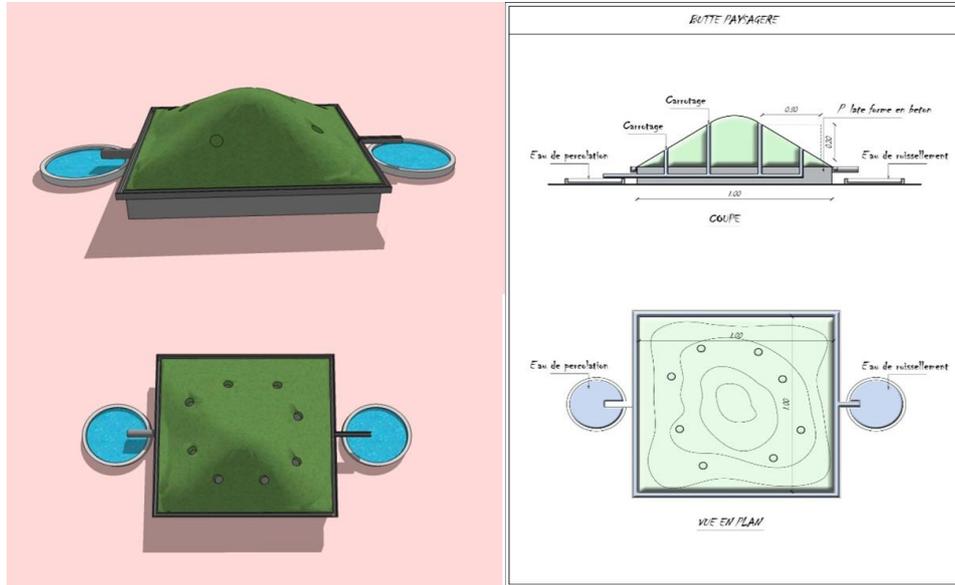


Figure.III. 1. 15 Prototype d'éco-modélé paysager

- La première étape était de réaliser une planche support rainurée en béton de dimensions ($1,2m \times 1,2m \times 0,3m$) permettant l'écoulement de l'eau de percolation qui traverse notre éco-modélé paysager.

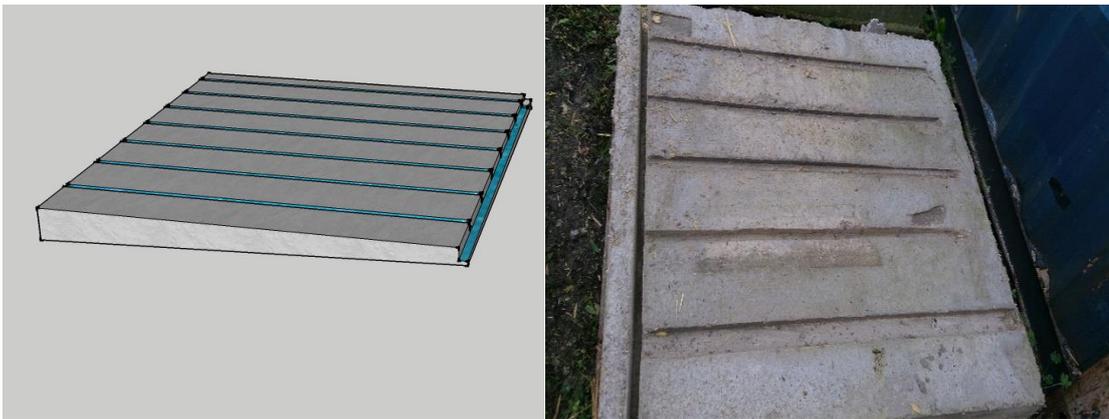


Figure.III. 1. 16 Schéma représentatif de la planche support

- Une fois la planche support réalisée, nous passons à la mise en place d'un cadre en bois tout autour pour assurer un bon compactage sur les extrémités et protéger l'ouvrage de la détérioration. Une couche drainante en gravier avec du géotextile a été posée sur la planche pour filtrer les eaux qui coulent à travers.



Figure.III. 1. 17 Mise en place du cadre de la planche

- L'étape suivante consiste à malaxer le mélange de sédiments fluviaux à utiliser tout en respectant les quantités et la teneur en eau optimale déjà déterminée par l'essai Proctor. La mise en place du mélange sur la planche a été effectuée en le compactant uniformément moyennant un vibro-compacteur.

La quantité de sédiments à introduire a été déterminée en déterminant le volume théorique de la butte à réaliser multiplié par la masse volumique du mélange. La masse globale des sédiments a été estimée à 600 kg de matière sèche.



Figure.III. 1. 18 Mise en place et compactage du mélange des sédiments

- La dernière étape consiste à faire les raccordements nécessaires pour l'écoulement des eaux de ruissellement et de percolation.



Figure.III. 1. 19 Installations des conduites des eaux de ruissellement et de percolation

3.7.3. Suivi environnemental de la planche expérimentale

Dans le cadre du suivi environnemental de la planche expérimentale de l'éco-modélé paysager, nous avons effectué des prélèvements mensuels des eaux de surface et de percolation. La planche étant placée à l'air libre, il nous a été nécessaire d'assurer un arrosage continu et régulier de la butte en utilisant de l'eau déminéralisée, toujours en rapport avec la pluviométrie saisonnière moyenne dans la région de Lille.

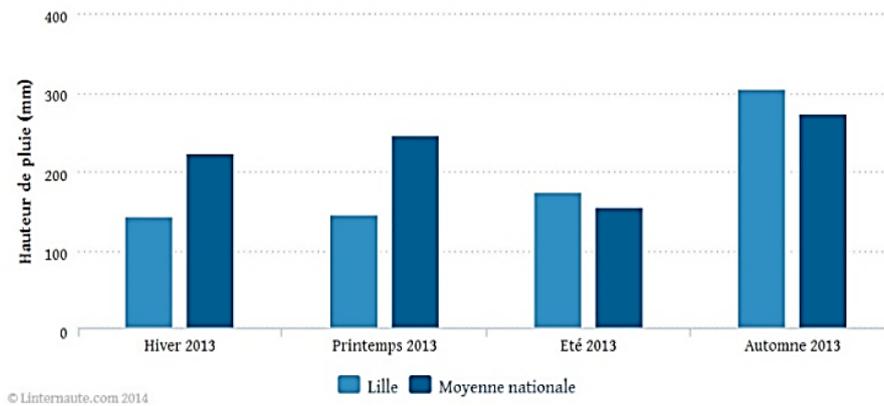


Figure.III. 1. 20 Pluviométrie moyenne à Lille en 2013

L'arrosage de la planche expérimentale a été assuré sur toute la surface sur un intervalle de temps étalé.



Figure.III. 1. 21 Arrosage de la planche expérimentale

Les eaux de surface (ER) et de percolation (EP) sont ensuite récupérées mensuellement puis filtrées et acidifiées pour finalement être analysées en se référant aux descriptifs de la norme de l'essai de lixiviation (NF EN 12457-2). Les résultats d'analyse sont reportés dans le tableau suivant :

<i>Élément</i>	<i>ER</i>				<i>EP</i>			
	<i>P1</i>	<i>P2</i>	<i>P3</i>	<i>P4</i>	<i>P1</i>	<i>P2</i>	<i>P3</i>	<i>Seuil</i>
<i>Pb</i>	<0,08	<0,08	<0,03	<0,03	<0,08	<0,02	<0,02	10
<i>Ni</i>	< 0,09	0,27	0,3	0,38	0,27	0,8	1,03	20
<i>Ba</i>	0,37	0,92	0,76	0,69	1,08	3,22	4,16	700
<i>Mo</i>	< 0,04	< 0,04	<0,02	<0,02	< 0,04	0,35	0,38	10
<i>Se</i>	<0,16	<0,16	0,05	0,08	0,16	0,14	0,12	10
<i>Cd</i>	<0,68	<0,68	<0,29	<0,68	<0,68	<0,29	<0,33	5
<i>Cr</i>	<1,50	<1,50	<0,56	<0,56	<1,50	<0,56	<0,64	50
<i>Sb</i>	<0,1	<0,1	<0,04	<0,04	<0,1	<0,04	<0,04	5
<i>As</i>	<0,05	<0,05	<0,02	<0,02	<0,05	0,04	0,04	10
<i>Cu</i>	< 0,02	0,29	0,09	0,08	0,11	0,65	0,73	50
<i>Zn</i>	0,21	0,30	0,43	0,46	1,91	3,69	5,78	3000
<i>Co</i>	<2,58	<2,58	<2,58	<2,58	5,46	5,21	5,33	10
<i>Sulfate</i>	3,8	6,41	5,34	5,85	113	120	117	150
<i>Chlorure</i>	2,5	4	3	6	75	88	82	200

Tableau.III.1. 6. Résultats des analyses chimiques sur les eaux de ruissellement et de percolation de la planche expérimentale en (ug/l)

Comme l'on peut remarquer selon les premières analyses des eaux de ruissellement et de percolation, les résultats se montrent encourageants. Aucun élément chimique ne dépasse le seuil.

Cependant, et afin de valider définitivement l'aspect environnemental de notre planche expérimentale, le suivi a été fixé pour une durée d'un an.

3.8. Suivi des paramètres mécaniques et environnementaux d'un éco-modélé paysager à base de sédiments marins du GPMD

En raison du manque d'ouvrages d'éco-modélé paysager à base de sédiments fluviaux en France, et dans le but de récolter le maximum de données concernant le comportement et les caractéristiques de ce type d'ouvrages, nous nous sommes orientés vers l'étude d'un éco-modélé paysager déjà existant dans le cadre du projet GPMD. Ceci servira également à établir une comparaison entre les sédiments marins et les sédiments fluviaux dans un tel ouvrage.

Pour le suivi mécanique et environnemental, nous avons essayé d'établir une démarche méthodologique de suivi et de prélèvement des eaux réunissant les informations nécessaires et les précautions à prendre pour maîtriser chaque phase de l'échantillonnage (préparation de la campagne d'échantillonnage, prélèvement, conditionnement et stockage de l'échantillon) et en assurer la qualité. Quant au suivi mécanique, il a été réalisé sur des carottes prélevées de la butte et exploitées à travers des essais œdométriques et de cisaillement.

3.8.1. Suivi mécanique

Le suivi mécanique de l'éco-modélé paysager de Dunkerque a été réalisé sur des échantillons cylindriques carottés à 4m de profondeur, ces échantillons sont ensuite taillés et conservés pour les différents essais mécaniques.



Figure.III. 1. 22

Prélèvement des carottes

3.8.1.1. *Essai œdométrique*

De même que pour la butte à base de sédiments fluviaux, nous avons effectué l'essai œdométrique sur les échantillons de la butte paysagère de Dunkerque afin d'étudier la compressibilité de l'ouvrage.



Figure.III. 1. 23 Préparation de la carotte prélevée pour la réalisation de l'essai œdométrique

Comme pour les sédiments fluviaux, nous avons procédé à la préparation de l'échantillon. Ayant des propriétés sableuse, la taille des échantillons a été effectuée soigneusement pour ne pas les détériorer et influencer ainsi sur les résultats de l'essai. Les résultats de l'essai œdométrique sont illustrés dans le graphe suivant :

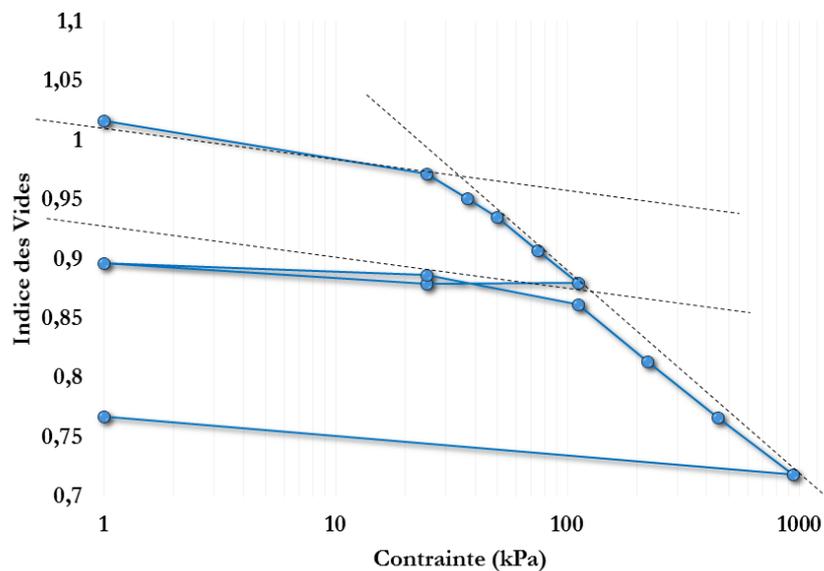


Figure.III. 1. 24 Courbe œdométrique du sédiment marin du GPMD

Nous déterminons ainsi l'indice de recompression (C_s) et l'indices de compression (C_c) ainsi que la contrainte de consolidation σ'_p :

e_0	e_f	σ'_p (kPa)	Cs	Cc
1,016	0,767	35,48	0,012	0,154

Tableau.III.1. 7. Résultats de l'essai œdométrique sur le sédiment marin de Dunkerque

L'échantillon prélevé de l'éco-modélé paysager de Dunkerque présente une contrainte σ'_p de 35 kPa, un indice de compression de 0,15 et un indice de recompression de 0,012. Les valeurs d'indice de compression s'avèrent faible indiquant une compressibilité modérée du matériau. [Schlosser, 1988].

3.8.1.2. *Essai de cisaillement à la boîte*

Les essais ont été réalisés en consolidé-drainé avec les mêmes contraintes utilisées pour les sédiments fluviaux, la courbe de cisaillement est illustrée dans la Figure.III. 1. 25.

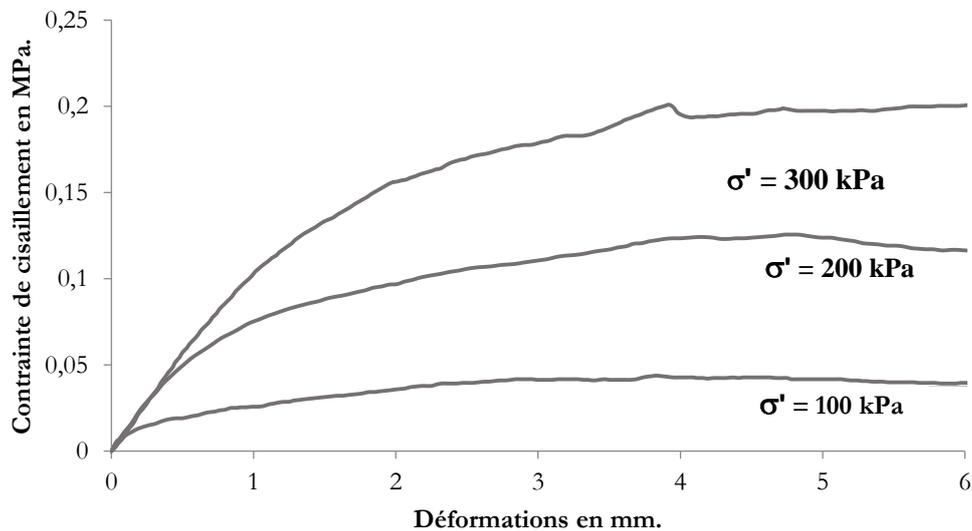


Figure.III. 1. 25 Courbe de cisaillement du sédiment SGPMMD

Contrainte normale σ' en kPa	Résistance au cisaillement r_f en kPa
100	44
200	134
300	203

Tableau.III.1. 8. Résultats de la résistance au cisaillement en fonction de la contrainte normale pour SGPMMD

De même que pour les sédiments fluviaux, nous avons déterminé la cohésion et l'angle de frottement du sédiment SGPMMD :

- $\tau = 0,7959\sigma + 0,0322$
- Cohésion effective $C' = 0,0322\text{MPa} = 32,2\text{ kPa}$

- L'angle de frottement $\phi' = \tan^{-1}(0,7959) = 35,28^\circ$

L'échantillon d'éco-modélé paysager à base de sédiments marins présente une cohésion effective de 32 kPa et un angle de frottement de 35° : ces valeurs se situent dans une gamme classique de valeurs pour des sols cohérents. Ces résultats se rapprochent des résultats obtenus pour le mélange des sédiments fluviaux SD et SC. Ceci conforte l'idée que les sédiments d'une manière générale ont un aspect mécanique et de comportement similaire.

3.8.2. *Suivi environnemental*

Dans un processus de protection de l'environnement et de l'écosystème et pour éviter toute dispersion des contaminants vers la nappe phréatique, il faudrait suivre de près notre éco-modélé paysager en réalisant des puits pour le suivi des eaux souterraines et en faisant un contrôle continu et permanent des eaux de surfaces ainsi que l'analyse fréquente de la matrice solide constituant la butte.

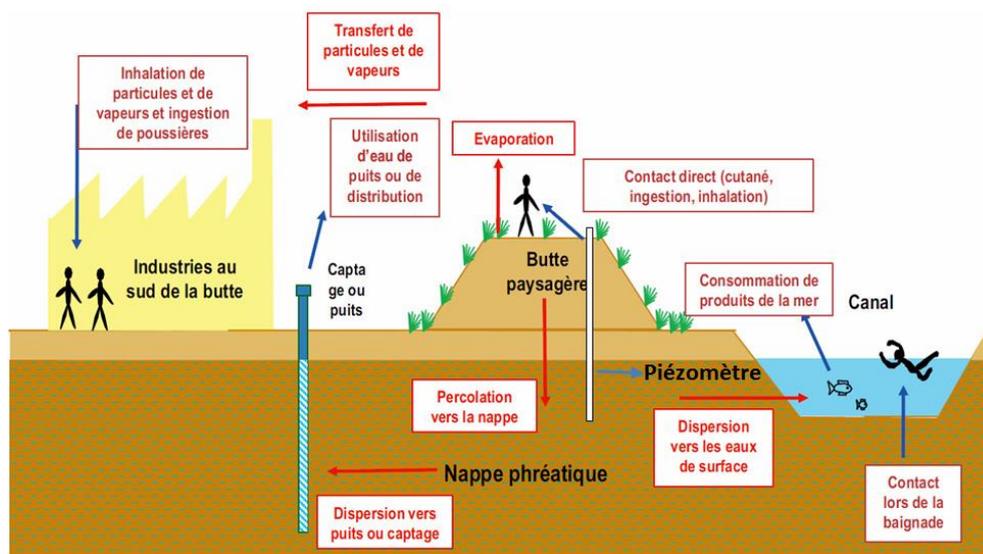


Figure.III. 1. 26 Contexte Suivi environnemental de l'éco-modélé paysager

Dans cette démarche, un suivi environnemental de l'éco-modélé paysager a été effectué et a consisté principalement à :

- Mettre en place des piézomètres. Au total, trois piézomètres ont été installés lors de la campagne de carottage : 2 sur la partie haute de la butte (5 et 10 m), et un en bas de la butte ;
- Analyser les eaux piézométriques à une fréquence d'une fois par mois ;
- Analyser les eaux de ruissellement à une fréquence d'une fois par mois ;

- Prélever des carottes pour des essais de lixiviation : 2 campagnes de carottage au total.

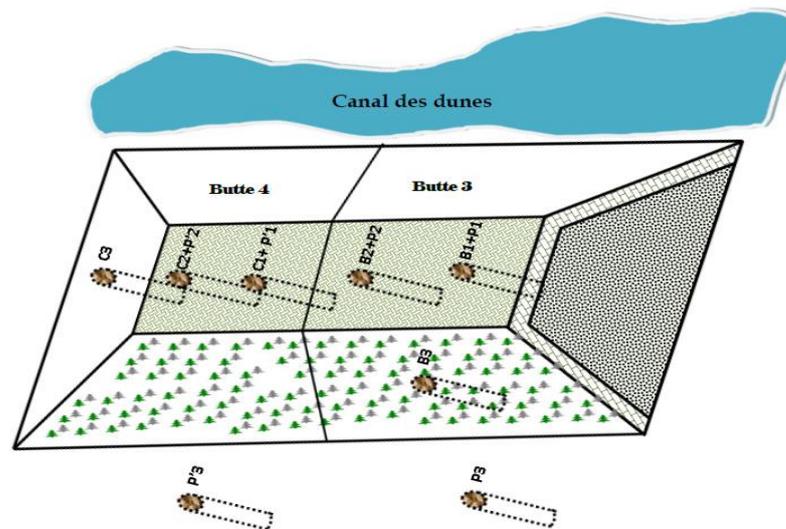


Figure.III. 1. 27 Plan de réalisation des piézomètres

Pour l'évaluation environnementale, la récupération des eaux piézométriques a été effectuée moyennant une pompe à soupape, après avoir mesuré les niveaux d'eau dans chacun des piézomètres, 2 points de mesure seront étudiés : en haut et en bas de la butte. Sur chacun de ces points, on récupérera les écoulements superficiels (de ruissellement) ainsi que les eaux infiltrées (de percolation).

3.8.2.1. Mesure du niveau d'eau

En arrivant sur le terrain, on relève les niveaux d'eau de chacun des piézomètres, et ce dans un laps de temps le plus court possible afin de réduire les effets des fluctuations possibles. La connaissance, la précision et la fiabilité de l'élévation du point de mesure (habituellement le sommet du tubage menant à la crépine et non le tubage protecteur) sont primordiales pour l'interprétation des conditions hydrogéologiques.

Connaître les niveaux d'eau est aussi essentielle puisqu'il en sera déduit la direction et la vitesse d'écoulement (et éventuellement leurs variations dans le temps) de l'eau souterraine au site. Les sondes électriques (à enregistrement automatique pour des mesures cadencées) sont les instruments les plus utilisés pour la mesure de la pression d'eau au-dessus du capteur.

3.8.2.2. Pompage

Pour le suivi des piézomètres installés, nous avons fait recours à une pompe Waterra à soupape qui peut être utilisée dans des tubages de diamètre aussi petit que 2 cm et présente d'ailleurs plusieurs avantages vu qu'elle est facile à utiliser, fiable, portable et sans entretien

particulier. Le système de pompage Waterra peut être utilisé jusqu'à une profondeur de 40 à 60 m pour la purge ou l'échantillonnage des puits.



Figure.III. 1. 28 Système manuel Waterra de pompage

La pompe à soupape fonctionne selon le principe suivant : à la descente, l'eau est poussée à l'intérieur de la tubulure et est piégée lors de la remontée par la valve de retenue fixée à la base de la tubulure. En agitant du haut en bas sans arrêt la tubulure, l'eau remonte jusqu'à la surface. Le prélèvement se fait donc par l'agitation de la soupape au fond du piézomètre dans un intervalle moyen de 3 à 5 min. Cependant, ce type de pompes présente des inconvénients vu qu'elle crée une turbulence par l'agitation de la tubulure dans le puits.

3.8.2.3. Suivi piézométrique de l'éco-modélé

Le suivi environnemental des piézomètres a été effectué pour les eaux de surface et les eaux de percolation de la 4^{ème} tranche de la butte de Dunkerque (Figure.III. 1. 29). L'analyse des prélèvements a été réalisée conformément à la norme EN 12 457-2.



Figure.III. 1. 29 Protocole de suivi des eaux de percolation et de ruissellement de l'éco-modélé paysager

Les tableaux Tableau.III.1. 9 et Tableau.III.1. 10 présentent les résultats des tests de lixiviation pour les eaux piézométriques et de ruissellement :

Elément		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	Seuils	
Sulfates	mg/l	931,4	878,8	811,0	830,5	842,5	940,0	866,4	724	150	mg/l
Chlorures	mg/l	233,5	223,6	226,2	216,6	220,4	259,3	230,1	255,6	200	mg/l
Arsenic	µg/l	<10	<10	<10	2,25	2,25	3,11	3,6	4,6	10	µg/l
Baryum	µg/l	140	199	189	125,57	124,85	93	89	407	700	µg/l
Cadmium	µg/l	<4	<4	<4	0,92	2,15	0,16	0,79	0,8	5	µg/l
Cuivre	µg/l	<10	22	28	10,59	30,93	17	22	9,3	50	µg/l
Chrome	µg/l	<10	<10	<10	2,98	2,98	0,68	0,68	2,6	50	µg/l
Nickel	µg/l	<10	<10	<10	8,37	12,39	10	9	6,85	20	µg/l
Plomb	µg/l	<10	<10	<10	6,04	6,04	2,6	6,2	7	10	µg/l
Zinc	µg/l	102	25	40	19,33	25,15	24	25	25,3	3000	µg/l
Molybdène	µg/l	<10	<10	<10	1,49	5,56	1,8	1,2	8,3	10	µg/l
Sélénium	µg/l	<10	<10	<10	7,14	7,14	5,1	5,1	9,1	10	µg/l
Antimoine	µg/l	<5	<5	<5	5,86	8,83	3,83	7,8	5,2	5	µg/l

Tableau.III.1. 9. Analyse des eaux piézométriques au-dessus de la butte

Elément		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	Seuils	
Sulfates	mg/l	129	89	118	125	43,3	44,1	104,9	209,6	159,5	160,0	187,6	150	mg/l
Chlorures	mg/l	201	80	23	75	26,2	26,4	30,4	117,5	100,3	70,6	91,7	200	mg/l
Arsenic	µg/l	<10	<10	<10	<10	<10	<10	4,37	11,93	11	13	12,7	10	µg/l
Baryum	µg/l	37	41	47	68	144	125	131,13	156,08	156	177	149	700	µg/l
Cadmium	µg/l	<4	<4	<4	<4	<4	<4	0,44	0,44	0,16	0,16	0,16	5	µg/l
Cuivre	µg/l	<10	<10	<10	<10	<10	<10	4,20	6,34	14	10	9,3	50	µg/l
Chrome	µg/l	<10	<10	<10	<10	<10	<10	2,98	2,98	0,68	0,16	2,6	50	µg/l
Nickel	µg/l	<10	<10	<10	<10	<10	<10	3,28	5,56	1,8	2,7	6,85	20	µg/l
Plomb	µg/l	<10	<10	<10	<10	<10	<10	6,04	6,04	2,57	2,57	7	10	µg/l
Zinc	µg/l	10	10	10	23	22	14	5,21	9,48	7,1	3	25,3	3000	µg/l
Molybdène	µg/l	<10	<10	<10	<10	<10	<10	6,97	12,78	15	21	8,3	10	µg/l
Sélénium	µg/l	<10	<10	<10	<10	<10	<10	7,14	5,52	12	16	9,1	10	µg/l
Antimoine	µg/l	<5	<5	<5	<5	<5	<5	5,86	5,86	3,83	3,83	5,2	5	µg/l

Tableau.III.1. 10. Analyse des eaux de ruissellement de la butte

Dans la même démarche de suivi environnemental, des essais de lixiviation ont été effectués sur un échantillon de la butte carotté à 4m de profondeur. Les résultats d'analyse sont reportés dans le tableau ci-après :

Éléments	Concentration mg/kg	Seuil mg/kg
As	0,4	0,5
Ba	0,8	20
Cd	<0,04	0,04
Cr	0,10	0,5
Cu	0,40	100
Mo	0,16	10
Ni	0,14	20
Pb	0,09	10
Sb	0,11	5
Se	<0,1	10
Zn	0,17	200
Chlorure	420	200
Sulfate	225	150

Tableau.III.1. 11. Essai de lixiviation d'un échantillon de carotte prélevée

En suivant les recommandations de l'arrêté du 11 janvier 2007, nous remarquons qu'au niveau du suivi des eaux de percolation, la majorité des éléments métalliques ne dépassent pas les seuils maximaux établis par la réglementation. Cependant, les taux de chlorures et de sulfates sont plus élevés que les seuils autorisés et ce, en raison de l'agressivité et de la salinité du milieu marin dans lequel est installée notre éco-modélé paysager. Nous remarquons aussi un dépassement du seuil d'Antimoine pour les prélèvements P4, P5, P7 et P8.

Une augmentation brusque des teneurs en sulfates et chlorures entre les prélèvements P5 et P1 a été distinguée pour l'eau de ruissellement. Un faible dépassement du seuil de Molybdène, d'Antimoine et d'Arsenic a été aussi signalé pour l'eau de ruissellement.

De même, pour l'échantillon prélevé, nous constatons que les chlorures et les sulfates dépassent le seuil autorisé. Dans ce cas, nous procédons à la réalisation d'un essai de percolation normalisé.

Quand l'essai de lixiviation n'est pas concluant en raison des dépassements remarqués du seuil pour quelques éléments chimiques, on passe à un essai de percolation avec un régime descendant. Comme les sédiments fluviaux étaient inertes, nous n'avons pas eu de recours à cet essai.

3.8.3. Test de percolation

3.8.3.1. Objectif

Dans un objectif de simulation du relargage des éléments polluants issus du sédiment marin de Dunkerque utilisé dans l'éco-modélé paysager, une évaluation de plusieurs essais de détermination du comportement à la lixiviation doit être réalisée. Les principaux paramètres susceptibles de rapprocher les conditions de l'essai de percolation normalisé (CEN/TS 14405) des conditions réelles sur terrain ont été évaluées. Le rapport liquide/solide et le niveau de compactage initial de l'échantillon ont aussi été étudiées. [74]

L'instrumentation et le suivi environnemental de notre sédiment constituent un essai intéressant pour simuler la cinétique de relargage au moins à court terme des éléments traces métalliques. Un recul plus important sur des sites instrumentés sera nécessaire pour juger de la pertinence de ce type de méthode pour une approche à moyen/long terme.

3.8.3.2. Échantillonnage et préparation de la colonne

L'échantillon de sédiments utilisés provient du GPMD. Pour l'essai de percolation, l'échantillon mis en place est un sédiment saturé en eau, non remanié et dont la structure n'a pas modifié au cours du prélèvement.

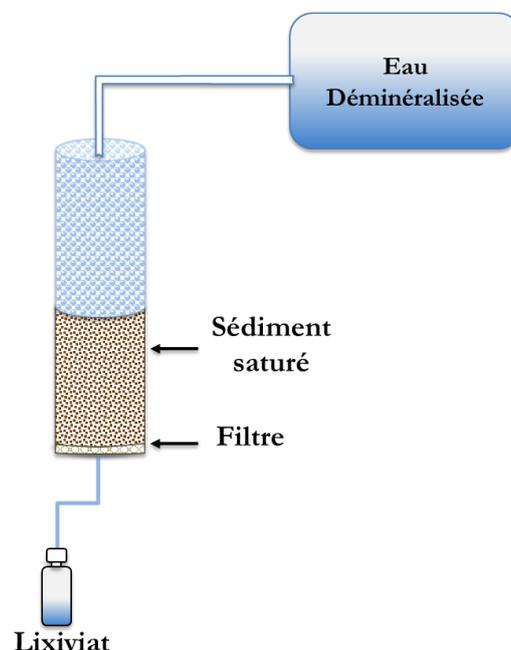


Figure.III. 1. 30 Principe de l'essai de percolation

La mise en place du sédiment a été effectuée sur 3 couches pour une hauteur de 20 cm (assurer un bon compactage de chaque couche pour éliminer les bulles d'air et garantir une bonne

homogénéité de l'échantillon). Une fois l'échantillon mis en place, on introduit un filtre en inox et on rajoute de l'eau déminéralisée sur une hauteur de 20 cm tout en respectant le rapport $L/S = 2$. Le long de cet essai, l'essai de percolation se fera à charge variable en raison du faible débit d'eau traversant l'échantillon (10ml/jour). L'éluât obtenu est acidifié pour ensuite analyser des différents éléments présents dans l'échantillon et leur évolution en fonction du temps.



Figure.III. 1. 31 Dispositif de l'essai de percolation

3.8.3.3. Détermination du coefficient de perméabilité

Généralement, la mesure directe de la perméabilité des sols en laboratoire s'effectue selon deux procédures, dites « à charge constante » et « à charge variable ». Les essais à charge constante sont mieux adaptés aux sols de forte perméabilité et les essais à charge variable aux sols de faible perméabilité. Dans le cas du sédiment GPMD, nous avons adopté un essai à charge variable.

La perméabilité de l'échantillon a été calculée à partir de la loi de Darcy qui relie le débit Q à la conductivité K , via la différence de charge hydraulique Δh , la section A et l'intervalle de temps t . Elle est définie par :

$$Q(t) = K \frac{\Delta h}{L} A \quad \text{Eq. II. 6}$$

Dans le cas du sédiment GPMD, nous avons adopté un essai à charge constante en appliquant la formule suivante :

$$k = \frac{V_w(t) \cdot L}{A \cdot t \cdot \Delta h} \quad \text{Eq. II. 7}$$

Avec :

- **K** : Coefficient de perméabilité en m/s ;
- **$V_w(t)$** : Volume d'eau traversant l'éprouvette au cours du temps en m^3/s ;
- **L** : Longueur de l'échantillon en m ;
- **A** : Section de l'échantillon en m^2 ;
- **Δh** : Différence de charge hydraulique en m ;
- **t** : Temps de mesure en *secondes*.

Les résultats de l'essai de perméabilité sont reportés dans le tableau Tableau.III.1. 12:

	V (l)	Tps (s)	K (m/s)
Test 1	0,019	86 400	4,64E-05
Test 2	0,017	86 680	4,14E-05
Test 3	0,015	86 330	3,66E-05
Test 4	0,015	86380	3,66E-05
Test 5	0,014	86400	3,42E-05
Test 6	0,043	259200	3,50E-05
Test 7	0,026	172800	3,17E-05

Tableau.III.1. 12. Coefficient de perméabilité du sédiment GPMD

D'après les classes de perméabilité des sols à l'usage du génie civil, notre sédiment est classé comme étant un sol moyennement argileux.

3.8.3.4. Résultats d'analyse

L'essai de percolation réalisé permet d'évaluer l'influence sur le relargage des paramètres jugés les plus représentatifs des conditions auxquelles un déchet est soumis. Pour cela les protocoles d'essais de percolation émis par la norme CEN/TS 14405 ont été respectés.

L'essai de percolation a été réalisé avec un rapport $L/S=2$ pour un prélèvement de 2 fois par semaine. Le ratio Liquide/Solide (L/S) utilisé lors de ce test permet de simuler la migration des polluants à plus ou moins long terme avec :

- $L/S = 1$: simulation à court terme (estimation à moins de 5 ans) ;
- $1 < L/S < 10$: simulation à moyen terme (estimation entre 5 et 50 ans). [74]

Les analyses chimiques ont commencé après la stabilisation des volumes de lixiviats obtenus. Les prélèvements ont été effectués tous les 5 jours pendant une durée de 2 mois.

Deux modes de représentation ont été choisis. Le relargage des métaux lourds sont tracés en fonction du temps et du rapport L/S. En effet la représentation en fonction du rapport L/S permet de s'affranchir du paramètre «temps des essais» pour pouvoir comparer les résultats de ce test avec d'autres échantillons. En plus, l'échelle en L/S peut être également utilisée pour extrapoler les résultats des tests à des conditions de terrain pertinentes, pour évaluer l'impact. Le rapport L/S atteint pour cet essai est de 0.3 l/kg.

Pour le scénario considéré, on regarde le relargage des métaux lourds à plus ou moins long terme. Les résultats ont été représentés en mg/l et en mg/l cumulé afin de connaître la quantité maximale de métaux lourds relargués. Les résultats obtenus du relargage des métaux lourds en fonction du temps et du rapport L/S sont présentés sur les Figures : Figure.III. 1. 33, Figure.III. 1. 34 et Figure.III. 1. 35.

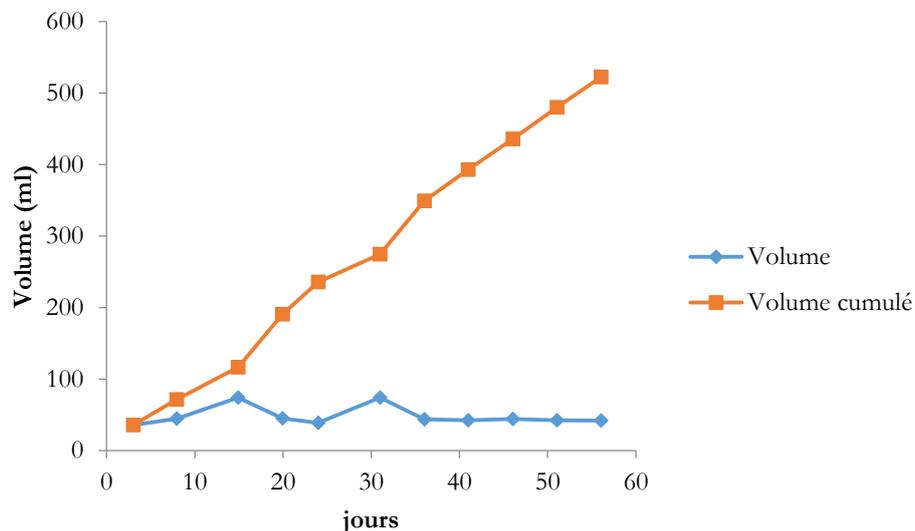


Figure.III. 1. 32 Volume total cumulé en fonction du temps.

L'évolution des éléments chimiques a été représentée en fonctions du temps et du rapport L/S. Les concentrations des principaux éléments chimiques comme l'Arsenic, le Baryum, le Nickel, le Sélénium, les chlorures et les sulfates sont présentées dans les graphes ci-après :

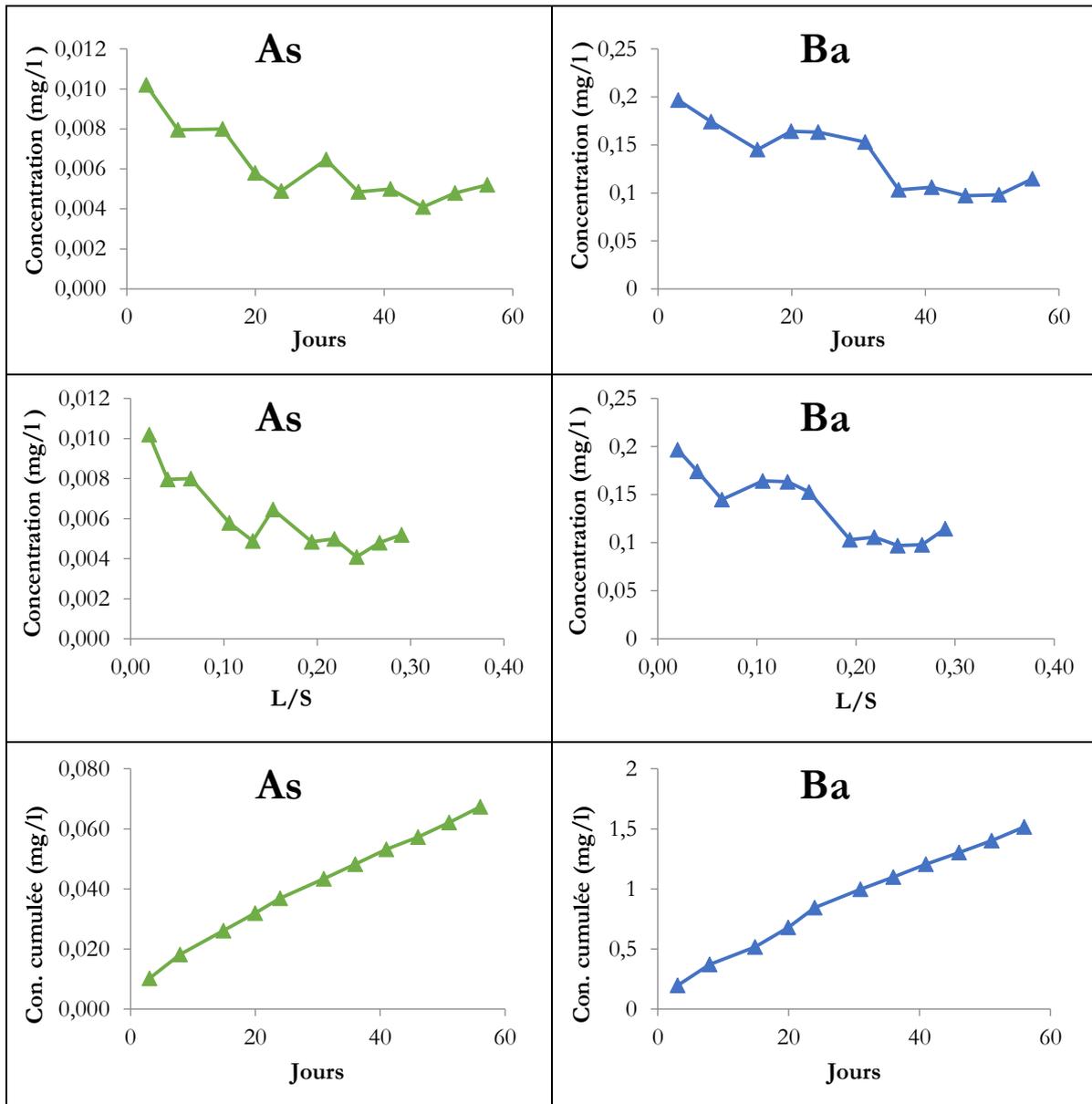


Figure.III. 1. 33 Résultats du test de percolation pour As et Ba.

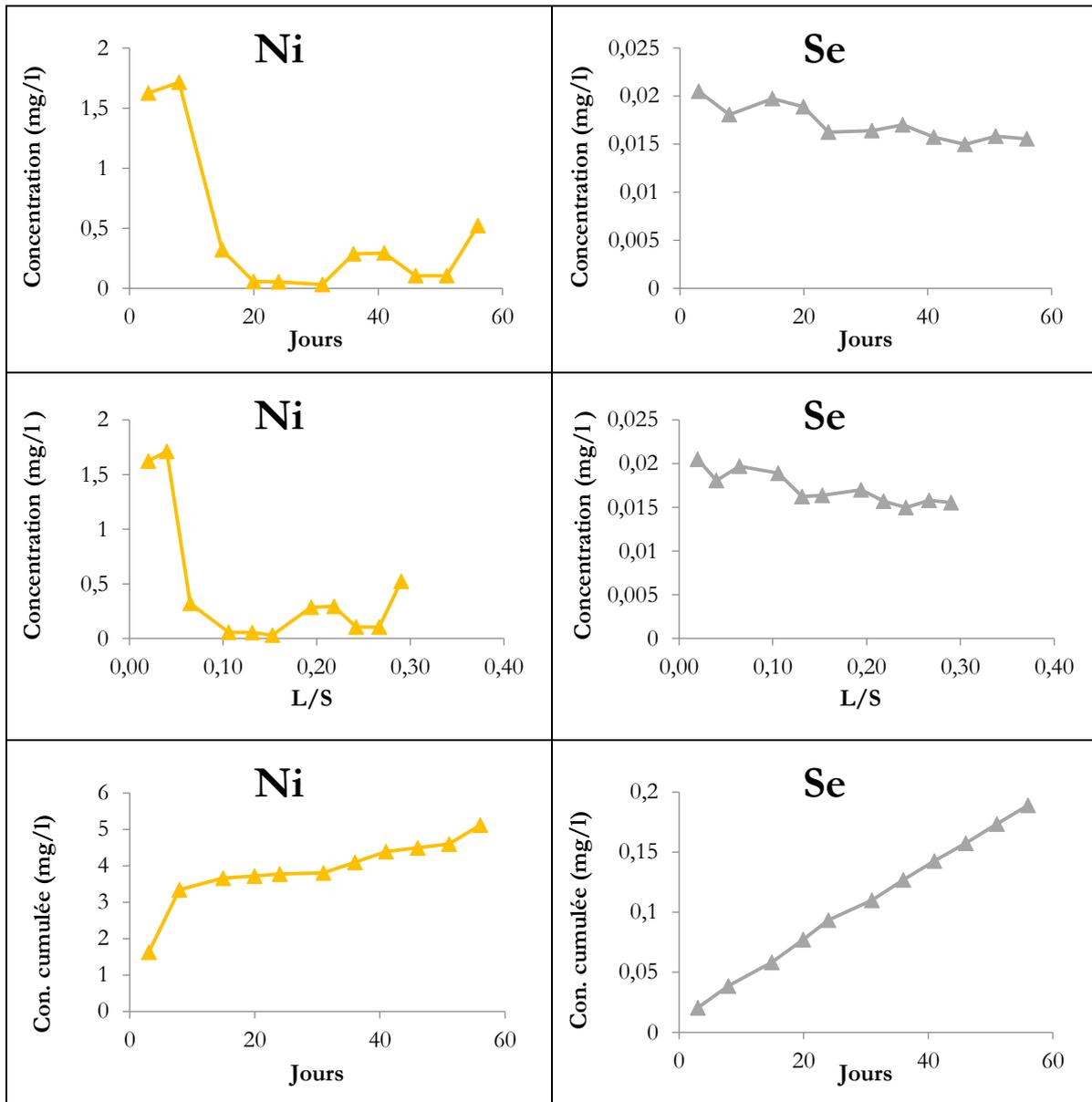


Figure.III. 1. 34 Résultats du test de percolation pour le Ni et le Se

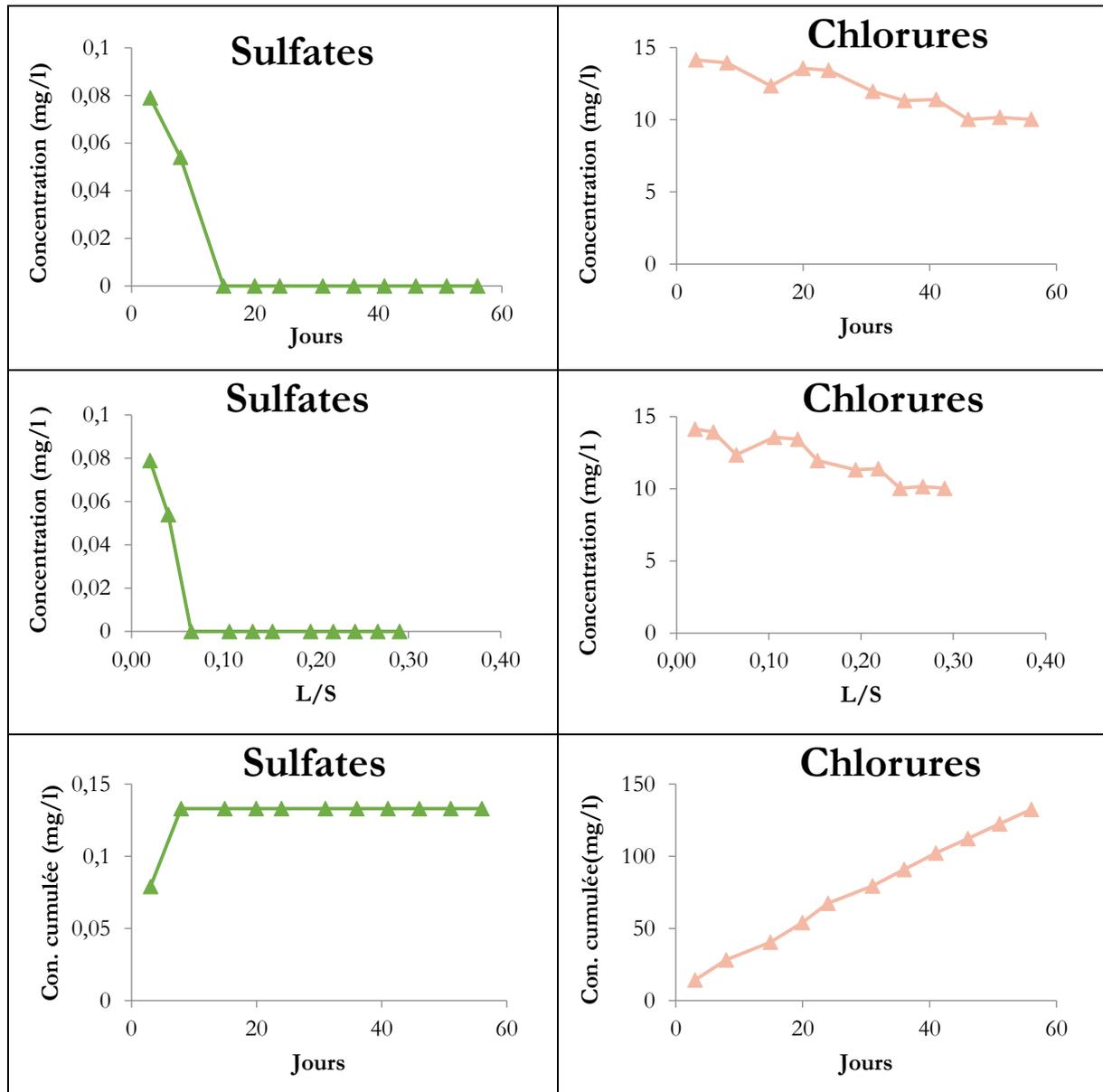


Figure.III. 1. 35 Résultats du test de percolation pour les sulfates et les chlorures

Les éléments tels que le Cd, le Cr, le Mo, le Pb, et Sb ont été en dessous du seuil de détection de l'ICP-OES. En ce qui concerne les éléments détectés, l'As, le Ba, le Se et les chlorures ont un comportement de relargage similaire au cours du temps. Le relargage le plus important se situe au cours des premières échéances, ensuite, les concentrations se stabilisent au cours du temps. Ces espèces pourraient avoir un comportement diffusif car le relargage au cours du temps est linéaire. Cependant, le comportement du Ni et des sulfates est caractéristique d'une espèce, qui, après une éventuelle courte période de diffusion, se termine par un épuisement. En outre, les concentrations maximales des métaux cumulées au cours du temps reste très faibles aux seuils limites fixés.

3.9. Conclusion

Dans cette partie destinée à l'étude de la valorisation des sédiments fluviaux en éco-modélé paysager, nous avons pu élaborer un matériau à base de mélange de deux sédiments fluviaux. Le comportement mécanique de ce mélange a été analysé à travers des essais œdométriques, triaxiaux, et de cisaillement direct.

D'un point de vue mécanique, le mélange de sédiments étudié présente de meilleures caractéristiques par rapport à l'utilisation d'un des deux sédiments en totalité pour notre valorisation en éco-modélé paysager.

Suite à la comparaison des résultats mécaniques et de consolidation, nous remarquons bien que les résistances au cisaillement sont de valeurs presque similaires que ce soit pour le mélange de sédiments fluviaux SD et SC ou le sédiment marin SGPMD. Concernant la consolidation des sédiments, nous constatons que les sédiments fluviaux présentent une meilleure consolidation par rapport aux sédiments marins qui généralement contiennent plus de sable et par conséquent une faible cohésion. L'essai triaxial n'a pas pu s'établir sur les carottes à base de sédiments marins en raison de la friabilité de ces dernières empêchant la taille des échantillons, aussi qu'elles contiennent des verreries et des cailloux bloquant le déroulement de l'essai dans des conditions normales (fuites, déchirure de la membrane étanche...).

Cependant, les résultats obtenus pour le mélange de sédiments fluviaux montrent une similitude avec ceux obtenus dans l'essai de cisaillement direct : En effet, l'ordre de grandeur de la valeur l'angle de frottement obtenu en essai triaxial se situe dans la même gamme de valeurs que l'angle de frottement obtenu grâce à la boîte de cisaillement. Après la fin de l'essai, un gonflement de l'échantillon a été observé sans qu'il se cisaille, ceci est dû principalement à la nature de l'essai (CD ou CU).

Quant à la planche expérimentale à base de sédiments fluviaux, étant d'âge récent, les sédiments n'ont pas eu le temps de bien se consolider, nous avons procédé à quelques tests de prélèvement qui n'ont pas aboutis. Le même problème a été constaté dans d'autres ouvrages à base de sédiments comme c'était le cas pour la planche expérimentale dans le projet SETARMS. Pour cela, l'opération de carottage sera reportée à l'échéance 360 jours.

D'un point de vue environnemental, les analyses des eaux de ruissellement et des lixiviats ont montré que la majeure partie des métaux lourds a été en dessous du seuil de détection de l'ICP. Les concentrations des polluants détectés ont été inférieures aux limites fixées par la législation en vigueur.

En fin de compte, cette démarche démontre que la valorisation des sédiments marins ou fluviaux en éco-modélé paysager est une technique très prometteuse. Nous avons aujourd'hui plus de recul sur l'utilisation des sédiments marins en éco-modélé paysager étant donné que le port de Dunkerque est passé à des ouvrages à l'échelle 1. Les résultats obtenus pour les sédiments fluviaux à travers l'étude menée en laboratoire ou à travers notre planche expérimentale s'avèrent très encourageants.

Filière 2 :
APPLICATION TECHNIQUE
ROUTIERE

Filière 2 :**APPLICATION TECHNIQUE ROUTIERE****3.10. Introduction**

Ce chapitre est consacré à la valorisation des sédiments fluviaux précédemment caractérisés, en couches routières. En fonction des propriétés physiques, minéralogiques et mécaniques des sédiments de dragage, les proportions du mélange seront fixées afin de formuler un matériau routier qui respecte les exigences et les contraintes imposées par la norme et le secteur de valorisation envisagé. La démarche de valorisation est présentée dans la figure suivante :

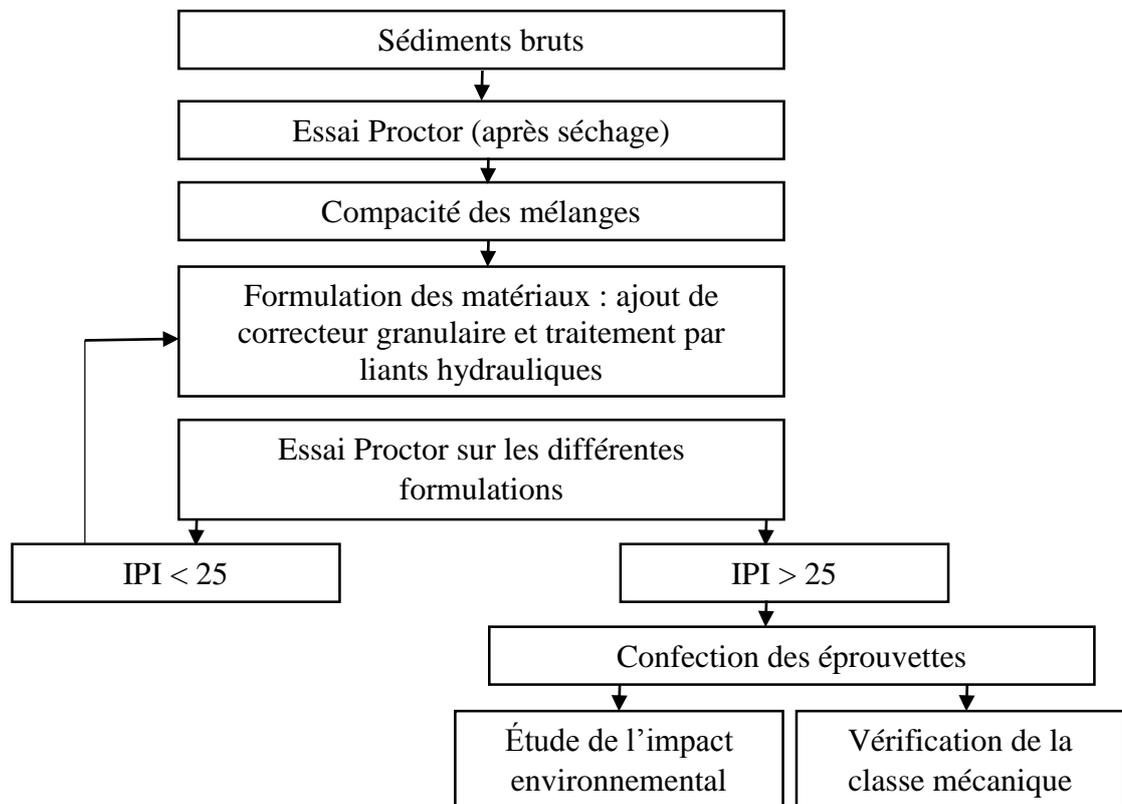


Figure.III. 2. 1 Méthodologie pour la valorisation des sédiments de dragage

Le principal intérêt de l'étude de formulation à base de sédiments fluviaux est de remplacer une fraction de sable utilisé dans les matériaux routiers par un pourcentage de sédiments.

3.11. Démarche de valorisation

Les proportions des mélanges ont été fixées en se basant sur des travaux antérieurs réalisés à l'école des Mines de Douai [1] ; [5] ; [12]. Après avoir réalisé plusieurs formulations, le mélange choisi, se compose de 20% de sédiment du Hem, 20 % de sédiment de la Deûle, 60% de sable boulonnais ; ce mélange sable/sédiment est ensuite traité à la chaux et au liant hydraulique.

Matériaux	Pourcentages
Sédiment du Hem	20%
Sédiment de la Deûle	20%
Sable Boulonnais	60%

Tableau.III.2. 1. Composition de la formulation retenue

3.11.1. Liants hydrauliques

Deux liants hydrauliques ont été utilisés au cours de la réalisation des différentes formulations :

3.11.1.1. Rolac 645 LH

Le ROLAC® 645 LH produit à l'usine du Havre est un liant hydraulique routier polyvalent pouvant être utilisé en traitement en place ou en centrale avec un grand nombre de matériaux. Composé à base de clinker et de laitier, ses propriétés sont spécifiquement adaptées pour le traitement des granulats et des sols pour la réalisation d'assises de chaussées et de terrassements, Il convient également pour le retraitement des chaussées en place. Sa résistance maximale est garantie à 180 jours.

Les dosages à respecter ont été choisis conformément au tableau suivant :

Type sol	Dosage
Remblais	2 à 5%
Arase	2 à 5%
Couches de forme	4 à 7%
Assises de chaussée	6 à 8%
Traitement des graves	3 à 4%
Traitement des sables	4 à 7%

Tableau.III.2. 2. Recommandations de dosage (Lafarge)

3.11.1.2. *Rolac PI LH*

Le ROLAC® PI LH produit à l'usine du HAVRE est un liant hydraulique à base de clinker permettant d'améliorer les sols en obtenant une traficabilité rapide lors de la réalisation de remblais, d'arases de terrassement et de plates-formes et de pistes.

Particularités :

- L'évolution rapide de la réactivité du ROLAC PI LH impose un délai de compactage adapté ;
- Sa réactivité rapide permet son utilisation à des températures inférieures à 5°C ;
- Sa réactivité permet de traiter des sols en th (dans la limite de +35% du W_{opn} , à vérifier par des études préalables).

Le ROLAC PI LH est composé de plus de 60% chaux (CaO) et de 20% de dioxyde de silice (SiO₂). Les principales caractéristiques chimiques et minéralogiques du Rolac PI et de la chaux vive sont reportées dans le tableau ci-dessous.

Composition	% massique
SiO ₂	20,79
Al ₂ O ₃	5,4
Fe ₂ O ₃	2,22
MgO	1,10
Cl ⁻	0,03
K ₂ O	3,40
Na ₂ O	traces
CaO	65,90
SO ₃	3,40
Mn	0,5

Tableau.III.2. 3. Composition chimique du Rolac PI LH

3.11.2. *Chaux vive*

La chaux vive qui est le produit direct de la thermolyse (ou calcination) du calcaire, principalement de l'oxyde de calcium (CaO) a été sélectionnée. L'incorporation de la chaux permet à court terme de flocculer les argiles, de diminuer la plasticité des sols et d'augmenter la consistance. Elle permet également d'apporter un gain de résistance mécanique sur un long terme (de l'ordre d'un an) [64]. Elle permet également de décaler l'optimum Proctor vers une teneur en eau plus élevée et de réduire la masse volumique sèche, ce qui augmente la résistance des matériaux traités à la chaux.

Pour ces avantages, la chaux vive présente un élément principal dans notre étude expérimentale. Pour déterminer le pourcentage de chaux vive dans le matériau routier, l'essai de fixation de la chaux selon la norme (NF ISO 10390) a été effectué. Cet essai consiste à mesurer le pH d'un mélange sédiment/ eau dont le rapport L/S= 5 et dans lequel on introduit des différents dosages de chaux jusqu'à atteindre une valeur de pH égale à 12,4 qui correspond à la valeur favorable pour le développement des hydrates cimentaires. Sur la figure ci-après, on voit qu'à partir d'une proportion de 2%, la valeur du pH se stabilise.

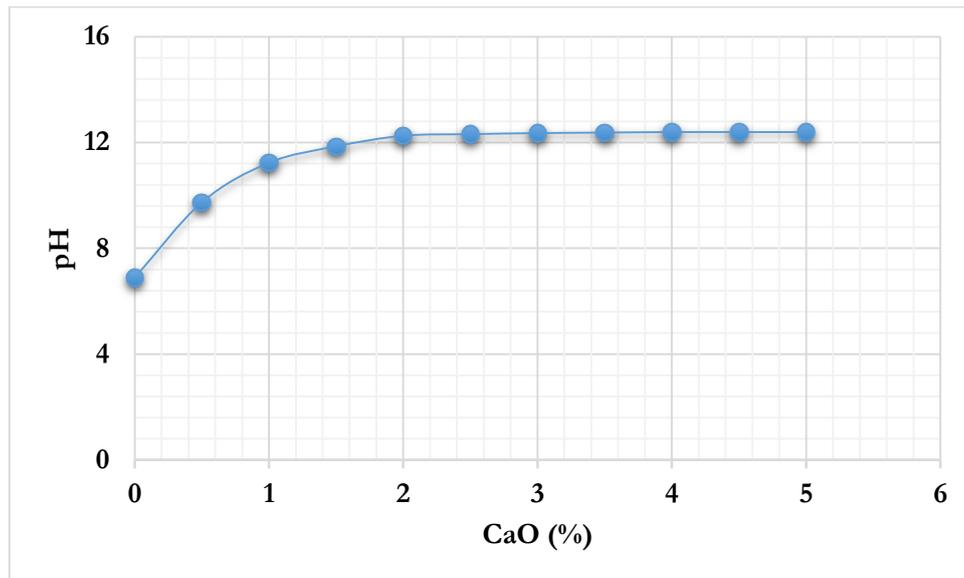


Figure.III. 2. 2 Essai réactivité à la chaux vive

3.12. Composition des mélanges

Suivant leurs caractéristiques physiques, mécaniques et en fonction de leurs compacités, plusieurs mélanges à base des sédiments fluviaux de la Deûle et du Hem pour une valorisation en technique routière ont été effectués.

A ces mélanges de la chaux vive des liants hydrauliques ainsi que du sable boulonnais ont été rajoutés afin d'avoir des performances optimales.

3.12.1. Choix des dosages

3.12.1.1. Dosage en sédiment

Au début des formulations, l'utilisation de 100% de sédiment SD a été envisagée en raison de leur granulométrie uniforme bien étalée et de leur bonne capacité portante (IPI).

Cependant, les essais de compression ont montré que le mélange est trop friable et qu'il ne présente pas de cohésion lui permettant d'obtenir la résistance exigée pour une valorisation en sous-couches routières.

Des correcteurs granulaires ont été rajoutés au sédiment brut SD en intégrant un peu de fines pour une meilleure cohésion. Pour cela, des tests de compacité ont été réalisés sur des mélanges à différents pourcentages de sable boulonnais, de SD et de SH :

Mélange	SD	SH	SB	τ_s (g/cm ³)	Compacité (%)
FR1	100%	-	-	2,49	69,6
FR2	70%	-	30%	2,52	74,7
FR3	20%	20%	60%	2,62	77,4

Tableau.III.2. 4. Compacité des mélanges bruts

Le mélange FR3 avec 20% du sédiment SD, 20% de sédiment SH et 60% de sable boulonnais présente la meilleure compacité et la meilleure densité. Ce mélange sera retenu pour la suite des essais.

3.12.1.2. Dosage des liants hydrauliques

Dans le domaine routier, l'utilisation des matériaux à base de liants hydrauliques, nécessite une étude mécanique complète afin de maîtriser au mieux le matériau mis en place, [5].

L'utilisation de liants permet, pour les matériaux fins qui sont sensibles à l'eau, de mettre en place des liens forts entre les particules, pour augmenter les résistances, et diminuer la porosité ouverte qui permet le passage de l'eau libre dans la structure.

Deux liants hydrauliques ROLAC IP LH et ROLAC 645 LH ont été choisis : le premier peut garantir la résistance maximale à 28 jours, quant au deuxième, il l'assure à 360 jours. Ces deux liants sont polyvalents pour nos types de sédiments. Le pourcentage du liant a été fixé à 7%.

L'ajout de la chaux, précédemment fixé à 2% permettra donc d'améliorer les résistances mécaniques et de réduire les surfaces de contact des particules fines et des matières organiques.



Figure.III. 2. 3 Composition globale des mélanges

Mélange	SD	SH	SB	Rolac IP	Rolac 645	C
FR3	20%	20%	60%	7	-	2
FR4	20%	20%	60%	-	7	2

Tableau.III.2. 5. Composition des formulations réalisées au laboratoire

La distribution granulométrique du mélange est présentée sur la figure 1.5. La détermination des coefficients C_c et C_u [48] :

$$C_u = D_{60}/D_{10} \quad \text{Eq. II. 8}$$

$$C_c = D_{30}/(D_{60} \times D_{10}) \quad \text{Eq. II. 9}$$

montre un coefficient de courbure C_c de 66,6 et un coefficient d'uniformité C_u de 1,03. Cette distribution granulaire respecte les critères et les exigences d'uniformité et de courbure fixés par la norme.

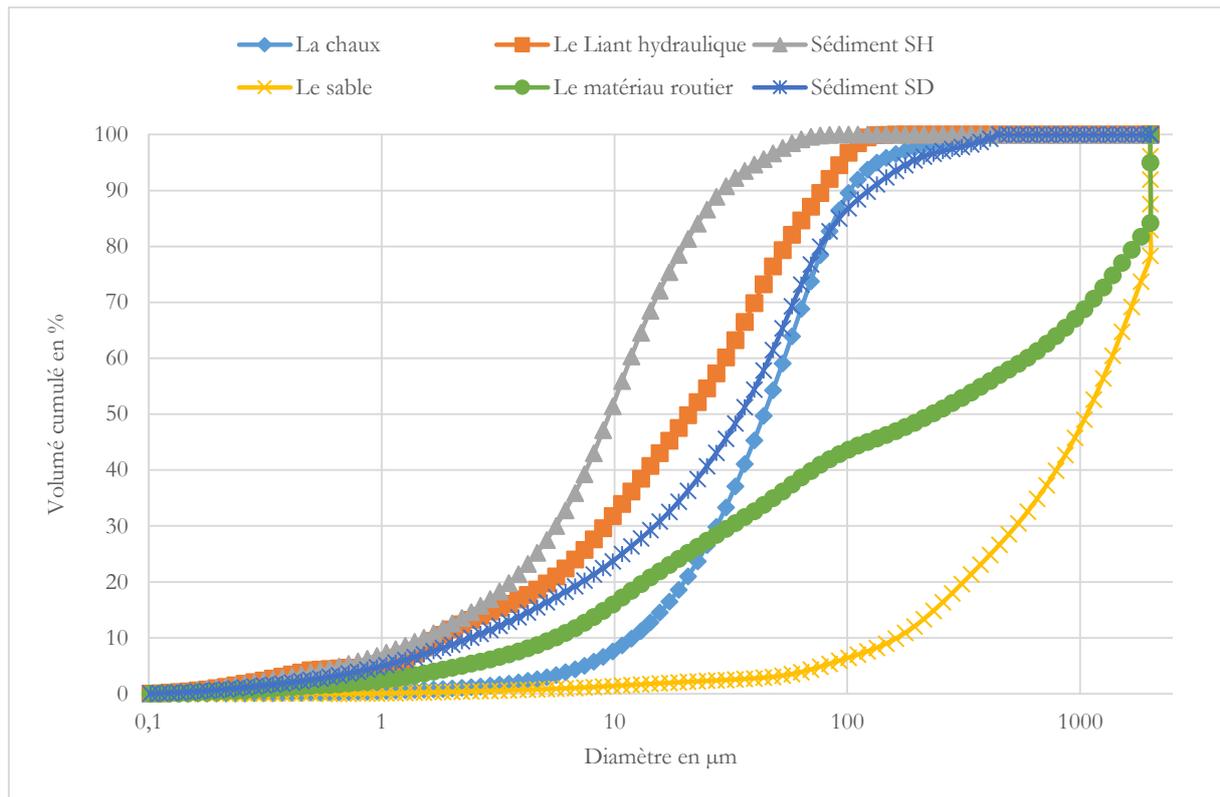


Figure.III. 2. 4 Distribution granulométrique du mélange retenu

3.12.2. Essai d'aptitude des liants rajoutés

L'essai d'aptitude au traitement, décrit dans la norme NF P94-100, consiste principalement à accélérer les phénomènes de prise hydraulique à l'aide d'un essai de compression diamétrale R_{tb} . Il permet également de mesurer le gonflement volumique (Gv), Il s'effectue sur des éprouvettes d'éclatement 1. Nous avons donc choisi des éprouvettes cylindriques de dimensions ($D=5\text{cm}$; $H= 5\text{ cm}$). Elles sont compactées à W_{OPM} et $0,96\gamma d_{OPM}$.

Le temps de conservation initial des éprouvettes est fixé à 4 heures : le temps nécessaires à la chaux pour agir sur la matière organique et les particules argileuses. Les éprouvettes sont ensuite immergées dans l'eau pendant 7 jours dans une étuve à 40°C .

Les valeurs de référence du gonflement volumique et de la compression diamétrale sont représentées dans le tableau ci-dessous :

Traitement	Aptitude du sol	G _v (%)	R _{tb} (MPa)
Liant hydraulique + Chaux	Adapté	≤5	≥0,2
	Douteux	5 < G _v ≤ 10	0,2 > R _{tb} ≥ 0,1
	Inadapté	>10	<0,1
Chaux seule	Adapté	≤5	
	Douteux	5 < G _v ≤ 10	
	Inadapté	>10	

Tableau.III.2. 6. Valeurs limites de référence pour évaluer l'aptitude d'un sol

En respectant les conditions de l'essai, l'immersion des éprouvettes déjà confectionnées a été effectuée. Les résultats sont reportés dans le tableau suivant :

Échantillon	G _v (%)	R _{tb} (MPa)
E1FR4	1,67	0,09
E2FR4	2,33	0,11
E3FR4	2,14	0,09

Tableau.III.2. 7. Résultats des essais de gonflement et de compression diamétrale

Les résultats montrent que le traitement à la chaux et au liant hydraulique présente un faible gonflement volumiques < 5% classant le matériau comme apte au traitement, cependant, en terme de résistance diamétrale, elle ne dépasse pas 0,1 MPa ce qui rend le traitement dans ce cas douteux. Les essais de portance ont été donc abordés pour mieux connaître le comportement de notre mélange à base de sédiments fluviaux.

3.13. Étude du comportement mécanique du mélange

Afin d'approuver le mélange comme matériau routier, il faut procéder à l'étude de son comportement mécanique à travers des essais mécaniques jugés indispensables. La méthodologie générale de valorisation des sédiments traités aux liants hydrauliques en technique routière consiste en premier lieu à réaliser les essais de compactage et de portance à travers l'essai Proctor et l'essai d'indice de portance immédiat, la résistance à la compression et à la traction et finalement à déterminer son module.

3.13.1. Essai Proctor Modifié - IPI

Afin d'évaluer les capacités d'utilisation du mélange en sous-couches routières, il faut connaître sa teneur en eau et sa densité sèche optimales. Ainsi, nous réalisons des essais Proctor, qui permettent de reproduire le compactage du matériau, et donc aboutir à un matériau plus

résistant. Ensuite, la mesure de la portance est effectuée, pour contrôler la bonne tenue du mélange après sa mise en place, sous le passage des engins de chantier.

L'essai Proctor Modifié et l'IPI a été effectué selon les normes (NF P 94-078) et (NF P 94-093) sur le mélange (sédiment/ sable) et sur le mélange traité afin de voir l'effet du liant hydraulique. Les courbes relatives à l'indice de portance immédiat et aux densités sèches sont présentées sur la Figure.III. 2. 5 et la Figure.III. 2. 6 :

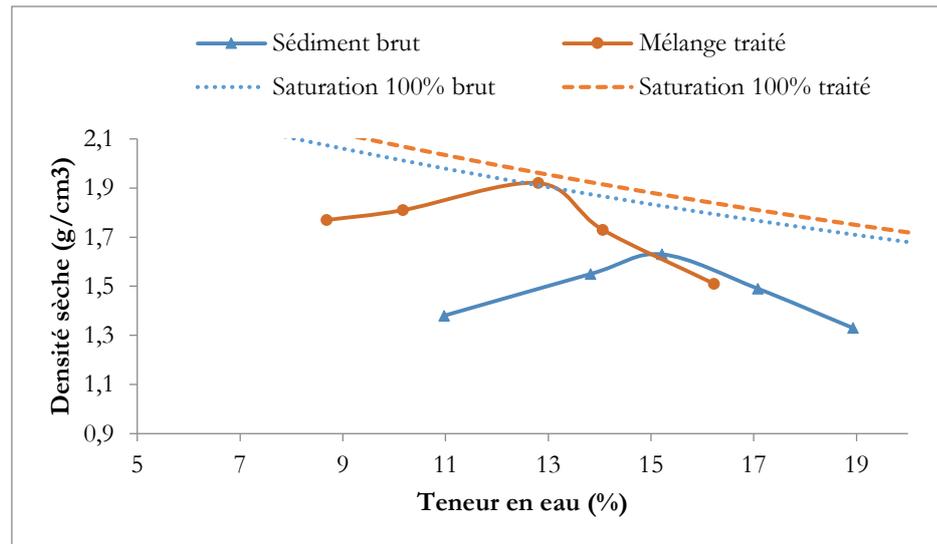


Figure.III. 2. 5 Courbes Proctor du mélange brut et traité

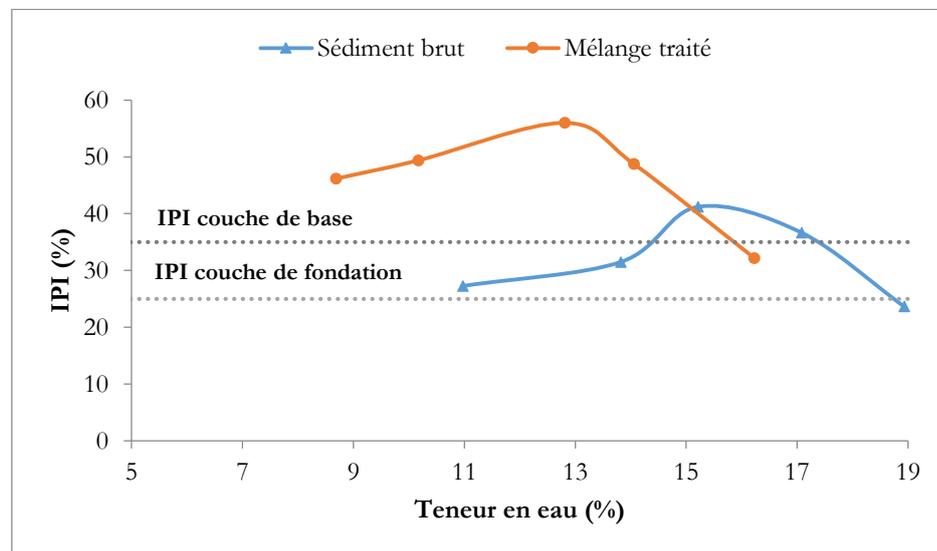


Figure.III. 2. 6 Courbes IPI du mélange brut et traité

	Mélange Brut	Mélange traité
Teneur en eau optimale(%)	16	14
Densité sèche optimale (g/cm ³)	1,63	1,92
IPI (indice portant immédiat) à W_{opm}	41	56

Tableau.III.2. 8. Évolution de la densité et l'IPI du mélange traité

À travers les essais Proctor et de portance, nous constatons une augmentation de la densité sèche qui passe de 1,63 à 1,92 g/cm³ contre une diminution de la teneur eau en optimale d'environ 2% qui est due à la présence de la chaux et du liant hydraulique favorisant la consommation de l'eau. Quant à l'indice de portance immédiat, il est de l'ordre de 56. Ce mélange présente de bonnes caractéristiques de portance à court terme qui permettent d'envisager une utilisation en couche de base.

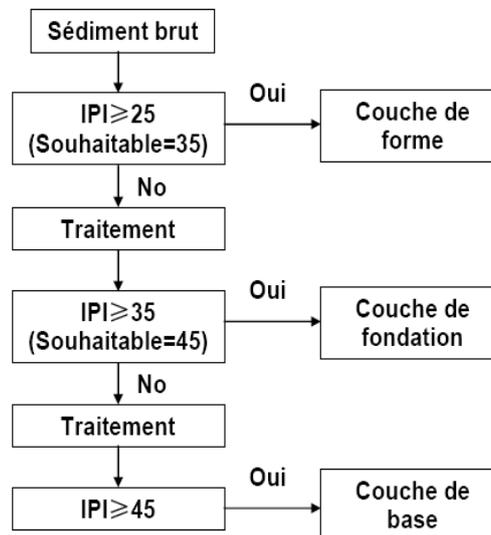


Figure.III. 2. 7 Choix des couches de chaussée en fonction de la valeur d'IPI

Une fois les caractéristiques optimales (W_{OPM} , IPI , γd_{OPM}) déterminées, nous passons à une étude approfondie qui consiste à déterminer des propriétés mécaniques de notre matériau à travers des essais de compression, de traction et de module de Young sur des éprouvettes cylindriques (5x10 cm) réalisées au laboratoire.

À court terme, les sédiments traités aux ciments peuvent être utilisés en technique routière. Mais pour que ces sédiments puissent être classés dans les abaques de classification des matériaux routiers une étude à long terme du comportement mécanique est nécessaires.

3.13.2. Performances mécaniques à long terme

L'étude mécanique à long terme du mélange se base principalement sur l'essai de compression (R_c), de traction (R_t) et du module d'élasticité (E). La résistance R_c se mesure par des essais d'écrasement des éprouvettes cylindriques en compression uni-axiale selon la norme (NF EN 13286-41), pour la résistance R_t , elle s'effectue en compression diamétrale suivant la norme (NF EN 13286-42). Les paramètres R_t et E sont deux critères primordiaux pour la détermination de la classe de résistance du matériau estimée à 360 jours.

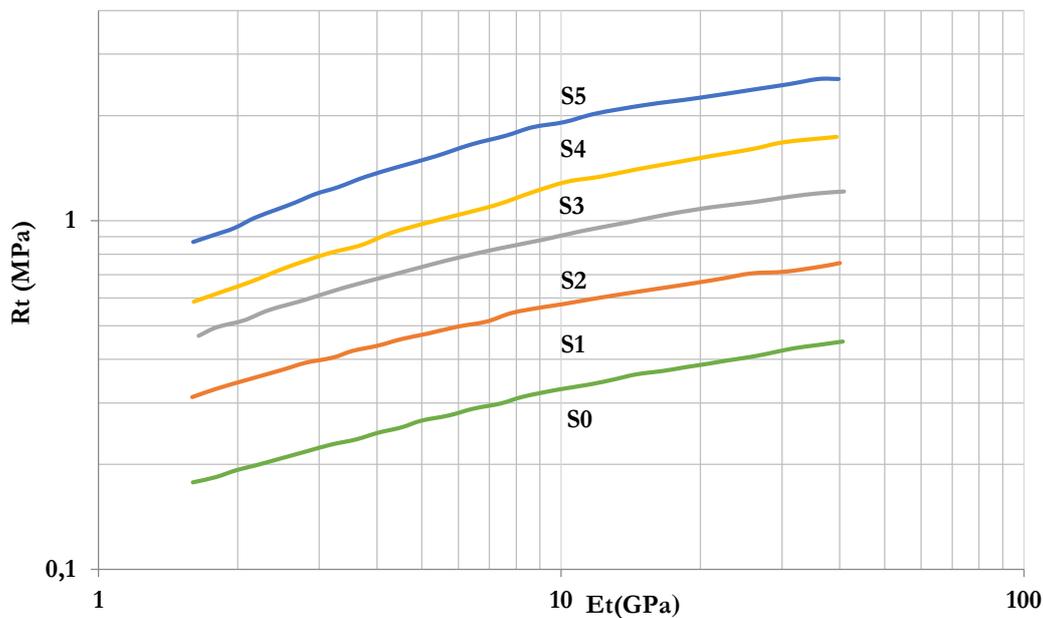


Figure.III. 2. 8 Abaque de classification des matériaux routiers à 360 jours

3.13.2.1. Confection des éprouvettes

En se basant sur le guide de traitement des sols à la chaux et aux liants hydrauliques « GTS », le mode de confection des éprouvettes dépend de la dimension maximale des plus gros éléments contenus dans le matériau selon les prescriptions de la norme NF P 98 114 3. Les essais mécaniques se font sur des éprouvettes d'éclatement 2 et de dimensions $D \times H = 5 \times 10$ cm confectionnées suivant les modalités de la norme (NF P 98 230-3).

La préparation des éprouvettes se fait en tenant compte de la densité sèche et de la teneur en eau optimales déjà déterminées par l'essai Proctor. La quantité du mélange à mettre en place dans le moule est calculée selon l'équation Eq. II.10. Quant à la confection et la compression du matériau dans le moule, elle se fait avec une vitesse de 0,1 mm par seconde. Après démoulage par extrusion, les éprouvettes sont pesées, introduites soigneusement dans des boîtes en plastiques hermétique bien fermées pour laisser les liants agir puis elles sont conservées dans une

température de 20°C pour les prochaines échéances. Les éprouvettes sont réalisées pour les échéances 7, 28, 60, 90 et 360 jours.

$$M = \frac{V \cdot \gamma_d \cdot 0,97 (100+W)}{100} \quad \text{Eq. II. 10}$$

Avec :

V : Volume de l'éprouvette en cm³;

γ_d : Masse volumique apparente sèche du matériau en g/cm³;

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

W : Teneur en eau du mélange.

3.13.2.2. Essai de compression simple

Les essais de résistance mécanique en compression permettent de caractériser plusieurs paramètres : la cinétique de prise, l'âge autorisant la circulation sur la couche traitée, la résistance à l'immersion au jeune âge et la résistance au gel. Dans notre cas d'étude, nous nous sommes intéressés au paramètre permettant de déterminer l'âge autorisant la circulation des engins de chantier sur la couche à base de sédiment traité. Le critère de traficabilité est jugé satisfaisant pour une résistance supérieure à 1MPa à 7 jours. La mesure de la résistance à la compression à différentes échéances permet d'explorer l'évolution de la résistance des matériaux formulés en fonction du temps. Les essais ont été effectués aux échéances suivantes : 7, 28, 60 et 90 jours.



Figure.III. 2. 9 Dispositif de l'essai de compression simple

La figure ci-après rassemble l'évolution de la résistance mécanique en fonction du temps (7, 28, 60 et 90 jours). D'après les résultats obtenus sur les échantillons testés à 7, 28, 60 et 90 jours, on peut observer un gain de résistance dans le temps. Le critère de traficabilité autorisant la

circulation des engins est respecté, R_c à 7 jours > 1 MPa. Les résultats mesurés confirment la bonne performance mécanique des sédiments traités pour une utilisation en couche de base. En effet, on constate que le développement initial de la prise est rapide ce qui rend la valorisation des sédiments en couche de base intéressante.

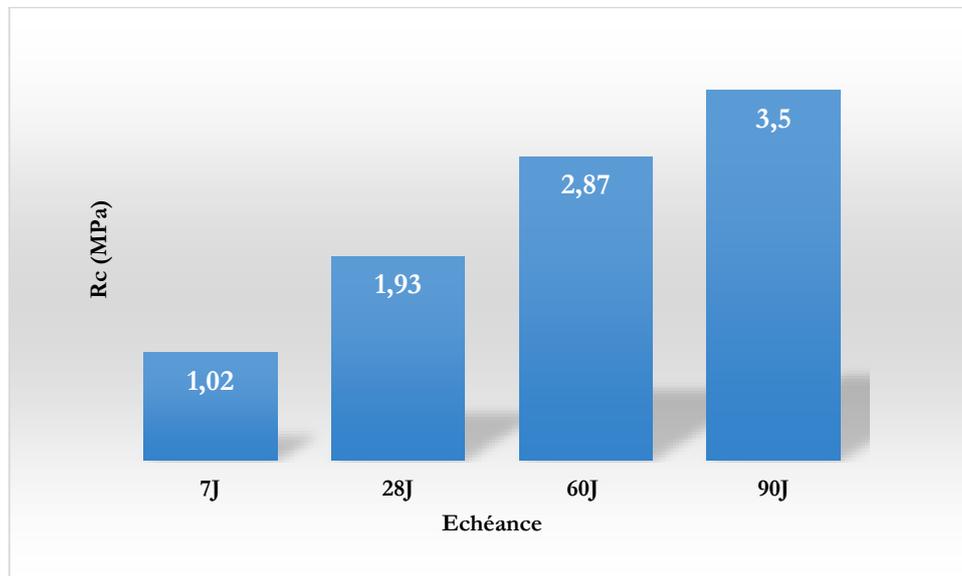


Figure.III. 2. 10 Résultats de l'essai de compression simple à 7, 28, 60 et 90 jours

3.13.2.3. Module d'élasticité E

Le module d'élasticité à la compression E_c a été mesuré en se référant à la norme [NF EN 13286-43]. L'essai a été effectué à l'aide du dispositif présenté en sur la Figure.III. 2. 11. Ce dispositif est composé :

- Une presse INSTRON 5500R, permettant d'avoir une charge jusqu'à 150 kN ;
- Logiciel de commandé de presse ;
- Système d'extensométrie équipé de trois capteurs LVDT positionnés à 120° autour de l'axe de l'éprouvette ;
- Capteur de force adapté au niveau de charge ;
- Système d'acquisition adapté pour traiter le signal de capteur de force et des capteurs LVDT.



Figure.III. 2. 11 Dispositif de mesure de module d'élasticité E_c

Le comportement plastique du mélange étudié correspond aux déformations permanentes qui s'y appliquent sans qu'il ne se fissure ; On admet que ces déformations se produisent au-delà d'un seuil de contrainte appelé seuil de plasticité ou limite d'élasticité.

Les déformations des échantillons traités après 28, 60 et 90 jours de cure sont obtenues après le déplacement des 3 capteurs sur une hauteur de 5 cm. Les courbes contrainte/déformation sont illustrés sur la Figure.III. 3. 12.

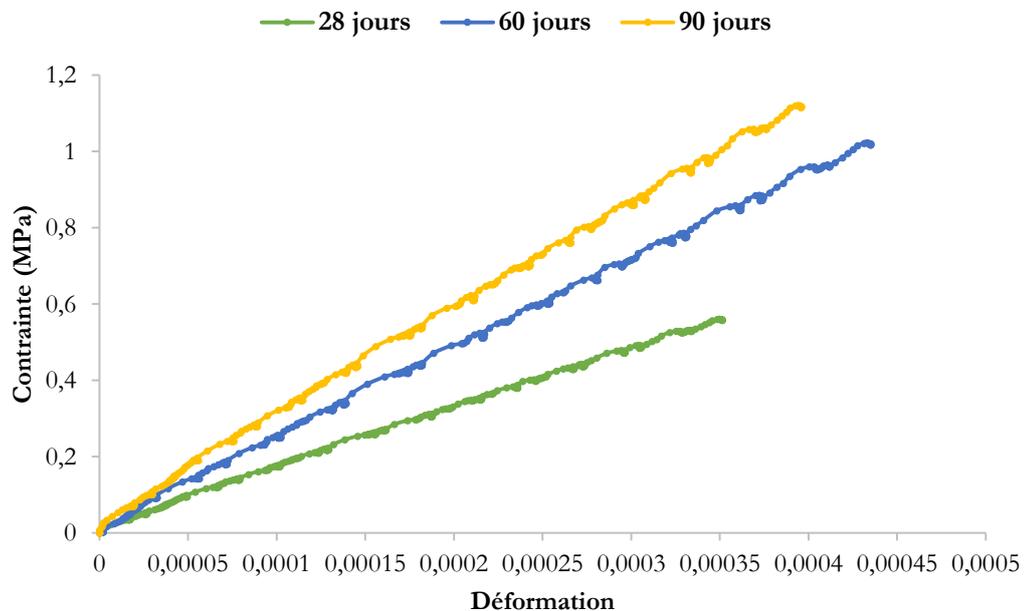


Figure.III. 2. 12 Mesure du module d'élasticité à 28, 60 et 90 jours

D'après les mesures de module d'élasticité en fonction des échéances, on observe une évolution significative de la déformation entre 28 et 90 jours. Les résultats obtenus montrent une amélioration du comportement mécanique de la formulation à base de sédiments passant de 1,5 GPa (28 jours) à 2,8 GPa (90 jours).

3.13.2.4. *Compression diamétrale*

Cet essai a pour but d'atteindre un état de traction dans la zone centrale de l'éprouvette cylindrique. Ceci est réalisé par la compression de cet échantillon selon le diamètre.

Ce protocole est classiquement utilisé pour la caractérisation de matériaux fragiles pour lesquels l'essai de traction uniaxiale est délicat à mettre en œuvre. Seule, la force de compression est mesurée, ce qui conduit ensuite à une étape de traitement des données pour déduire la contrainte à la rupture au centre de l'échantillon.

L'essai a été réalisé selon la norme (NF EN 13286-42) en appliquant une charge linéaire constante sur deux génératrices diamétralement opposées de notre éprouvette, la première est perpendiculaire au plan de rupture, quant à la deuxième, elle fait un angle de 60° par rapport à la première (Figure.III. 2. 13). La résistance à la traction est déterminée à partir de la force appliquée par la presse au moment de la rupture de l'échantillon (F_r en N) en utilisant la formule suivante :

$$R_{tb} = 2 \times 10^{-2} \frac{F_r}{\pi \varnothing h} \quad \text{Eq. II. 11}$$

Avec :

F_r : l'effort maximal supporté par l'éprouvette exprimé en N ;

h : la longueur de l'éprouvette exprimé en mm ;

\varnothing : en mm, le diamètre de l'éprouvette exprimé en mm.

La résistance à la traction correspond à 80% de la résistance à la traction indirecte :

$$R_t = 0,8 \times R_{tb} \quad \text{Eq. II. 12}$$

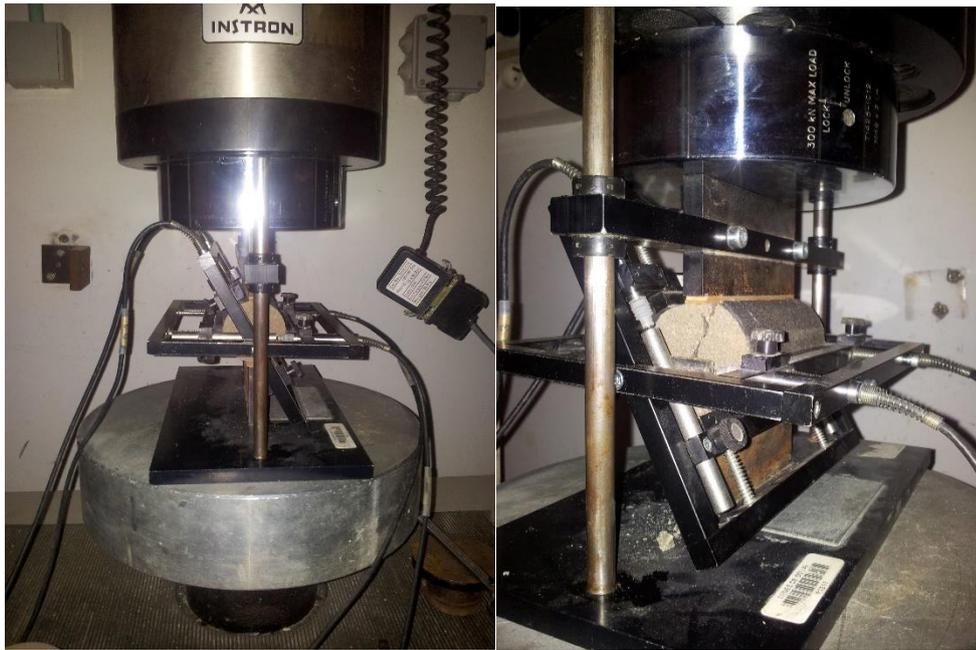


Figure.III. 2. 13 Protocole de réalisation de l'essai de compression diamétrale

La compression diamétrale a été réalisée pour les échéances suivantes : 28, 60 et 90 jours. L'évolution de résistance à la traction est illustrée sur la Figure.III. 2. 14. D'après les résultats obtenus, on observe une évolution de la résistance au cours de temps. Les résultats obtenus confirment bien ceux obtenus en résistance à la compression et présentent des bonnes propriétés pour une valorisation en couche de base.

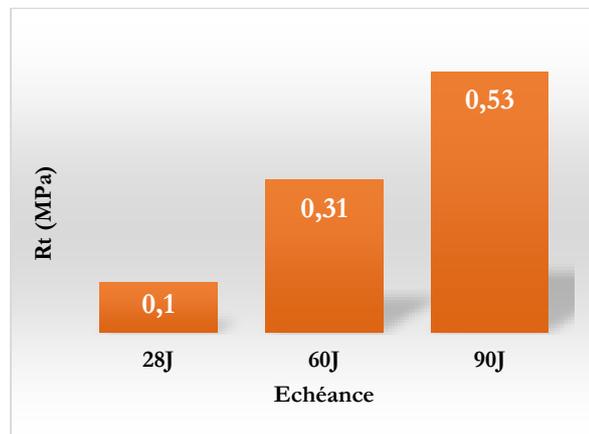


Figure.III. 2. 14 Résultats de l'essai de compression diamétrale.

3.13.2.5. Classification GTS du matériau formulé

D'après le GTS, les valeurs de référence pour la classification des matériaux sont définies après 360 jours de cure. Selon les résultats obtenus après une échéance de 28 jours, nous pouvons estimer le module d'élasticité et la résistance à la traction à 360 jours en utilisant des coefficients

empiriques à 28 ou 90 jours en fonction du type de liants utilisés, les coefficients sont présentés dans les équations suivantes :

$$\frac{R_{t28}}{R_{t360}} = 0,6 \text{ et } \frac{E_{28}}{E_{360}} = 0,65 \quad \text{Eq. II. 13}$$

$$\frac{R_{t90}}{R_{t360}} = 0,7 \text{ et } \frac{E_{90}}{E_{360}} = 0,75 \quad \text{Eq. II. 14}$$

Rt (MPa)				E (GPa)			
28	60	90	360 (estimé)	28	60	90	360 (estimé)
0,1	0,31	0,53	0,75	1,5	2,3	2,8	3,7

Tableau.III.2. 9. Évolution de la densité et l'IPI du mélange traité

À partir du couple (Rt, E) du mélange traité, il est possible de lui attribuer une classe mécanique. Elle correspond au numéro de la zone (S0 à S5) où se situe le matériau dans l'abaque de classement du GTS reporté ci-dessous :

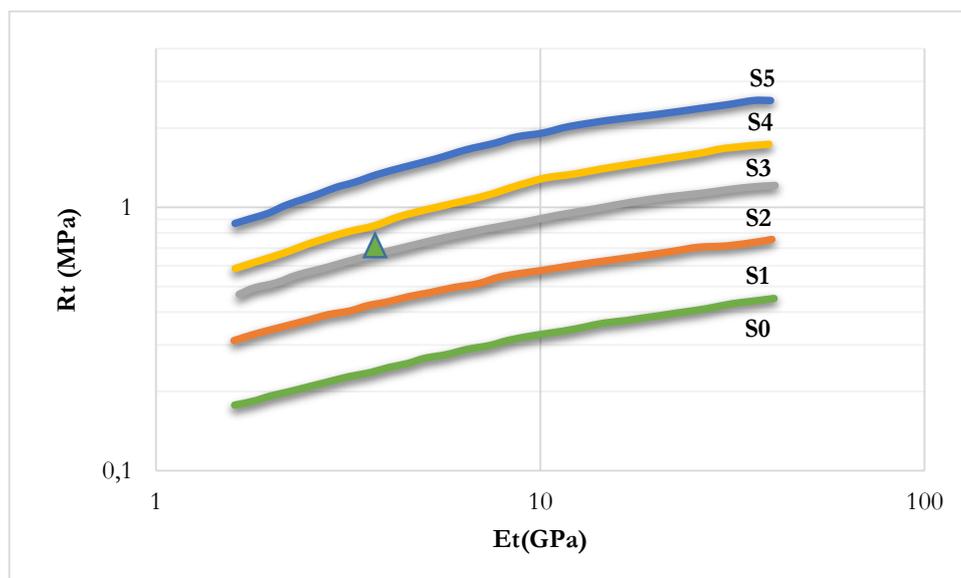


Figure.III. 2. 15 Classification de la formulation à base des sédiments fluviaux

À 360 jours, la formulation à base de sédiments fluviaux se classe en S3. Cette classe de matériaux est conforme pour une utilisation en couches d'assises de chaussées. La formulation étudiée présente des performances mécaniques acceptables pour une utilisation en couche de base. Après la validation de la formulation étudiée à l'échelle laboratoire, nous ferons l'étude in situ à travers la réalisation d'une planche expérimentale afin de valider définitivement la faisabilité industrielle.

3.14. Étude et suivi d'une planche expérimentale à base de sédiments fluviaux

3.14.1. Protocole de réalisation

En complément à l'étude en laboratoire, nous présentons dans cette partie les résultats d'un programme expérimental visant à caractériser et identifier le comportement mécanique et environnemental réel de la planche expérimentale à base de sédiment.

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

Le but est de confirmer les résultats obtenus en laboratoire par un suivi de comportement mécanique à 60 jours et 360 jours du sédiment traité dans une planche expérimentale. Les résultats de suivi vont permettre d'avoir un retour sur le comportement mécanique et de recueillir des informations au niveau environnemental.

Dans la même approche du suivi mécanique du mélange choisi, nous avons effectué une planche expérimentale à l'échelle laboratoire de dimensions(1m × 1m × 0,20m). Un vibro-compacteur avec une charge de 15kN a assuré l'installation et le compactage de la couche routière. Les étapes de la réalisation de la planche sont comme suit :

- a. Réalisation de la planche support en béton et des rainures pour le drainage des eaux d'infiltration ;
- b. Mise en place d'une couche drainante en gravier et installation des parois latérales en bois ;
- c. Malaxage du mélange traité avec respect des différents dosages et des durées de traitement ;
- e. Étaler le mélange sur la plate-forme ;
- f. Compactage uniforme de la couche de la route ;
- g. L'installation de la tuyauterie des eaux de ruissellement et les eaux de percolation.



Figure.III. 2. 16 Étapes de réalisation de la planche expérimentale

En ce qui concerne le suivi mécanique de la planche, nous l'avons effectué sur des échantillons carottés à 60 jours.



Figure.III. 2. 17 Campagne de carottage de la planche expérimentale de la route

Le suivi de la planche s'effectue de point de vue mécanique et environnemental :

- Sur le plan environnemental, le suivi consiste à verser un volume bien précis mensuellement d'eau déminéralisée en rapport avec la pluviométrie de la zone de Lille ;
- Sur le plan mécanique, le suivi est effectué à travers des échantillons carottés de la planche à des différentes échéances : 28, 60 et 90 jours.

3.14.2. Étude mécanique de la planche expérimentale

Le suivi mécanique de la planche expérimentale a été évalué par la réalisation d'une campagne de carottage à 90 jours. L'évaluation des caractéristiques mécaniques a été déterminée à travers l'essai de compression simple, l'essai de traction et le module d'élasticité.

La mesure de la résistance à la compression et à la traction et le module d'élasticité (E) à long terme permet d'explorer l'évolution de la résistance des matériaux formulés en fonction du temps, les essais ont été effectués aux échéances suivantes : 28, 60 et 90 jours pour les échantillons réalisés au laboratoire et à 90 jours pour les échantillons prélevés de la planche expérimentale.



Figure.III. 2. 18 Réalisation de l'essai de compression sur la carotte prélevée de la planche expérimentale

Les résultats obtenus à 90 jours sont estimés à 360 jours en utilisant des coefficients empiriques.

	Rc (MPa)				Rt (MPa)				E (GPa)			
	7	28	60	90	28	60	90	360E	28	60	90	360E
Ech. Laboratoire	1,02	1,93	2,87	3,5	0,1	0,31	0,53	0,75	1,5	2,3	2,8	3,7
Ech. carottés	--	--	--	2,74	--	--	0,51	0,72	--	--	3,5	4,66

Tableau.III.2. 10. Résultats des essais mécaniques sur des éprouvettes confectionnées au laboratoire et sur des échantillons carottés de la planche expérimentale

Ces valeurs sont alors reportées sur le diagramme de la classification afin d'évaluer la stabilité du matériau. À partir des résultats obtenus et estimé à 360 jours du Rt et E, nous avons estimé la classe mécanique de la formulation proposée en positionnant les données sur l'abaque de classification.

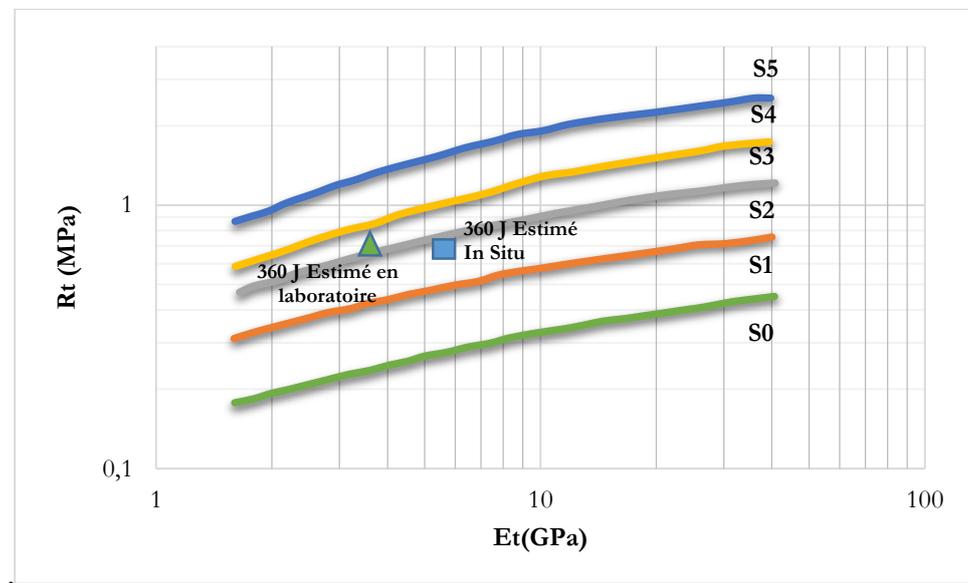


Figure.III. 2. 19 Classification du matériau routier traité avec le liant hydraulique ROLAC IP LH

D'après les résultats obtenus, nous distinguons une bonne performance mécanique classant le matériau élaboré réalisé in situ en S2. D'après les résultats estimés à 360 jours, la formulation étudiée présente des performances mécaniques acceptables pour une utilisation en couche de base.

3.14.3. Étude environnementale en laboratoire et In situ

L'évaluation de l'impact environnemental de la formulation étudiée et réalisé selon la norme NF EN 12-457-2. Les échantillons traités ont été analysés à 14, 28 et 60 jours. Les résultats obtenus sont comparés par la suite au guide méthodologique pour l'acceptabilité de matériaux alternatifs en technique routière.

Quantité relarguée cumulée à L/S = 10l/kg (Essai de lixiviation NF EN 12-457-2)						
Éléments	Laboratoire			In situ	Valeur à respecter par au moins 100% des éch (mg/kg de MS)	Seuils pour une utilisation en T.R (mg/kg de MS)
	Valeur en mg/kg MS (14j)	Valeur en mg/kg MS (28j)	Valeur en mg/kg MS (60j)	Valeur en mg/kg MS		
As	<0,035	<0,035	<0,035	< 0,028	1,5	2
Ba	0,92	1	1,47	0,18	60	100
Cd	<0,031	<0,031	<0,031	<0,0029	0,12	1
Cr	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	1,5	10
Cu	<0,026	<0,026	<0,026	0,035	6	50
Hg	NA ⁷	NA	NA	NA	0,03	0,2
Mo	0,18	0,22	0,43	0,067	1,5	10
Ni	<0,05	<0,05	<0,05	<0,005	1,2	10
Pb	<0,17	<0,17	<0,41	<0,19	1,5	10
Sb	0,06	0,05	0,11	<0,048	0,18	0,7
Se	<0,3	<0,3	<0,3	<0,057	0,3	0,5
Zn	0,30	0,40	0,55	0,33	12	50
Chlorure	111	169	179	186	2400	15000
Sulfate	47	49	51	67	3000	20000
Fraction soluble	136,51	157,88	162,53	NA	12000	60000
pH	7,52	8,12	8,28	7,82	min 5,5/ max 13	--

Tableau.III.2. 11. Valeurs limites en lixiviation niveau I pour l'utilisation des sédiments en technique routière (guide Sétra, 2012)

D'après les résultats des essais de lixiviation réalisés sur le mélange traité à des différentes échéances, aucun dépassement n'a été remarqué avec un taux de relargage inférieur aux valeurs seuils du guide Setra, ce qui autorise l'acceptabilité de la valorisation des sédiments en technique routière.

⁷ NA : Non Analysé

3.15. Conclusion

Dans la démarche de prospection de valorisation des sédiments fluviaux en technique routière, nous avons pu réaliser différentes formulations à base des sédiments fluviaux de la Deûle et du Hem pour après, retenir la formulation présentant les meilleures propriétés géotechniques avec 20% de sédiment du Hem, 20% du sédiment de la Deûle et 60% de sable boulonnais.

L'étude mécanique de cette formulation a montré de bonnes performances de point de vue résistance à la compression et à la traction, également au niveau du module d'élasticité. Selon le guide de classification, la formulation est classée en classe S2, ce qui permet une valorisation en sous-couches routières, plus précisément en couche de base.

L'étude réalisée sur la planche expérimentale confirme également les résultats obtenus sur les échantillons réalisés au laboratoire. Les résultats obtenus en laboratoire sur le plan mécanique autorisent la valorisation du mélange des sédiments fluviaux en technique routière.

Notons que des mesures de la quantité de matière ont eu lieu sur le mélange du laboratoire et celui réalisé in situ, la teneur en M.O pour le matériau formulé au laboratoire était de 5,77% pour le mélange brut (Sable, SD et SH) contre seulement 2,41% seulement pour le mélange traité à la chaux et au liant hydraulique ce qui répond parfaitement aux exigences décrites dans le guide technique routier. Le matériau formulé in situ présente 3,19% de matière organique.

Sur le plan environnemental, les résultats des essais de lixiviation réalisés sur les échantillons sont inférieurs aux seuils définis par le guide Sétra ce qui valide la valorisation des sédiments en technique routière sans avoir un effet néfaste sur l'environnement. Le choix de la formulation sera validé à travers un modèle mathématique d'optimisation des mélanges.

Filière 3

**PROSPECTION DE LA VALORISATION
DES SEDIMENTS DANS DES
APPLICATIONS A MATRICES
CIMENTAIRES**

Filière 3

PROSPECTION DE LA VALORISATION DES SEDIMENTS DANS DES APPLICATIONS A MATRICES CIMENTAIRES

3.16. Introduction

Trois filières de valorisation ont été identifiées et choisies pour répondre à des problématiques régionales de valorisation rentrant dans le cadre des projets menés par Lille Métropole communauté Urbaine. Ces applications sont : la valorisation en bloc béton, en coulis auto-compactant et dans les bétons réservoirs de chaussée (BRC). L'étude qui sera présentée dans la suite est une étude prospective de faisabilité de ces valorisations principalement mécanique dans des formulations où nous avons incorporé différentes proportions du sédiment fluvial de la Deûle qui a été choisi pour cette filière en raison de sa faible teneur en matière organique. Le suivi environnemental a été réalisé uniquement pour les coulis en raison de leur faible résistance (fort potentiel de fissuration) et friabilité.

3.17. Valorisation en blocs béton

La première voie que nous allons étudier dans cette filière est celle des blocs de béton. Les mélanges réalisés sont constitués du sable de carrière (0-4mm) et de gravier (4-14mm) provenant de la carrière Gaurain en Belgique. L'étude des formulations a été menée à l'aide du logiciel RENE LCPC, qui repose sur un modèle mathématique appelé le modèle d'empilement compressible. L'optimisation du squelette granulaire a été réalisée pour des mélanges binaires sable - gravier et sable - sédiments.

3.17.1. Caractérisation du sable et du gravier

Les deux granulats utilisés sont des granulats de carrière concassés. Les courbes granulométriques du sable et du gravier sont présentées dans la Figure.III. 3. 1. Leur masse volumique absolue a été mesurée au pycnomètre à hélium, elle est égale à 2.65g/cm³. Leur teneur en eau est inférieure à 10%.

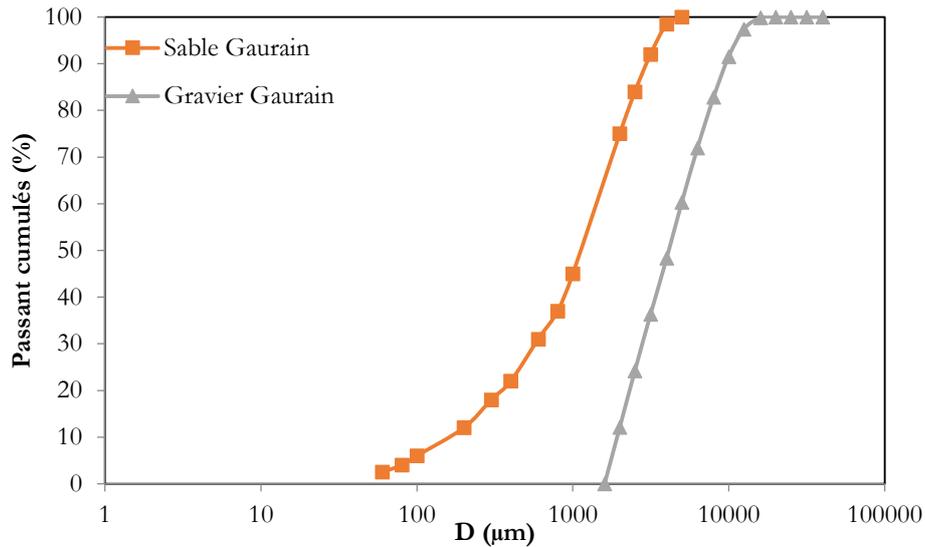


Figure.III. 3. 1 Courbe granulométrique du sable et du gravier utilisés dans l'étude

3.17.2. Optimisation du squelette granulaire d'un mélange binaire à base de sable et de gravier

La méthode d'empilement compressible est à la base une méthode utilisée pour la formulation des bétons. Cette méthode est basée sur une approche géométrique [79] ; [80] ; [81]. Ce modèle permet de prédire la compacité optimale d'un mélange de plusieurs classes granulaires à partir de la connaissance des paramètres suivants (Figure.III. 3. 2) :

- la compacité propre et la masse volumique de chaque classe granulaire ;
- la granularité de chaque constituant et de l'énergie de mise en place ;
- la proportion massique de chaque classe ;
- l'énergie de serrage (K) qui est définie pour chaque mode de mise en place.

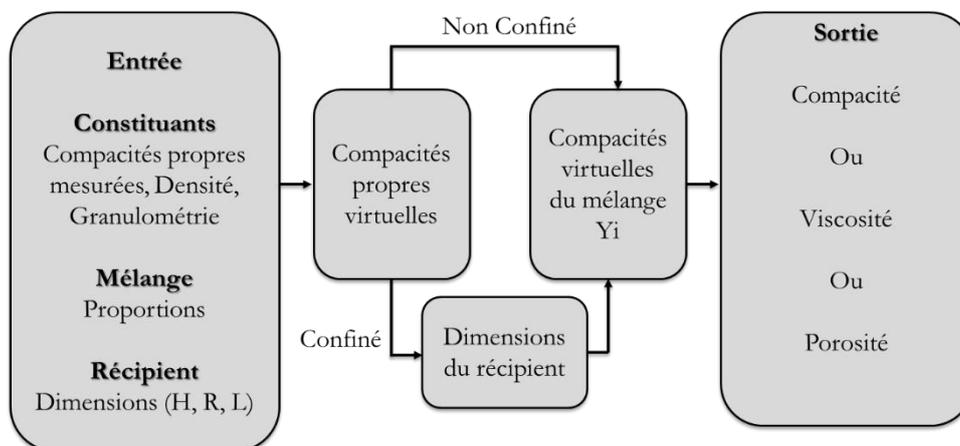


Figure.III. 3. 2 Méthodologie du Modèle d'Empilement Compressible [56] ; [82]

Une fois que la compacité optimale entre le sable et le gravier est définie, on procède à l'étude de l'influence de la substitution du sable par du sédiment et cela à travers le suivi de l'évolution de la résistance à la compression simple.

3.17.2.1. *Optimisation granulaire sable-gravier*

L'étude de l'optimisation granulaire a été réalisée à l'aide du logiciel RENE LCPC [83]. Les entrées du logiciel sont la masse volumique absolue, la compacité et la distribution granulométrique de chaque classe granulaire.

Les résultats de la calibration du modèle sont repris dans la Figure.III. 3. 3 et le Tableau.III.3. 1Tableau.III.3. 1. La compacité optimale calculée est de 84%, elle a été obtenue pour un mélange composé d'environ 40-50% de sable et de 60-50% de gravier. Le rapport G/S est compris entre 1 et 1,5. Pour les formulations testées, le rapport G/S a été fixé à 1.

Gravier	Sable (%)	Porosité (%)	Compacité (%)
100	0	35,70	64,30
90	10	30,81	69,19
80	20	25,30	74,70
70	30	19,69	80,31
60	40	16,42	83,58
50	50	16,73	83,39
40	60	17,53	82,47
30	70	18,94	81,06
20	80	20,43	79,57
10	90	21,94	78,06
0	100	23,44	76,56

Tableau.III.3. 1. Résultats de l'optimisation granulaire sable de fonderie et gravier

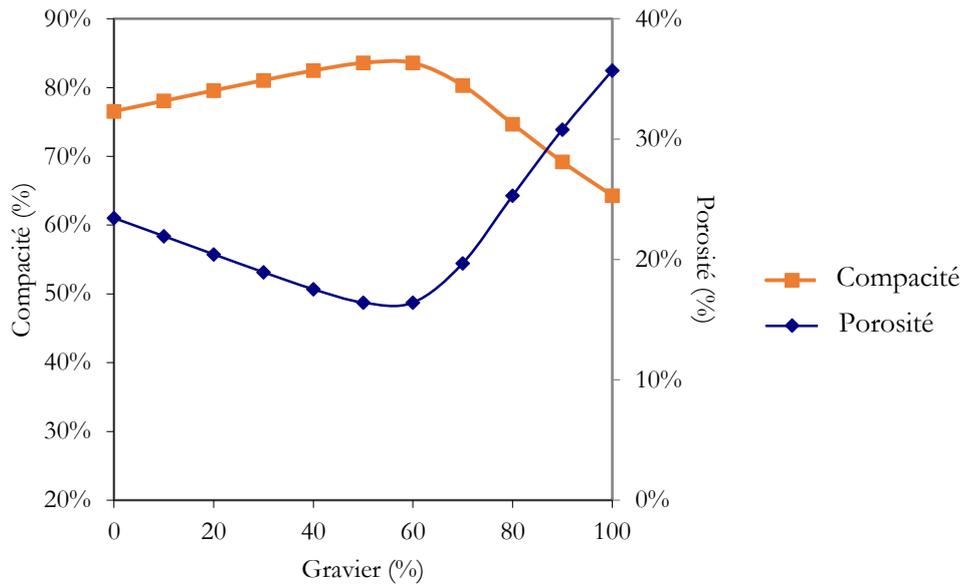


Figure.III. 3. 3 Résultats de l'optimisation granulométrique sable – gravier

3.17.2.2. Optimisation granulométrique sable - sédiments

La tolérance de la matière organique dans les matériaux cimentaires est très faible pour la majorité des applications Génie Civil. En raison de la teneur élevée de la M.O pour les sédiments du Hem et de la Croix, nous avons sélectionné le sédiment de la Deûle pour cette partie de valorisation car en plus d'avoir un faible taux de M.O, il est assimilable à un B5 selon le GTR.

Après avoir effectué l'optimisation granulométrique du sable avec le gravier, nous avons réalisé une deuxième optimisation entre le sable et le sédiment de la Deûle afin d'obtenir la meilleure compacité possible. Les résultats de l'optimisation sont reportés dans la Figure.III. 3. 4 et le Tableau.III.3. 2. Ces résultats montrent que la compacité du mélange sable - sédiment ne fait que chuter au fur et à mesure que la proportion de sédiment augmente. Cela est important car l'incorporation des sédiments comme substitution d'une partie du sable va influencer sur la compacité du mélange final (Sédiment-sable-gravier).

Sédiment (%)	Sable (%)	Porosité (%)	Compacité (%)
0	100	23,44	65,04
10	90	25,74	67,26
20	80	29,00	69,00
30	70	30,14	69,86
40	60	30,43	69,57
50	50	31,64	68,36
60	40	33,34	66,66
70	30	35,23	64,77
80	20	37,14	62,86
90	10	39,01	60,99
100	0	40,82	59,18

Tableau.III.3. 2. Résultats de l'optimisation granulaire sédiments et le sable

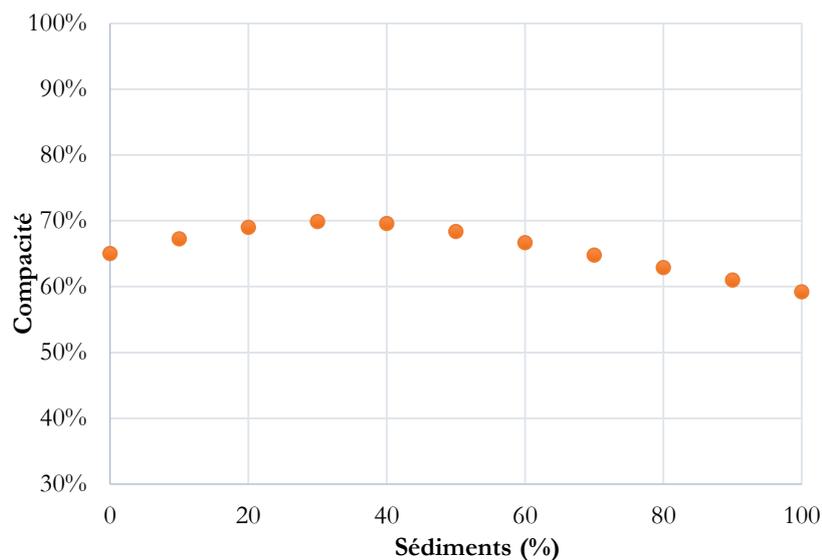


Figure.III. 3. 4 Résultats de l'optimisation granulaire sable – sédiments

3.17.3. Formulations testées :

Les formulations ont été étudiées et réalisées suite à l'étude de l'optimisation du squelette granulaire. Les formulations adoptées sont reprises dans le Tableau.III.3. 3. Vu la demande en eau très importante du sédiment de la Deûle traduite par une limite de liquidité très élevée, le rapport E/C a été fixé à 0,50 ; 0,55 et 0,6.

Deux types de ciment ont été utilisés, le premier est un ciment standard type CEM I 52.5 N conformément à la norme (NF EN 196-1), le deuxième est un ciment de type CEMIII 52,5

PM ES, utilisé pour les travaux en milieu agressif tel que les travaux maritimes. Le taux de ciment a été fixé à 14% en masse qui correspond à 350kg de ciment par mètre cube de béton.

Afin d'évaluer l'influence de sédiments sur les propriétés des bétons, 4 formulations de ont été confectionnées et testées : Un mélange de référence F1 avec 0% de sédiments et 3 autres mélanges nommés respectivement F2, F3 et F4 dans lesquels, nous avons incorporés 5%, 7,5%, 10% et 12,5% de sédiments avec 14% de ciment. Les rapports E/C ont été fixés à 0,5 ; 0,55 et 0,6. (Tableau.III.3. 3).

Composition	F1 (témoin)	F2	F3	F4
Sédiment (kg/m ³)	0	250	375	500
Sable 0/4mm (kg/m ³)	875	625	500	375
Gravier 4/14mm (kg/m ³)	1250	1250	1250	1250
Ciment CEM I 52,5 N (kg/m ³)	375	375	375	375
Eau (kg/m ³)	187,5	406,25	487,5	568,75

Tableau.III.3. 3. Dosage des formulations étudiées.

De même, des blocs en béton ont été confectionnés afin de réaliser des essais physico-chimiques, mécaniques et environnementaux.



Figure.III. 3. 5 Les blocs de béton après démoulage

Les résistances visées sont de l'ordre de 15 à 25 MPa (avec un sédiment brut sans traitement préalable). Les résultats des essais de compression sur les différentes formulations étudiées sont reportés dans le Tableau.III.3. 4 :

Résistances		BF1 (témoin)	BF2	BF3	BF4
CEM I 52,5N	Compression simple 7 j (MPa)	17	11	5	2
	Compression simple 28 j (MPa)	40	22	13	7
CEM I 52,5PM	Compression simple 7 j (MPa)	21	15	8	7
	Compression simple 28 j (MPa)	44	29	21	15

Tableau.III.3. 4. Résultats de l'essai de compression des différentes formulations étudiées

Les résultats obtenus montrent que la substitution du sable par du sédiment fait chuter les résistances. Cela pourra être expliqué, d'une part, par la présence d'éléments perturbateurs (Contaminants : sulfates, chlorures, PCB, HAP) qui interagissent avec les liants hydrauliques et perturbent la prise, et d'autre part par le fait que l'incorporation de sédiments fait chuter la compacité du mélange.

Par ailleurs, l'utilisation d'un liant prise mer (CEM I 52.5 PM ES) permet d'avoir les meilleurs résistances. Le seuil de 15 MPa est atteint pour l'ensemble des formulations contenant le ciment CEM I 52.5 PM ES.

3.18. Valorisation des sédiments fluviaux en béton réservoirs de chaussée (BRC)

Les effets nuisibles des pluies résultent de l'imperméabilisation croissante des sols, à cause du développement rapide de l'urbanisation. Les réseaux de canalisations deviennent alors sous-dimensionnés dans le cas des fortes précipitations et ils s'engorgent très rapidement gênant par conséquent l'écoulement des eaux pluviales. Un béton réservoir chaussée BRC a été conçu pour répondre à ces problématiques [65].

Les BRC sont des structures constituées d'un ensemble de cylindres creux en béton préfabriqué à base de matériaux naturels (sable, gravier). Leurs caractéristiques principales c'est qu'ils sont recyclables et de faible consommation d'énergie [65]. Leurs cylindres sont de 8 cm de long, 8 cm de section et 2 cm d'épaisseur. Le but principal de cette forme cylindrique est de retenir les eaux pluviales et d'offrir une forte capacité de stockage autorisant un faible décaissement, avec des déblais en volume limité. Le BRC s'inscrit dans le cadre réglementaire relatif à la gestion des eaux pluviales (Directive européenne, Loi française sur l'eau, Titre II du fascicule 70 du CCTG) s'appliquant à l'exécution des ouvrages de recueil, de stockage et de restitution des eaux pluviales.



Figure.III. 3. 6 Structure chassée réservoir en béton

Dans ce qui suit, nous allons évaluer les possibilités de valorisation du sédiment de la Deûle dans cette application. Nous proposons l'étude d'un mélange composé de sédiment SD, de sable, gravier, de ciment CEM I 52.5 et d'adjuvant.

3.18.1. Démarche expérimentale de valorisation

Le BRC est formulé à partir de 5 composants : sable fin, gravier, liant hydraulique, de l'eau et éventuellement un adjuvant. Dans le cadre du développement durable et de la démarche LMCU, nous avons étudié la faisabilité de remplacer une proportion de sable par le sédiment de la Deûle. Le comportement mécanique des mélanges élaborés sera suivi en vue de l'utilisation envisagée. Rappelons que le principal objectif de ce travail en laboratoire est de prévoir le comportement mécanique des formulations proposées à base de sédiments.

L'étude de faisabilité et de validation de la formulation pour un BRC, a été planifiée en deux phases : La première phase est une étude en laboratoire dont l'objectif est d'identifier le comportement des mélanges et d'évaluer leurs performances mécaniques afin d'apprécier la possibilité d'une éventuelle valorisation. La deuxième phase consiste à valider et utiliser le mélange sur le terrain en réalisant des éprouvettes de BRC à l'échelle industrielle et à estimer leur durabilité ainsi que leur aspect environnemental. Dans le cadre de notre démarche, la première phase d'étude a fait l'objet de ce chapitre. Concernant la deuxième phase, la mise en place de la formulation à l'échelle industrielle en collaboration avec une entreprise locale est en cours de finalisation.

3.18.1.1. Protocole des essais

Comme mentionné auparavant, l'objectif de cette étude de formulation de BRC consiste à examiner la possibilité de remplacer une fraction de sable utilisé dans les cylindres BRC par des

proportions du sédiment SD tout en respectant les exigences mécaniques du béton BRC produit par une entreprise partenaire.

La présente étude de formulation consiste à trouver le mélange optimal qui réponde aux exigences mécaniques fixés dans le cahier de charge des BRC définies par l'entreprise partenaire. L'exigence consiste à obtenir une résistance de l'ordre de 50 MPa à 28 jours. Dans notre cas d'étude nous avons adopté la formulation de base définie par l'entreprise pour la fabrication des BRC témoins. Lors de la valorisation des sédiments, une substitution de 15% de sédiment par rapport au sable a été effectuée tout en gardant les mêmes proportions de gravier, eau, ciment et adjuvant (Figure.III. 3. 7).



Figure.III. 3. 7 Granulats utilisés pour la confection des éprouvettes BRC

3.18.1.2. Réalisation des éprouvettes et de l'essai de compression

Six types de BRC ont été formulés à partir des mêmes constituants (hormis le sédiment qui a été modifié afin d'identifier l'effet de l'ajout sur la matrice cimentaire), avec un squelette granulaire quasi-identique et un rapport Eau/Ciment de 0,35. Un BRC témoin a également été confectionné (Tableau.III.3. 5). Les éprouvettes sont confectionnées suivant la technique de vibro-compression (Figure.III. 3. 8). Les éprouvettes utilisées sont cylindriques de dimensions (11x 22) cm. La technique que nous avons adoptée dans cette étude est proche des méthodes de confection utilisées dans l'entreprise partenaire lors de la confection des BRC.

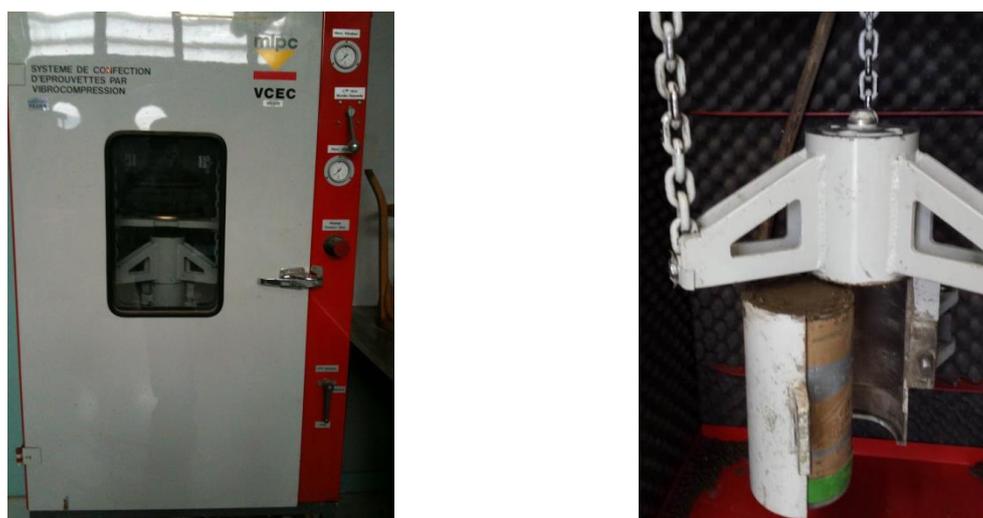


Figure.III. 3. 8 Confection des éprouvettes Hydrocyl en vibro-compression

L'objectif de cette phase est de caractériser le comportement mécanique des bétons Hydrocyl en fonction du taux de substitution du sable par le sédiment SD.

Pour cela, sept éprouvettes de bétons Hydrocyl ont été formulées : une éprouvette d'Hydrocyl de référence (Témoin) et six éprouvettes bétons Hydrocyl dans lesquelles le sable a été substitué par 10, 15, 20, 30, 40 et 50 % du sédiment SD, nommés respectivement B10, B15, B20, B30, B40 et B50. Les matériaux utilisés sont : deux types de gravillon 2/5 et 4/6, sable, adjuvants, sédiment et ciment Holcim CEM I 52.5 N (les ciments de ce type sont constitués de 95% à 100% de clinker et de 0 à 5% de constitutions secondaires). Les BRC de chaque formulation ont été malaxés dans un malaxeur de 50 litres. La gâchée de chaque formulation a été coulée dans des moules en plastiques de dimensions (11 x 22) puis vibrée et compactée à l'aide de l'appareil vibro-compression.

Formulation	BT	B10	B15	B20	B30	B40	B50
Sable 0/1	100%	90%	85%	80%	70%	60%	50
Sédiment	0	10%	15%	20%	30%	40%	50
Gravillon 4/6							
Gravillon 2/5							
CEM I 52,5 N							
Adjuvant							

Tableau.III.3. 5. Composition des six formulations béton Hydrocyl à base de sédiment la Deûle

Après l'étape de formulation et coulage, les éprouvettes ont été démoulées après 24 heures (Figure.III. 3. 9). Les échantillons de chaque formulation ont été conservés dans l'eau à une température de 20°C.



Figure.III. 3. 9 Epreuves à base de sédiments fluviaux

Après 28 jours de cure, nous avons mesuré la résistance à la compression et la masse volumique des épreuves testées.

3.18.1.3. Variation de la masse volumique

La masse volumique du béton dépend essentiellement des masses volumiques des éléments le composant. La Figure.III. 3. 10 montre l'évolution de la masse volumique des BRC après 28 jours de cure en fonction de leur taux de substitution. D'après les résultats obtenus, on note une nette décroissance de la masse volumique avec l'augmentation du taux de substitution des sédiments. Le BRC témoin présente une masse volumique de l'ordre de $2,45 \text{ t/m}^3$, et le BRC B10, B15, B20, B30, B40 et B50 présentent des masses volumiques respectivement de $2,35$; $2,33$; $2,32$; $2,3$; $2,28$ et $2,25 \text{ t/m}^3$. La chute de la masse volumique des BRC confectionnés à partir de sédiments est lié systématiquement à l'introduction des sédiments qui eux présentent une masse volumique inférieur à celle du sable.

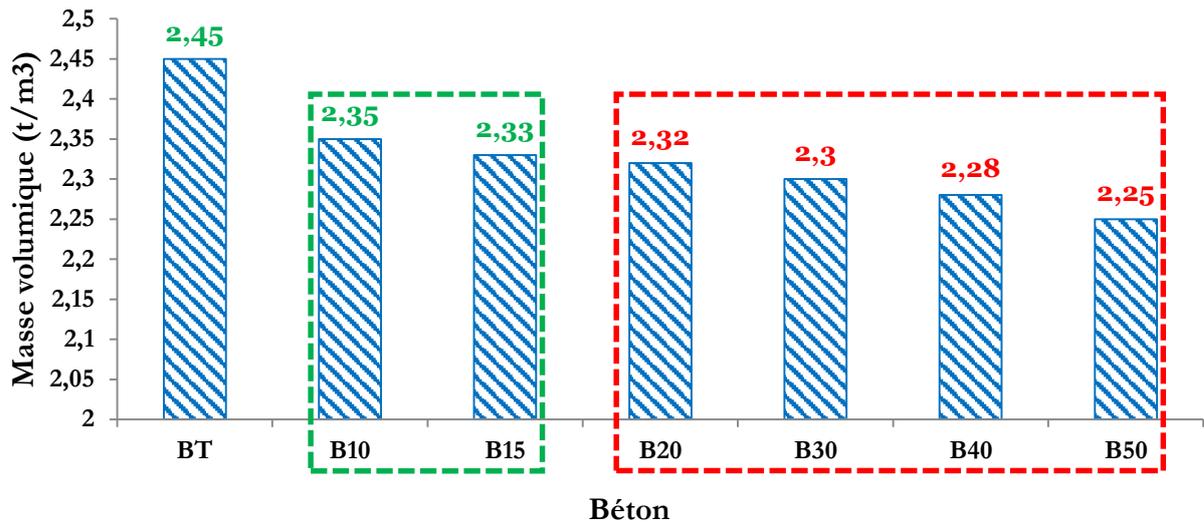


Figure.III. 3. 10 Evolution de la masse volumique en fonction du taux de substitution

On retiendra de cette étude l'importante variation de la masse volumique entre les sept formulations étudiées. En effet le taux de substitution permet d'avoir une bonne maîtrise pour déterminer la masse volumique, ce qui peut être un paramètre décisif pour la valorisation.

3.18.1.4. Résistance à la compression

Afin de déterminer le comportement mécanique des bétons réservoirs de chaussée à base de sédiment fluviaux, seule la détermination de la résistance à la compression est recommandée dans le cahier de charge de l'entreprise partenaire.



Figure.III. 3. 11 Essai de compression sur un BRC

Pour évaluer cette résistance, des essais de compression uni-axiale ont été effectués selon la norme EN 12390-3, afin de déterminer les résistances à la compression des différentes formulations et les comparer avec le BRC témoin. La Figure.III. 3. 12 illustre les résultats obtenus après 28 jours de conservation.

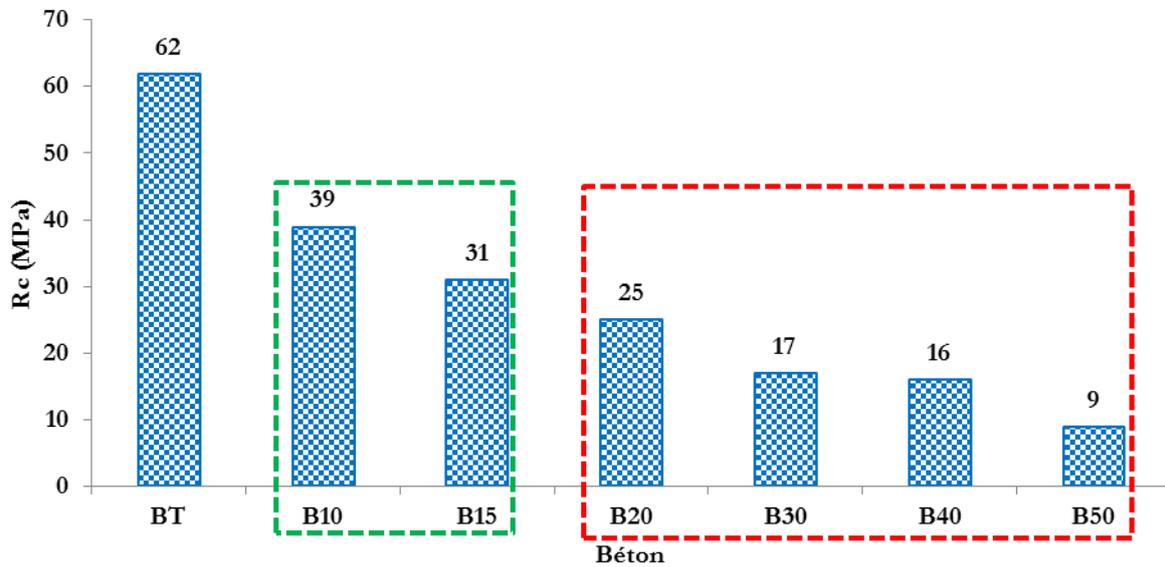


Figure.III. 3. 12 Evolution de la résistance à la compression en fonction du taux de substitution

D'après les résultats obtenus, on constate que le béton témoin présente une résistance de l'ordre 62 MPa, le résultat obtenu respecte bien les exigences mécaniques et comparable avec les produits obtenus en usine. Concernant les BRC valorisés contenant le sédiment SD, on constate que celui à base de 10 % de sédiments présente une résistance de 39MPa, cette performance mécanique est proche des exigences fixées par le cahier de charges en prenant en compte le mode de sollicitations mis en place en laboratoire. En effet, à partir de 20% de substitution de sédiments par rapport au sable, une nette chute de résistance à la compression a été constatée. L'ajout d'une proportion de sédiment supérieure à 15% a fortement contribué à cette chute de résistance atteignant 9 MPa pour B50.

L'étude de faisabilité de valorisation des sédiments fluviaux dans des bétons réservoirs chaussée a été validée en laboratoire. La substitution d'un pourcentage de 10% et 15% de sédiment par rapport au sable dans les BRC a montré de bonnes performances mécaniques.

3.19. Étude d'un coulis de remplissage de tranché à base de sédiments de dragage et de cendres volantes

3.19.1. Introduction

Cette partie a été consacrée à l'étude de formulations de coulis à base de sédiments, de cendres volantes et de liants hydrauliques. Le but de cette étude est de montrer l'impact de l'ajout des sédiments dans la composition des coulis d'une part, et d'autre part de voir l'influence du type et du pourcentage de liants sur le comportement des coulis à l'état frais et sur les résistances mécaniques.

3.19.2. Matériaux

Les caractéristiques physicochimiques, géotechniques et minéralogiques des matériaux utilisés sont présentées ci-après

- **Sédiments** : le sédiment utilisé dans cette partie de l'étude a été prélevé lors d'une deuxième campagne de dragage de la Deûle. La caractérisation physico-chimique et mécanique a révélé une similarité avec les sédiments dragués lors de la première campagne d'échantillonnage de la Deûle.
- **Cendres volantes** : les cendres volantes utilisés sont de type silico-alumineuse, qui proviennent du site de Harnes de Eurovia. Elle est composée principalement de silice (SiO_2) et d'alumine (Al_2O_3). Les autres éléments également présents dans une moindre proportion sont les oxydes de fer (Fe_2O_3 et FeO_4) et la chaux.
- **Liants hydrauliques** : dans cette étude deux types de liants hydrauliques ont été utilisés : un ciment CEM I 52.5 N et un liant hydraulique routier type Rolac PI. Les caractéristiques de ces liants hydrauliques sont reprises dans le Tableau.III.3. 6.

Composés chimiques	Valeur (%)	
	CEM I 52.5 N	Rolac PI LH
SiO ₂	20,46	20,79
Al ₂ O ₃	6,01	5,40
Fe ₂ O ₃	3,57	2,22
CaO	65,32	65,90
MgO	-	1,10
K ₂ O	0,81	0,30
SO ₃	1,02	3,40
Na ₂ O	0,17	0,18
S ⁻²	-	0,00
Cl ⁻	-	0,03

Tableau.III.3. 6. Caractéristiques des liants hydrauliques utilisés dans l'étude

- **Fibres** : La fibre de polypropylène est l'adjuvant idéal dans les mélanges à matrice cimentaire pour diminuer le retrait plastique, les fissurations et augmenter les propriétés de la surface. Les fibres utilisées sont de taille moyenne de 12mm. Leurs caractéristiques sont résumées dans le Tableau.III.3. 7 :

Caractéristiques	Valeurs
Module élastique	3500 – 3900 N/mm ²
Extensibilité	320 – 400 N/mm ²
Point de fusion	160 – 170 °C
Conductivité électrique	0

Tableau.III.3. 7. Caractéristiques des fibres de polypropylène

3.19.3. Étude mécanique des formulations réalisées

Les formulations adoptées ont été optimisées afin de répondre aux critères de résistance et de maniabilité requises pour une application des coulis comme matériaux de remblai des tranchées. Les critères essentiels à satisfaire sont les suivants :

- Un Indice Portant Immédiat (IPI) à 48h égal au moins à 10%, afin de respecter le délai de remise en circulation ;

- Une résistance à la compression simple (R_c) à 28j comprise entre 0,5 et 1MPa, cette résistance est suffisante pour s'assurer de l'excavabilité du matériau ;
- Un affaissement au cône d'Abrams égal au moins à 15cm, pour vérifier la comptabilité du coulis et le meilleur enrobage des canalisations une fois mis en place ;
- Une bonne résistance à la compression après immersion afin de s'assurer de la bonne tenue à l'eau du matériau.

À cet effet, cinq formulations ont été définies afin d'évaluer principalement l'influence du type de liant hydraulique et son pourcentage dans les formulations sur les critères déjà présentés. La formulation F1, qui ne contient pas de sédiment, constitue la formulation témoin, le pourcentage de ciment CEM I 52.5 N est de 4% par rapport à la masse totale solide. Les formulations F2 et F3 contiennent respectivement 6 et 8% de ciment CEM I 52.5 N, tandis que les formulations F4 et F5 contiennent respectivement 6 et 8% de Rolac PI.

Composition	F1	F2	F3	F4	F5
CEM I 52.5 (kg/m^3)	32,00	46,15	61,54	0	0
Rolac PI (kg/m^3)	0	0	0	46,15	61,54
Cendres volantes (kg/m^3)	768,00	569,23	553,85	569,23	553,85
Sédiments (kg/m^3)	0	153,85	153,85	153,85	153,85
Fibres (kg/m^3)	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Eau (kg/m^3)	124,28	204,05	204,05	204,05	204,05

Tableau.III.3. 8. Composition des différentes formulations de l'étude

3.19.3.1. *Masse volumique des coulis*

La masse volumique absolue et apparente représente un paramètre essentiel dans la caractérisation des matériaux à matrice cimentaire. Le tableau résume les mesures de la masse volumique des différents coulis formulés. Une baisse de la masse volumique des coulis contenant des sédiments a été constatée. Cela s'explique par le fait que la substitution d'une partie des cendres volantes par le sédiment, qui a une masse volumique inférieure à celle des cendres volantes.

	F1	F2	F3	F4	F5
Masse volumique absolue (Mg/m^3)	2.15	2.01	2.08	2.01	2.08
Masse volumique apparente (Mg/m^3)	1,63	1,53	1,56	1,53	1,55

Tableau.III.3. 9. Masse volumique absolue et apparente des différentes formulations

3.19.3.2. Indice de Portance IPI (NF EN 13286-47, 2012)

L'indice portant Californien ou l'indice de portance immédiate a été déterminé en exprimant la force exercée sur un piston pour un enfoncement fixé dans un matériau compacté dans un moule CBR, exprimé par rapport à une force normalisée. Les résultats obtenus sur les différentes formulations à 24h et 48h sont présentés dans le tableau. Il s'avère que les résultats des formulations incorporant des sédiments sont inférieurs à ceux de la formulation sans sédiments. L'ajout de sédiments agit défavorablement sur l'IPI. Ceci s'explique par la présence des contaminants dans les sédiments qui jouent un rôle de perturbateurs de prise [63]. Par ailleurs, les formulations contenant du Rolac PI (F4 et F5) développent des IPI plus élevés que celles contenant du CEM I 52.5 (F2 et F3).

Temps	F1 (témoin)	F2	F3	F4	F5
24h	20	4	7	9	11
48h	25	8	14	13	15

Tableau.III.3. 10. Résultats de la mesure de l'IPI à 24 et 48h

3.19.3.3. Affaissement au cône d'Abrams (NF EN 12350-2, 2012)

L'essai consiste à placer un échantillon de coulis dans un moule ayant la forme d'un tronc de cône. Lorsque le cône est retiré à la verticale, l'affaissement du béton permet de mesurer sa consistance (Figure.III. 3. 13).

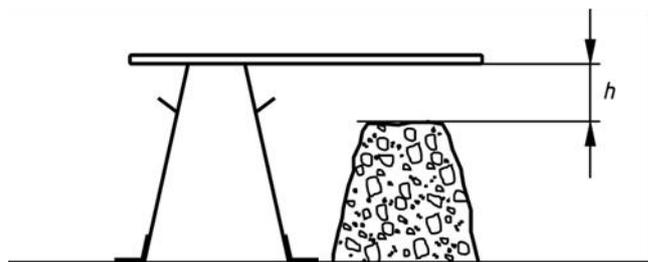


Figure.III. 3. 13 Essai d'affaissement sur coulis

Les résultats obtenus pour les différentes formulations sont repris dans le Tableau.III.3. 11. Les valeurs d'affaissement obtenues sont comprises entre 13 et 16mm. Les coulis réalisés sont qualifiés de fluides pour F1 et F5 et très plastiques pour les coulis F2, F3 et F4. On constate que l'introduction des sédiments dans les formulations engendre une légère baisse de la valeur de

l'affaissement. Cette baisse pourrait être expliquée par la présence de complexes argilo-humiques ou limoneux humiques, qui ont un potentiel de rétention d'eau très important [5] ; [63], qui se traduit par l'absorption d'une partie de l'eau de gâchage.

Données	F1	F2	F3	F4	F5
H (mm)	15,8	13,2	14,8	14,3	15,1
Consistance	Fluide	Très plastique	Très plastique	Très plastique	Fluide

Tableau.III.3. 11. Résultats des essais d'affaissement sur les formulations de coulis

3.19.3.4. Résistance à la compression simple

Les essais de compression simple ont été réalisés sur les éprouvettes décrites ci-avant. La presse utilisée pour les essais de compression est déjà présentée. Les essais ont été réalisés aux échéances (7, 28, 60 et 90 jours).

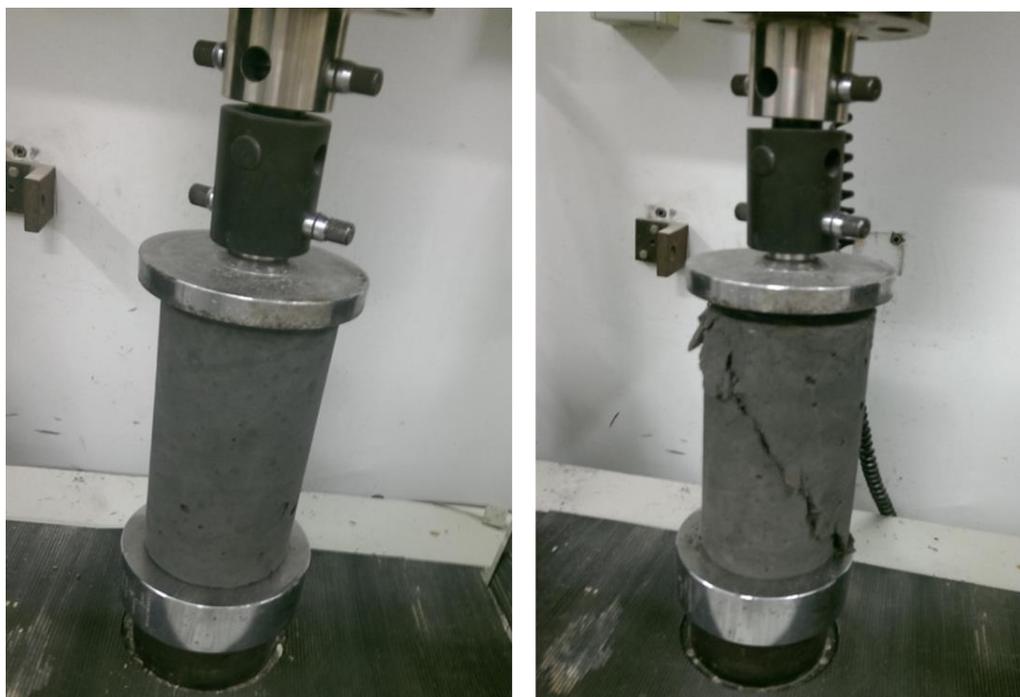


Figure.III. 3. 14 Essai de compression simple sur des éprouvettes de coulis (11x22) cm

Les valeurs de résistance à la compression simple R_c retenues est la moyenne des mesures effectuées sur trois éprouvettes issues de la même gâché. L'écart type des mesures varie entre 0,01 et 0,1 MPa. Les résultats obtenus pour les différentes formulations sont repris dans le Tableau.III.3. 12 et la Figure.III. 3. 15.

Rc (MPa)	F1	F2	F3	F4	F5
7	0,56	0,28	0,36	0,31	0,42
28	0,78	0,37	0,45	0,47	0,61
60	0,86	0,46	0,54	0,62	0,82

Tableau.III.3. 12. Résultats des résistances à la compression simple des différentes formulations de coulis testés

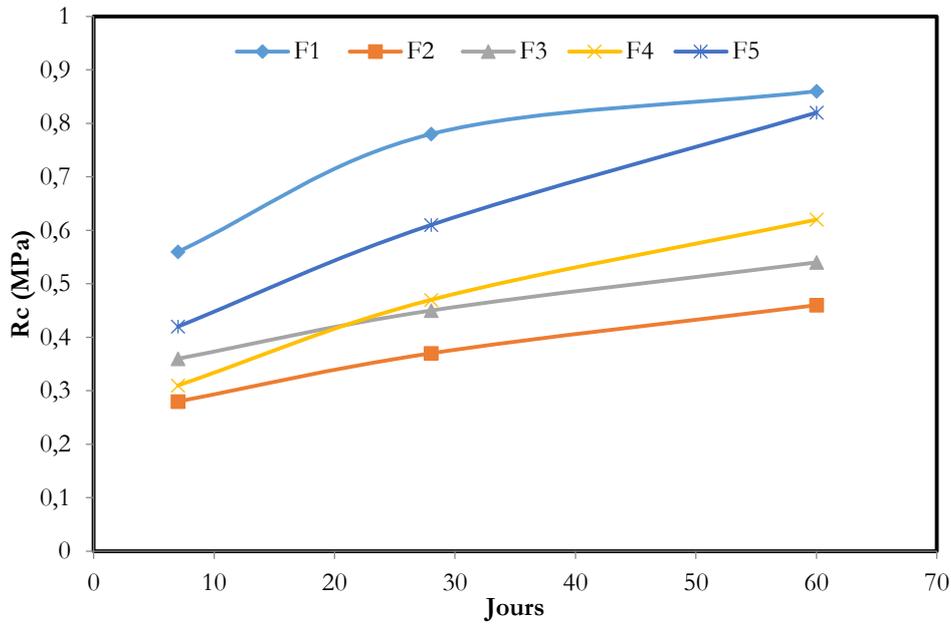


Figure.III. 3. 15 Évolution des résistances à la compression simple des différentes formulations de coulis testés

L'observation des résultats permet de voir que les coulis contenant du Rolac PI développent de meilleures résistances comparées aux coulis à base du ciment CEM I 52.5 N. Cela pourrait s'expliquer par la différence dans la composition des deux liants hydrauliques. En effet, le Rolac PI contient plus de 60% de chaux ce qui agit sur la matière organique

3.19.3.5. Résistance à l'immersion dans l'eau

La résistance à l'immersion a été étudiée en suivant un protocole d'essai spécifique. En effet, des éprouvettes 11x22cm ont été confectionnées et conservées dans l'eau à une température de 20°C. Après 60 jours de conservation, les éprouvettes ont été testées pour mesurer leurs résistances à la compression. La résistance à la compression immergée est exprimée avec un coefficient θ , qui est donné par la formule :

$$\theta = \frac{R_{c60imm}}{R_{c60}} \quad \text{Eq. II. 15}$$

Cet essai a été réalisé seulement pour la formulation témoin F1 et les formulations F3 et F5, car les formulations F2 et F4 n'ont pas résisté aux conditions de conservation dans l'eau. Les

résultats sont présentés dans le Tableau.III.3. 13. Il s'avère que les échantillons (F3 et F5) contenant les sédiments présentent une meilleure résistance à l'immersion par rapport aux échantillons sans sédiments.

	F1	F3	F5
Rc à 60 jours cure normale (MPa)	0,86	0,54	0,82
Rc à 60 jours cure dans l'eau (MPa)	0,67	0,52	0,73
θ (%)	77,9	97,5	89,4

Tableau.III.3. 13. Résultats des essais de la résistance à l'immersion des coulis

3.19.4. Étude environnementale sur des blocs de coulis

L'analyse environnementale présente une étape déterminante pour la validation d'une des formulations testées. Dans ce contexte, l'étude environnementale a été réalisée sur des blocs de coulis confectionnés au laboratoire. Ces derniers sont de dimensions : ($L \times l \times h = 40 \times 40 \times 25$). Ils ont été placés dans un dispositif spécifique qui permet de les arroser en continu et de récupérer l'eau qui ruisselle (Figure.III. 3. 16). Ces eaux ont été analysées à différentes échéances, les résultats obtenus à 7, 28 et 60 jours sont reportés dans le Tableau.III.3. 14.

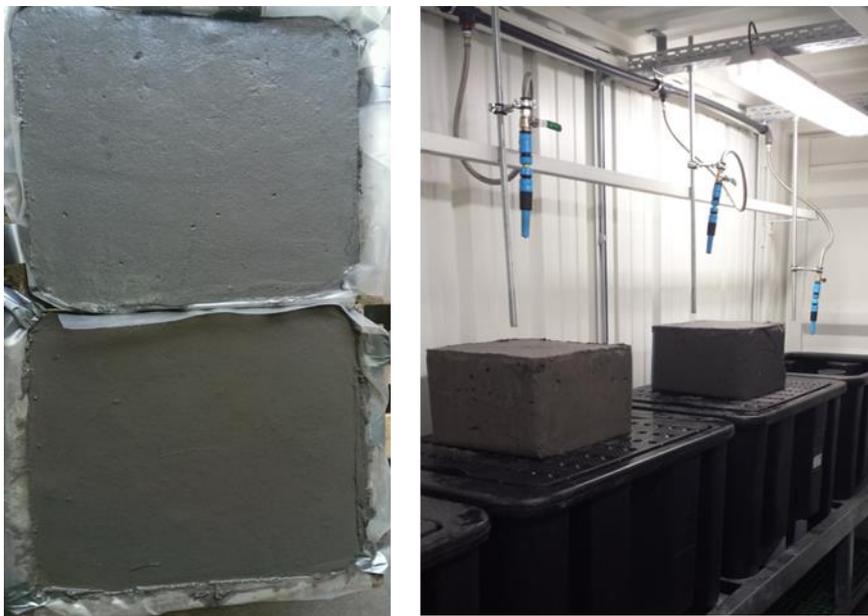


Figure.III. 3. 16 Mise en place des dispositifs d'essai de lixiviation des blocs de coulis

		Avec sédiment			Sans sédiment			Seuil	
Analyse	Unité	7j	28j	60j	7j	28j	60j		
HAP totaux	$\mu\text{g/l}$	<1	<1	<1	<1	<1	<1	-	$\mu\text{g/l}$
PCB totaux	$\mu\text{g/l}$	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	-	$\mu\text{g/l}$
COT	mg/l	3,2	2,8	3,4	3,0	3,0	3,5	-	$\mu\text{g/l}$
Métaux lourds									
Arsenic	$\mu\text{g/l}$	<5	<5	<5	<5	<5	<5	10	$\mu\text{g/l}$
Cadmium	$\mu\text{g/l}$	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	5	$\mu\text{g/l}$
Chrome	$\mu\text{g/l}$	5,9	3,7	2,9	<1	<1	<1	50	$\mu\text{g/l}$
Cuivre	$\mu\text{g/l}$	8,6	<2,0	7,1	5,9	4,6	4,9	50	$\mu\text{g/l}$
Mercure	$\mu\text{g/l}$	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	2000	$\mu\text{g/l}$
Plomb	$\mu\text{g/l}$	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	50	$\mu\text{g/l}$
Nickel	$\mu\text{g/l}$	<3	<3	<3	<3	<3	<3	20	$\mu\text{g/l}$
Zinc	$\mu\text{g/l}$	29	21	10	17	13	11	5000	$\mu\text{g/l}$

Tableau.III.3. 14. Résultats des analyses environnementaux

Les résultats des analyses environnementales de l'eau de rinçage des blocs de coulis révèlent que les concentrations des éléments analysés restent très faibles et évoluent peu ou quasiment pas avec le temps. Aussi, il s'avère qu'il n'y a pas de différences majeures dans les concentrations des éléments détectés. En effet, l'utilisation des liants hydrauliques permet de piéger les contaminants dans les produits d'hydratation formés (principalement CSH), ce qui permet d'avoir une stabilité à court et moyen terme [64] ; [66].

3.20. Conclusion :

Dans notre démarche prospective de valorisation, nous nous sommes intéressés à la valorisation des sédiments fluviaux en tant que matériau granulaire dans une matrice cimentaire. En fonction des propriétés physiques, minéralogiques et mécaniques de notre sédiment SD, les proportions des mélanges ont été fixées afin de formuler des blocs de béton, des coulis auto-compactants et des bétons réservoirs de chaussée. Les matériaux formulés pour ces applications doivent respecter les exigences et les contraintes réglementaires liées aux valorisations envisagées.

Concernant les blocs de béton, en fonction du type du liant utilisé, un certain taux de substitution du sable par le sédiment ne peut pas être dépassé. Un ciment prise mer (CEM I PM ES) permet d'incorporer une fraction plus importante de sédiments dans la formulation.

De même pour les coulis auto-compactants, deux types de liants ont été utilisés (CEM I 52,5 N et ROLAC PI). Dans les formulations retenues, le taux d'incorporation de sédiment a été fixé à 20%. Le ROLAC à base de laitier donne les meilleures performances. Sur le plan environnemental, les lixiviats récupérés après arrosage des blocs révèlent que les résultats d'analyse des éléments chimiques restent faibles et largement inférieurs aux seuils recommandés.

La prospection de valorisation du sédiment SD en bétons réservoirs de chaussée a montré que la substitution de 10 à 15% de sédiment par rapport au sable donne des résultats acceptables d'un point de vue de résistance à la compression avec des résistances comprises entre 31 MPa et 39 MPa. En dépassant ces substitutions, une baisse remarquable de la masse volumique et de résistance a été observée.

Chapitre 4

OPTIMISATION DE LA VALORISATION DES SEDIMENTS TECHNIQUE ROUTIERE

4.1. Introduction

La modélisation mathématique de la gestion de la valorisation proposée dans les domaines du génie civil couvre différents types de déchets et d'applications. Chaque déchet comporte des caractéristiques techniques, environnementales et chaque application nécessite des contraintes techniques et environnementales pour pouvoir être traitée par le modèle.

Dans ce chapitre, nous allons présenter une démarche et une modélisation mise en place pour l'optimisation du processus de valorisation des sédiments pour des applications en génie civil. Cette optimisation, développée au sein du laboratoire génie civil et environnementale [4], via une modélisation mathématique des contraintes environnementales, mécaniques et économiques a pour but de traiter opérationnellement un ensemble de données afin de trouver des scénarios optimaux pour les valorisations envisagées. Ces scénarios ne présentent pas forcément les solutions applicables mais plutôt un premier plan d'optimisation des mélanges et des formulations pour le processus de valorisation.

Dans le cadre de ces travaux de thèse, les résultats expérimentaux liés principalement à l'application routière ont été implémentés dans l'outil en vue de sa validation. Le modèle mathématique proposé vise généralement la valorisation des sédiments dans des applications en génie civil. Cette modélisation présente une interaction entre les sédiments et les applications basées sur les critères techniques, environnementaux et économiques, Dans la suite du chapitre, nous étudierons le cas de la valorisation des sédiments en technique routière.

Le but de ce chapitre est d'automatiser les résultats expérimentaux obtenus et validés pour la valorisation des sédiments. Ces résultats scientifiques seront alors modélisés mathématiquement et intégrés dans le logiciel informatique élaboré.

Dans l'organigramme ci-dessous, est représentée la démarche scientifique globale utilisée pour la valorisation des sédiments de dragage dans des applications routières. La valorisation des sédiments de dragage passe par 6 étapes principales :

1. Zonage : localisation du gisement potentiel à draguer ;
2. Dragage : qui peut être mécanique ou hydraulique ;
3. Stockage : fonction de la nature environnementale du sédiment ;
4. Traitement / formulation ;
5. Validation laboratoire ;
6. Validation in-situ.

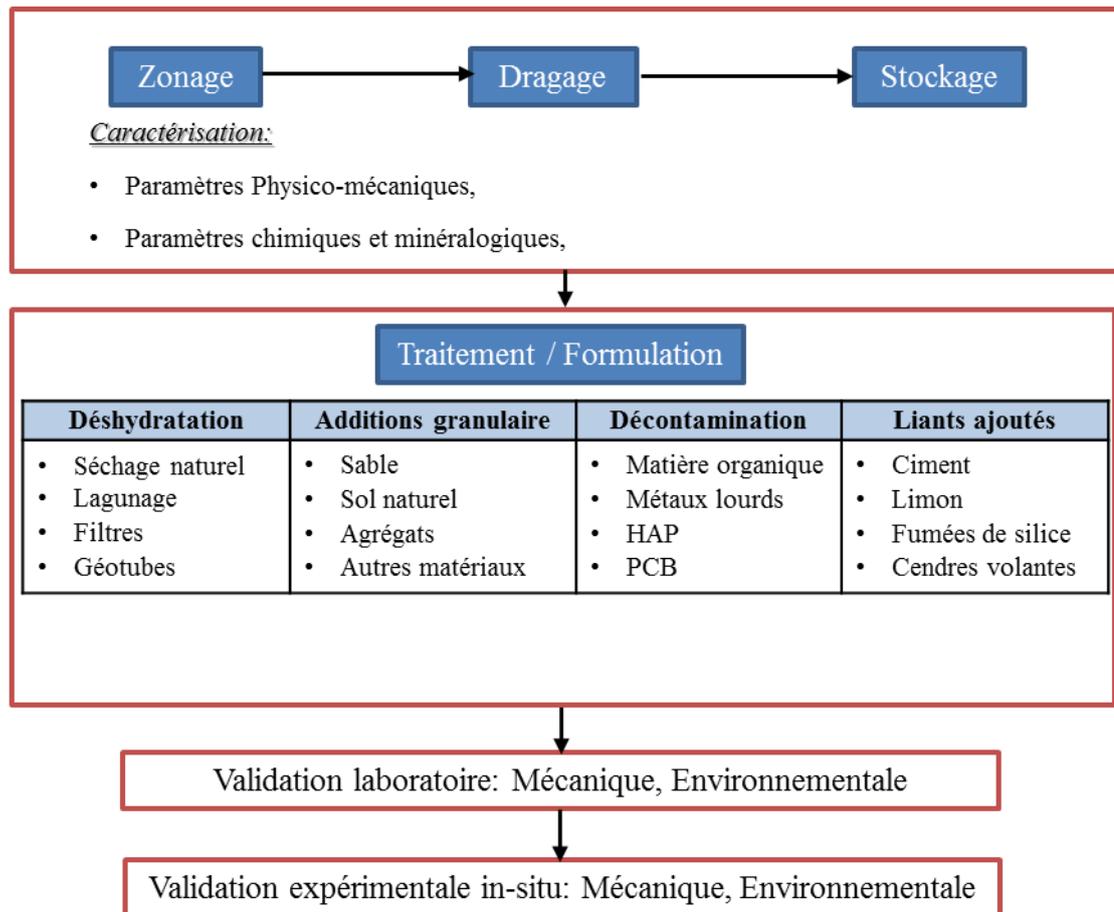


Figure.IV.1 Processus de valorisation

Une des étapes clés dans le processus de valorisation est l'étape de traitement et de formulation d'un matériau valorisable à base de sédiments. Elle nécessite un travail de réflexion et d'optimisation des différents traitements nécessaires pour l'amélioration du comportement du sédiment tout en respectant les critères et les exigences mécaniques, environnementales et économiques de faisabilité.

Plusieurs techniques de traitement existent telles que la réduction du degré de pollution par les méthodes électrocinétiques, de la matière organique par calcination et de la teneur en eau par filtre presse ou décantation naturelle. Les méthodes de formulation consistent principalement à augmenter la résistance mécanique et de portance du matériau en vue d'une valorisation. Ces formulations se font principalement par des corrections et ajouts granulaires [71] et/ou par des ajouts de liants hydrauliques [72]; [73]. Le choix et l'optimisation de ces méthodes de traitement se basent également sur des critères économiques, mécaniques et environnementaux.

4.2. Outil de gestion

L'architecture globale de l'outil est illustrée sur la Figure.IV. 2 :

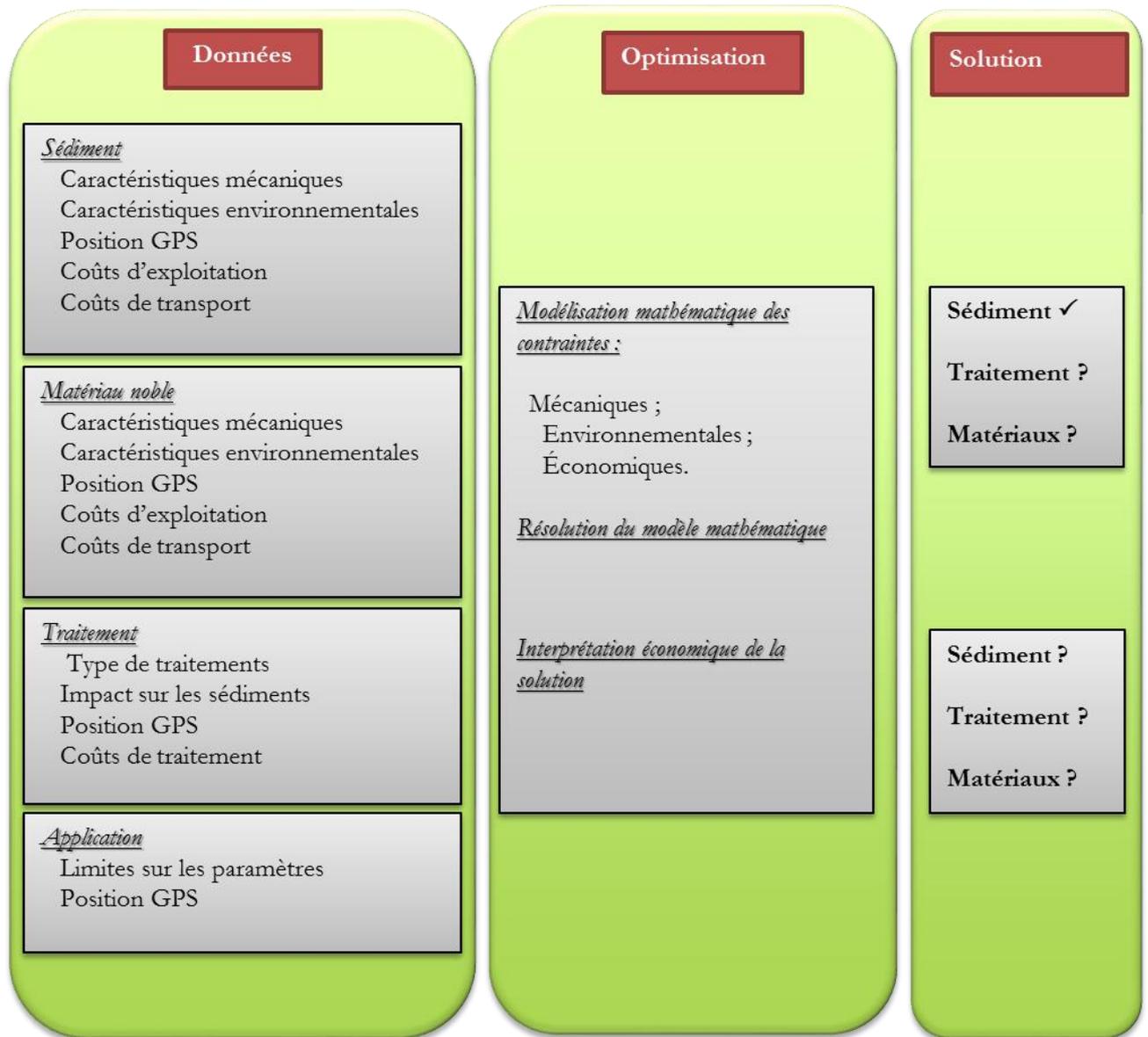


Figure.IV. 2 Composantes du logiciel [Benzérou et al]

Le logiciel se décompose principalement en trois modules : Entrée, Solveur et Solution(Sortie) :

- **Entrées** : module destiné à la collecte de la donnée liée aux sédiments, aux matériaux, aux centres de traitements et aux zones de stockage.

◆ **Sédiment/matériau**

Le sédiment est identifié par son emplacement, les coûts de son transport et/ou exploitations, ses caractéristiques environnementales (table des éléments chimiques) et mécaniques (granulométrie, plasticité, teneur en eau,...) et sa classification géotechnique (GTR).

◆ **Centre de traitement**

Les centres de traitements doivent être identifiés par leur emplacement (adresse, coordonnées GPS). Chaque centre de traitement exécute un ensemble de traitements spécifiques. Chaque traitement en entrée a un coût, a un sédiment auquel le traitement peut être appliqué (il peut être applicable sur tous les sédiments) et a un impact en pourcentage sur les contaminants.

◆ **Centre de stockage**

Un centre de stockage est défini principalement par son emplacement, le type de matériau accepté pour le stockage (inerte, non dangereux, dangereux) et le coût de stockage.

- **Solveur** : module destiné à modéliser les contraintes du problème puis à résoudre le modèle mathématique qui en résulte.
- **Solution/Sortie** : module destiné à l'interprétation des solutions du modèle et à répondre aux questions soulevées. À titre d'exemple, l'outil doit nous répondre sur ce type d'interrogation : pour un sédiment et une application donnés, quels sont le traitement et l'ajout granulaire optimaux ?

4.3. Données

4.3.1. *Données relatives au sédiment/matériau*

Le sédiment est identifié principalement par les données suivantes :

- Emplacement géographique : l'adresse et/ou les coordonnées GPS de la position géographique nous permet de calculer les coûts de transport des sédiments ;
- Coûts unitaires du transport : cette donnée est complémentaire pour la première, Elle nous permet d'évaluer le coût du transport de nos sédiments et des autres matériaux d'une façon très réelle ;
- Coût d'exploitation ou d'achat (en cas de matériau) : Par rapport au sédiment, plusieurs types de dragage sont possibles (dynamique, hydraulique,...), Le coût varie selon le type de dragage et l'emplacement du sédiment, Concernant les

matériaux nobles, leur prix d'achat est une information importante car il s'agit d'un coût considérable ;

- Caractéristiques environnementales : l'état chimique des sédiments (resp, matériaux) est important lors du processus de valorisation, Le choix des prétraitements et traitements sur les éléments polluants sera modélisé par des contraintes mathématiques afin de décontaminer ce sédiment d'une façon optimale ;
- Caractéristiques mécaniques (granulométrie, plasticité, teneur en eau,...) : Ces données nous permettent de classer, selon le GTR, les sédiments (resp, matériaux), ça nous permet également d'identifier les points faibles du sédiment, Les mauvaises caractéristiques seront corrigées par des ajouts granulaires, une opération qui est prise en compte par un ensemble de contraintes du modèle mathématique ;
- Matière organique : ce paramètre concerne principalement les sédiments, Selon l'application de la valorisation souhaitée des sédiments, il peut y avoir une limite en pourcentage toléré pour la matière organique (Exp : <3% pour l'application routière).

Les trois premiers paramètres feront partie de l'objectif du modèle mathématique où nous cherchons une solution à moindre coûts. D'un autre côté, les trois derniers feront partie des contraintes du problème.

À travers les résultats expérimentaux de caractérisation des sédiments fluviaux « Hem, Deûle et Croix » étudiés précédemment, nous avons identifié les principaux paramètres à inclure dans la fiche d'identité du sédiment introduite dans le modèle comme présenté dans la figure ci-dessous.

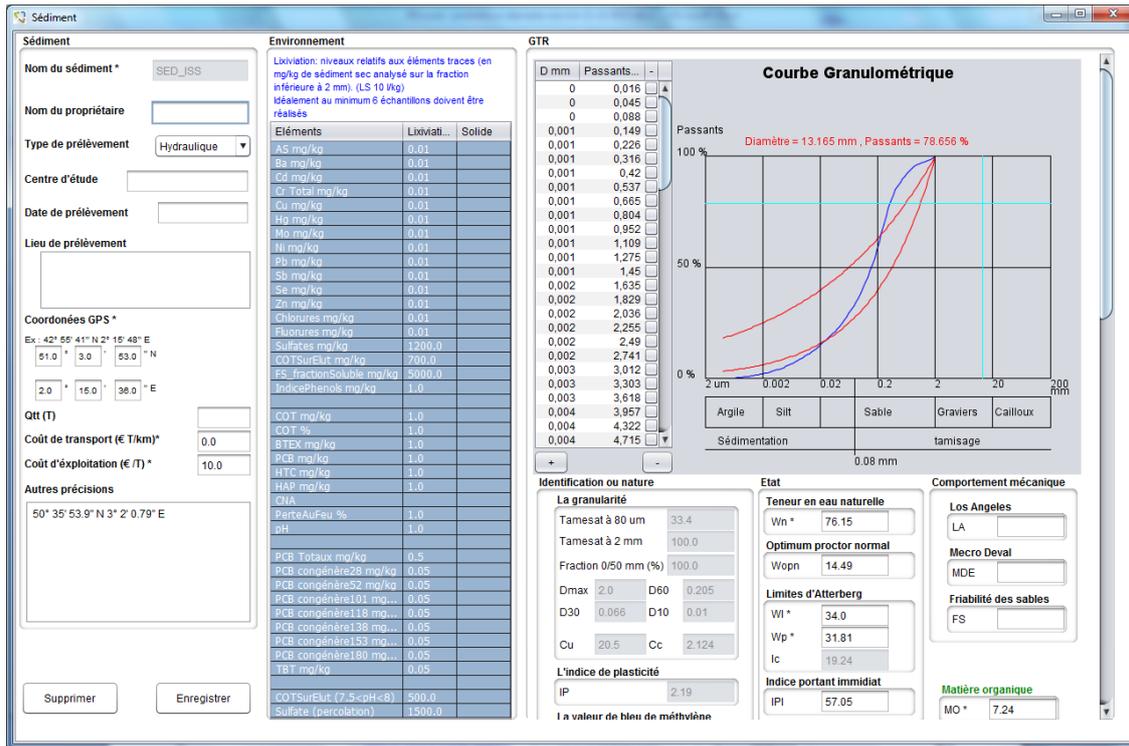


Figure.IV. 3 Fiche de sédiment/matériau [4]

4.3.2. Données relatives aux centres de traitement :

Sachons que les sédiments pollués vont être transportés vers des centres de traitement en cas de besoin. L'emplacement (adresse et/ou coordonnées GPS) de ces centres est alors nécessaire pour évaluer les coûts de transport. Chaque centre effectue un ensemble de traitements qui doivent être prises en compte au cours de la modélisation.

Concernant le traitement, il dépend essentiellement de ces 3 données : le coût du traitement, le sédiment à traiter et l'effet de ce traitement sur les contaminants, Une solution optimale du modèle est une solution qui propose les traitements suffisants pour décontaminer le sédiment à moindre coût,

4.3.3. Données relatives à l'application

Avant de présenter la modélisation mathématique, quelques données supplémentaires et importantes liées à l'application souhaitée doivent être fournies :

- Limites de tolérance pour les paramètres chimiques et mécaniques : dans notre exemple, il s'agit de l'application « Route » où le guide SETRA doit être respecté ;

- Coordonnées GPS de l'emplacement du projet : le lieu de réalisation de l'application (route dans notre exemple) doit être spécifié afin d'évaluer les coûts de transport.

Dans la suite, nous allons présenter une modélisation mathématique pour la formulation des matériaux formulés à partir de sédiments fluviaux pour une valorisation en technique routière.

4.4. Optimisation

La gestion des données est très importante pour le processus de valorisation des sédiments. La motivation principale de l'optimisation réalisée à travers un modèle mathématique est l'automatisation d'un traitement d'une grande et riche base de données,

Par la suite, une présentation de la modélisation considérée pour la valorisation des sédiments en techniques routière,

4.4.1. *Modélisation mathématique*

4.4.2. *Contraintes générales*

L'objectif ici est de trouver une solution qui fournit un matériau apte à l'usage routier, Cette solution est sous la forme d'un mélange d'un sédiment avec un ou plusieurs matériaux nobles (ex: sable) soumis à un ensemble de traitements physiques et chimiques afin de répondre aux exigences et contraintes normatives, La première condition consiste à assurer le choix d'un seul sédiment, Pour cela, nous créons la contrainte:

$$\sum_{i=1}^n x_i = 1, \quad (1) .$$

où la variable binaire x_i est égale à 1 si le sédiment i est utilisé et $i = 1, \dots, n$ est le nombre de sédiments,

Pour les matériaux nobles, nous introduisons la variable ($S_s > 0$) qui représente le nombre des unités du matériau s utilisé dans la formulation, Donc, la quantité totale S des matériaux nobles utilisés est présentée par la contrainte:

$$S = \sum_{s=1}^{|S|} S_s \quad (2) .$$

4.4.3. Contraintes environnementales

L'aspect environnemental dans la construction des routes à base des sédiments de dragage devient de nos jours une des contraintes les plus exigeantes d'un point de vue réglementaire (Guide SETRA). Chaque pays exige certaines limites pour les éléments polluants dans la matière première utilisée dans la construction, Les limites d'acceptabilité d'utilisation des matériaux à usage routier concernent principalement la concentration des éléments polluants dans ces matériaux,

Ces limites peuvent changer d'un pays à l'autre mais les contraintes restent présentes. Pour rendre le matériau (le sédiment dans notre cas) acceptable pour la construction routière, il faut le nettoyer, autrement dit, il doit être traité en utilisant des techniques de prétraitement et de traitement connues pour réduire la concentration des éléments si nécessaire. Nous savons que chaque technique de traitement a un impact sur l'ensemble des éléments polluants, par exemple le traitement par électrocinétique peut réduire en pourcentage la concentration de certains métaux lourds tels que le Zn jusqu'à 32% [70] et le traitement par remédiation peut la réduire encore jusqu'à 10%. Donc l'application de ces deux traitements peut réduire la concentration jusqu'à 3,2% ($32\% \times 10\%$) de sa concentration initiale [75]. Notons qu'en pratique, rarement sont les cas où le sédiment nécessite de multiples traitements. Pour modéliser cette contrainte, nous introduisons les variables binaires T_t pour $t = 1, \dots, |T|$ où $|T|$ est le nombre des traitements possibles:

$$T_t = \begin{cases} 1 & \text{si le traitement } t \text{ est appliqué} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$q_i^j \in [0,1]$: valeur continue indique la quantité de l'élément polluant j dans le sédiment i utilisé et Q^j la quantité limite autorisée associée à l'élément j . Notons par $|Q|$ le nombre des éléments polluants. Le paramètre δ_{ti}^j représente le pourcentage de réduction de la concentration du polluant j quand le traitement t est appliqué sur le sédiment i , La contrainte environnementale peut être donc écrite de la façon suivante:

$$q_i^j \prod_{t=1}^{|T|} (1 - \delta_{ti}^j T_t) \leq Q^j + (1 - x_i)M \quad i = 1, \dots, n, \quad j = 1, \dots, |Q| \quad (3) .$$

avec M une constante positive de grande valeur qui aide à relâcher la contrainte quand le sédiment i n'est pas utilisé ($x_i = 0$). Le produit $\prod_{t=1}^{|T|} (1 - \delta_{ti}^j T_t)$ modélise le pourcentage de réduction de la concentration q_i^j .

D'autres contraintes s'imposent au niveau des traitements qui indiquent l'incompatibilité d'utilisation de deux ou plusieurs traitements ensemble. Notons par C_T l'ensemble des combinaisons C_T^k de traitements non compatibles. Cette condition peut être modélisée par la contrainte:

$$\sum_{t \in C_T^k} T_t \leq 1 \quad k = 1, \dots, |C_T| \quad (4)$$

4.4.4. Contraintes mécaniques (granulométrique)

Les contraintes de cette section sont basées principalement sur les caractéristiques granulométrique. Cette composition en pourcentage des sédiments et matériaux nobles (ex: sable) utilisés pour usage routier doit respecter certaines limites définies par le « Fuseau Talbot », D'une façon générale, les matériaux les plus fiables sont ceux qui manifestent un arrangement granulaire optimisé. Ceci implique une bonne compacité du matériau et par conséquent un matériau plus résistant. Le Fuseau Talbot est défini par l'intervalle $\left[\left(\frac{u}{\bar{u}} \right)^{0,25}, \left(\frac{u}{\bar{u}} \right)^{0,40} \right]$ où u est le diamètre et \bar{u} représente le diamètre maximum de ces grains. La formulation mathématique des contraintes précédentes s'écrit de la façon suivante:

$$\left(\frac{u}{\bar{u}} \right)^{0,25} (1 + S) \leq \sum_{i=1}^n d_i^u x_i + \sum_{s=1}^{|S|} d_s^u S_s \leq \left(\frac{u}{\bar{u}} \right)^{0,40} (1 + S) \quad u = 1, \dots, |U| \quad (5) .$$

où $|D|$ est le nombre de diamètres considérés et d_i^u (resp, d_s^u) est le pourcentage des grains de diamètre u pour le sédiment i (resp, le matériau noble s). Rappelons que S est une variable qui indique le nombre d'unités de matière noble ajoutée au sédiment, donc $(1+S)$ représente la quantité totale des matériaux utilisés soit le sédiment i (un seul sédiment doit être choisi, contraintes (1)) représenté par la valeur 1 soit les matériaux nobles représentés par S ,

4.4.5. Contraintes sur matière organique

Un des problèmes majeurs qui peut faire face au processus de valorisation des sédiments en technique routière est le taux de la matière organique présente dedans, Celle-ci contient souvent une quantité importante de métaux contaminants, de plus, elle a une influence considérable sur le comportement mécanique des sédiments. Le pourcentage de cette matière doit être donc limiter par un seuil de $Q^{MO} = 3\%$ par tonne, Pour cela, nous devons appliquer certains types de traitements (ex: calcination) qui font partie de l'ensemble des traitements T et/ou la diluer

(mélanger) avec des matériaux nobles (ex: sable), La contrainte (6) assure le seuil de la matière organique de la façon suivante:

$$Q_i^{MO} \prod_{t=1}^{|T|} (1 - \delta_{ti}^{MO} T_t) \leq Q^{MO} (1 + S) + (1 - x_i)M \quad i = 1, \dots, n \quad (6) .$$

où q_i^{MO} est la quantité de la matière organique dans une unité de sédiment i , Q^{MO} ($= 3$) est la limite acceptable pour l'usage routier, δ_{ti}^{MO} est le pourcentage de réduction de la matière organique dans le sédiment i après l'application du traitement t et $(1+S)$ représente le nombre d'unités utilisées (1 pour le sédiment et S pour les matériaux nobles), Cette quantité S ajoutée au sédiment sert à diluer la matière organique en ajoutant des matériaux nobles. Notons que cette contrainte suit la même logique de la contrainte (3) en termes de traitement et de relaxation de la contrainte à l'aide de $(1 - x_i)M$,

4.4.6. Contraintes économiques/objectif

L'objectif de du modèle mathématique est de trouver une solution acceptable pour l'usage routier avec un coût minimum. Ces coûts se décomposent en trois : les coûts des sédiments (le coût de dragage et les coûts de transport), notés par les vecteur $C^1 = (c_1^1, \dots, c_n^1)$, les coûts des traitements notés $C^2 = (c_1^2, \dots, c_{|T|}^2)$ et les coûts d'acquisition ainsi que les coûts du transport des matériaux nobles $C^3 = (c_1^3, \dots, c_{|S|}^3)$. La formulation de la fonction objectif est alors présentée par:

$$Min \quad \sum_{i=1}^n c_i^1 x_i + \sum_{t=1}^{|T|} c_t^2 T_t + \sum_{s=1}^{|S|} c_s^3 S_s \quad (7)$$

4.5. Présentation globale du modèle mathématique

La modélisation du problème de valorisation des sédiments pour l'usage routier est présentée par le modèle mathématique MIP 0-1 suivant, Ce modèle est non linéaire à cause des contraintes (3) et (6),

$$Min \quad \sum_{i=1}^n c_i^1 x_i + \sum_{t=1}^{|T|} c_t^2 T_t + \sum_{s=1}^{|S|} c_s^3 S_s \quad (7)$$

$$s,c, \quad \sum_{i=1}^n x_i = 1, \quad (1)$$

$$S = \sum_{s=1}^{|S|} S_s \quad (2)$$

$$q_i^j \prod_{t=1}^{|T|} (1 - \delta_{ti}^j T_t) \leq Q^j + (1 - x_i)M \quad \begin{array}{l} i = 1, \dots, n, \\ j = 1, \dots, |Q| \end{array} \quad (3)$$

$$\sum_{t \in C_T^k} T_t \leq 1 \quad k = 1, \dots, |C_T| \quad (4)$$

$$\left(\frac{u}{\bar{u}}\right)^{0,25} (1 + S) \leq \sum_{i=1}^n d_i^u x_i + \sum_{s=1}^{|S|} d_s^u S_s \leq \left(\frac{u}{\bar{u}}\right)^{0,40} (1 + S) \quad u = 1, \dots, |U| \quad (5)$$

$$Q_i^{MO} \prod_{t=1}^{|T|} (1 - \delta_{ti}^{MO} T_t) \leq Q^{MO} (1 + S) + (1 - x_i)M \quad i = 1, \dots, n \quad (6)$$

$$x \in \{0,1\}^n, \quad T \in \{0,1\}^{|T|}, \quad S_s \geq 0, \quad S \geq 0 \quad s = 1, \dots, |S|$$

La résolution de ce type de problème a fait l'objet d'un nombre très important de travaux de recherche dans le domaine des mathématiques appliquées et plus précisément la recherche opérationnelle. L'application des techniques de la recherche opérationnelle pour la gestion des déchets est apparue au milieu des années soixante-dix [67] et [68]. Ces recherches se sont principalement focalisées sur les aspects environnementaux [69], [70]. La grande majorité des travaux de recherche d'optimisation de la valorisation des sédiments sont étudiés dans le cadre de la logistique et le transport.[85].

4.6. Interprétation de la solution

Dans la Figure.IV. 4 , nous présentons un exemple d'une solution trouvée par le solveur. Nous avons sélectionné dans la colonne à gauche dans la Figure.IV. 4, 7 traitements possibles pour lesquels chaque traitement est représenté par une variable. Donc ces traitements sont présentés par le vecteur des variables binaires $(T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6, T_7)$. Dans la solution numérique, toutes ces variables ont eu la valeur de 0 sauf T_6 qui a eu la valeur de 1, donc elle est choisie, ce que la colonne à droite montre. De la même manière se fait l'interprétation des valeurs numériques trouvées pour les autres familles de variables (variables x et S).

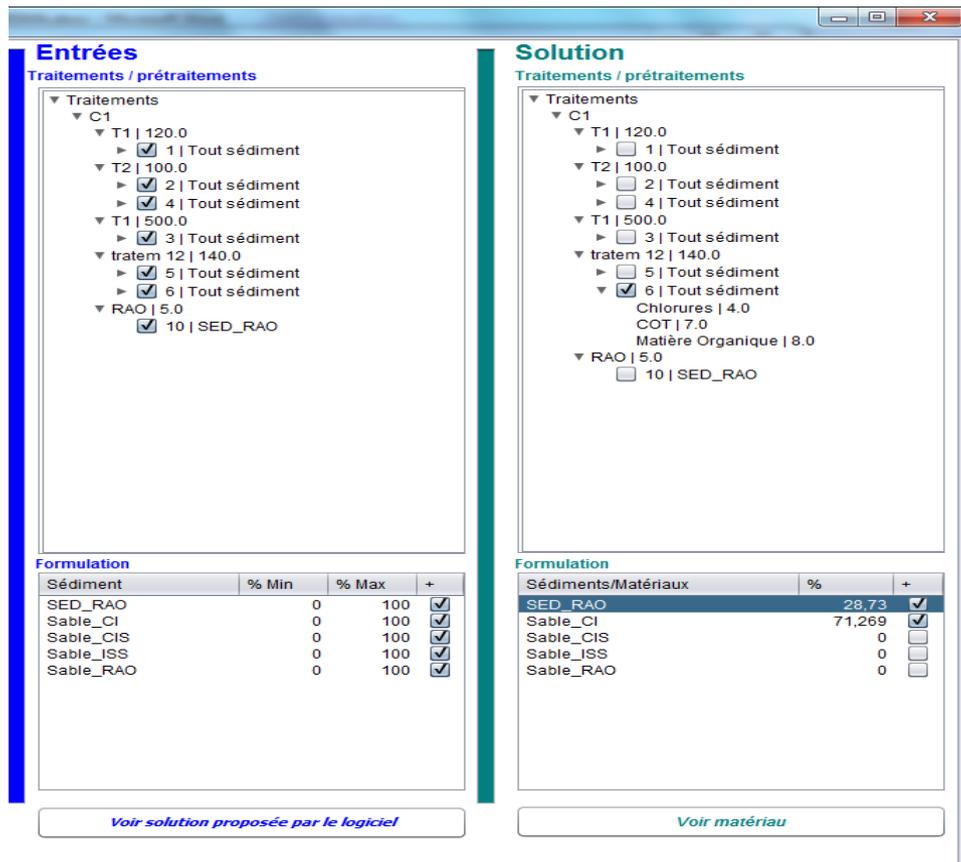


Figure.IV.4 Solution du modèle

Les solutions trouvées par le logiciel exigent une validation via des tests en laboratoire et études expérimentales. En se basant sur les résultats obtenus en laboratoire, nous avons comparé les solutions obtenues par le logiciel et celles déjà validés expérimentalement. Dans la section suivante, nous avons réalisé une étude comparative afin de valider notre choix des mélanges ainsi que le modèle mathématique.

4.7. Validation du modèle :

Afin de valider le modèle mathématique, des tests ont été effectués sur les formulations retenues au laboratoire en vue d'une valorisation en technique routière. Plusieurs facteurs entrent en jeu pour le choix du mélange adéquat par le modèle numérique, commençons par le cout de transport, les courbes granulométriques, la matière organiques, passons par le taux d'argilosité pour finir avec les tests de lixiviation. Tous ces paramètres-là interviennent dans le choix final de la formulation à retenir.

Nous avons commencé par entrer les données de chaque constituant (Sable et sédiments) dans la base de données du logiciel ; ces données physiques, économiques et chimiques permettent en premier lieu de classer chaque matériau selon le guide GTR.

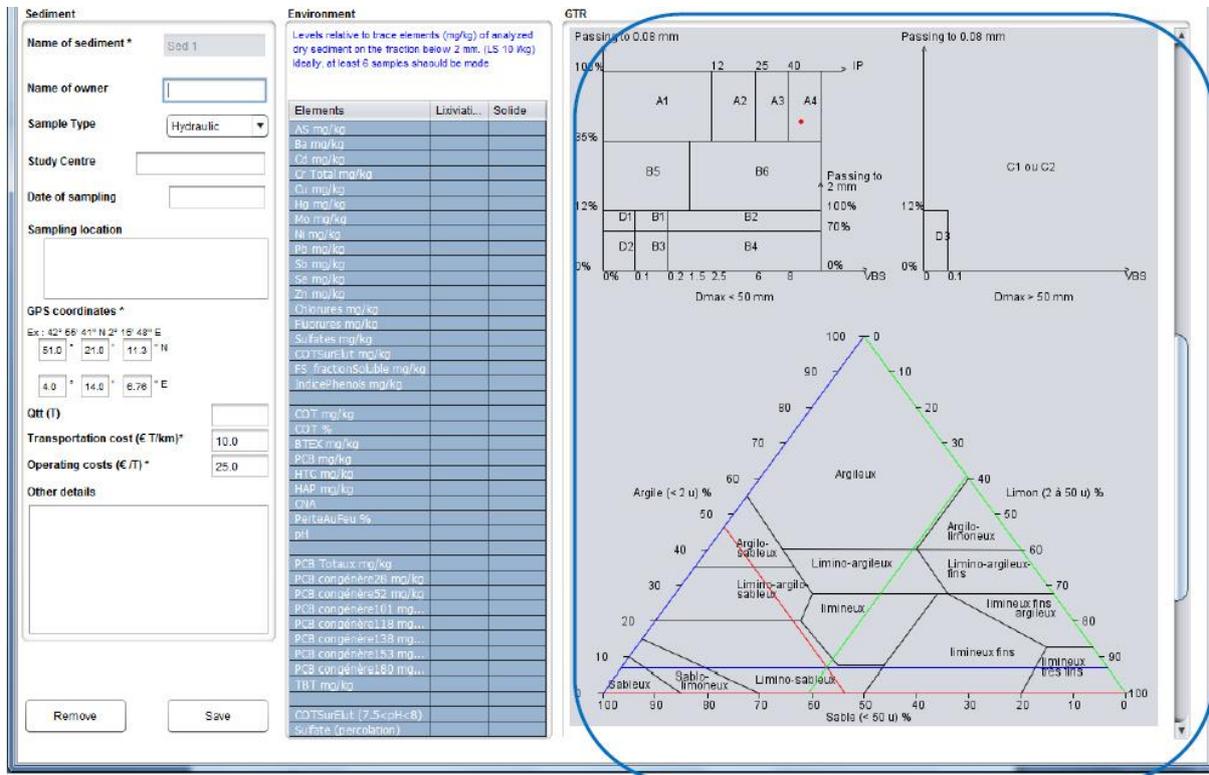


Figure.IV. 5 Classification des sédiments via le logiciel selon le GTR

Après l'introduction de toutes les données propres à chacun des matériaux utilisés, on peut maintenant créer une nouvelle formulation selon la composition souhaitée (Exemple : Sable et sédiment de la Deûle) mais aussi selon la voie de valorisation envisagée.

Les résultats obtenus par le logiciel mathématique sont très encourageants et très prometteurs; avec des pourcentages très proches de ceux effectués au laboratoire, ceci nous a permis de valider toutefois la formulation expérimentale mais aussi le modèle et le logiciel mathématique. Dans la figure ci-après, une comparaison des résultats théoriques et expérimentaux des formulations réalisées à base des sédiments fluviaux SH et SD est présentée.

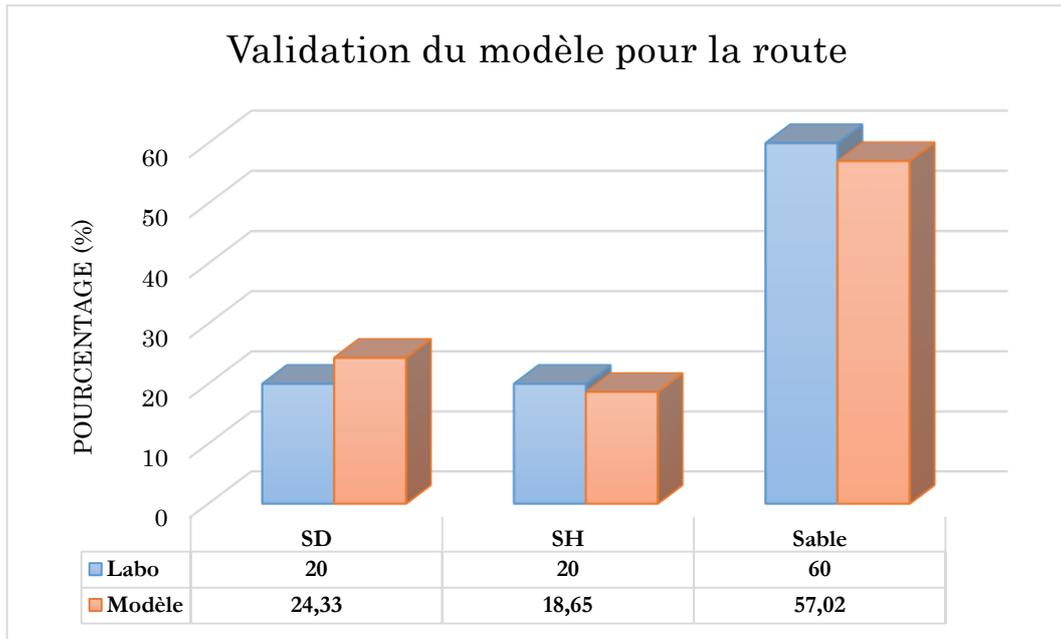


Figure.IV. 6 Comparaison entre les résultats expérimentaux et ceux du modèle pour la valorisation en route

Comme nous pouvons le remarquer, les résultats expérimentaux et ceux obtenus par le modèle sont proches que ce soient pour les proportions du sable, du sédiment SD ou aussi du sédiment SH. Ceci servira à valider le modèle pour l'application routière.

4.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons traité un nouveau problème d'optimisation qui traite la valorisation des sédiments. Le problème consiste à la fois en la gestion environnementale et mécanique des sédiments afin de les utiliser dans une application routière. Le problème rencontré a été modélisé sous la forme d'un modèle mathématique non linéaire avec variables mixtes. La validation du modèle mathématique a été réalisée à travers des essais expérimentaux réalisés en laboratoire. Les solutions obtenues par le modèle sont très proches de ceux obtenus expérimentalement ce qui démontre une cohérence et une convergence de la modélisation mise en place.

**CONCLUSION GENERALE ET
PERSPECTIVES**

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Les travaux de recherche présentés dans ce rapport de thèse consistent principalement à mettre en valeur les sédiments de dragage fluviaux en vue d'une gestion optimale et responsable.

Depuis plusieurs années, la consommation mondiale des matériaux utilisés dans le domaine du Génie Civil est en très forte croissance. L'exploration et l'exploitation des gisements actuels et futurs sont de plus en plus réglementées et difficiles d'accès pour des raisons économiques, sociétales et environnementales. Dans un contexte accru de préservation de l'environnement, la gestion et la valorisation des déchets, sous et coproduits industriels demeurent des enjeux incontournables, tant financiers qu'environnementaux et positionnés au cœur des politiques de développement durable. C'est dans ce contexte que s'inscrivent mes travaux de thèse présentés dans ce rapport.

L'objectif de ce travail est de dresser un bilan sur l'état actuel des connaissances et de prospecter expérimentalement différentes filières de valorisation dans les domaines du Génie Civil à savoir : l'application routière, éco-modèle paysager et matériaux à base cimentaire.

Dans le premier chapitre de cette thèse, nous avons exposé l'étude bibliographique qui nous a permis de définir les différents paramètres liés à la caractérisation et à la gestion des sédiments de dragage. Nous avons également défini les exigences de la réglementation qui limite souvent toute possibilité de valorisation de ces sédiments et leur réutilisation dans des filières de génie civil.

Le deuxième chapitre a été consacré à la caractérisation physique, minéralogique et mécanique des sédiments fluviaux bruts en fonction de la voie de valorisation visée. Les trois sédiments étudiés présentaient des teneurs en eau assez élevées et contenaient beaucoup de débris végétaux ce qui a nécessité un prétraitement avec un tamisage humide à 5 mm suivi d'une décantation naturelle puis un séchage et un broyage d'une partie de ces sédiments. La matière organique variait de 7% pour le sédiment de la Deûle à 14% pour celui de la Croix influant ainsi directement leur masse volumique absolue, ce qui nécessite un traitement pour une éventuelle valorisation en génie civil.

Les essais géotechniques réalisés sur ces trois sédiments fluviaux ont montré une différence entre la nature des sédiments, sableux ou limoneux. Ces caractéristiques ont eu un impact sur la portance des sédiments avec des indices de portance immédiats respectivement de

27,8% et 36% pour SH et SD leur permettant d'être valorisable en technique routière contre seulement 14,82% pour SC. À partir des résultats obtenus, nous avons pu classer nos sédiments en A2 pour SC, A3 pour SH et B5 pour SD selon les prescriptions du guide GTR.

Quant aux analyses chimiques réalisées sur nos trois échantillons, l'essai de lixiviation sur les matrices solides et sur les éluats a montré que les sédiments SH, SC et SD ne présentent aucun dépassement des seuils définis par le guide « Setra » pour les différents éléments chimiques. Ceci implique donc qu'il n'y a pas d'impact néfaste sur l'environnement et valide donc la possibilité de valorisation de ces sédiments en génie civil.

À l'issue de ces résultats, et selon les données géotechniques et chimiques obtenus, nous avons validé le choix des sédiments étudiés pour des différentes filières de valorisation : Le sédiment de la Deûle (SD) a été choisi pour la filière des matériaux à matrices cimentaires, un mélange du sédiment de la Deûle et du Hem pour la technique routière et un deuxième mélange de Deûle et de Croix pour la filière d'éco-modèle paysager.

Dans le 3^{ème} chapitre, nous avons étudié les possibilités de valorisation de ces sédiments dans les différentes applications.

Pour la valorisation des sédiments en éco-modèle paysager, une étude de formulation et de vérification des contraintes de dimensionnement a été réalisée. Cette étude nous a permis de réaliser une planche expérimentale à base de sédiments fluviaux.

Les essais mécaniques sur les sédiments bruts préconsolidés SC et SD ainsi que sur le mélange des deux ont été réalisés. Les résultats obtenus à travers l'essai œdométrique indiquent une augmentation de la contrainte de préconsolidation σ'_p qui passe de 39 kPa pour SC à 52,13 kPa pour le mélange. Cette augmentation est principalement due à la diminution de la matière organique. De même, nous remarquons une nette amélioration au niveau de l'indice de compression du mélange étudié : il était de l'ordre de 0,22 pour SC (sol assez fortement compressible) contre 0,16 pour le mélange le classant comme sol moyennement compressible, ce qui lui permet d'être utilisé en construction sans prescriptions particulières. Cependant, le sédiment SD présente le meilleur indice de compression en raison de sa granulométrie grossière.

L'essai de cisaillement à la boîte effectué en consolidé-drainé sur les 3 différents échantillons nous a permis de déterminer les propriétés internes de chacun d'entre eux, en particulier la cohésion et l'angle de frottement interne. Les résultats obtenus montrent que la cohésion effective C' passe de 10 kPa pour SC à 34 kPa pour le mélange réalisé, de même, l'angle

de frottement atteint 39° pour le mélange contre 33° et 31° respectivement pour SC et SD. La résistance au cisaillement a aussi augmenté pour atteindre 260 kPa.

À travers ces résultats obtenus au laboratoire, nous pouvons constater que le mélange des deux sédiments SC et SD présente des caractéristiques mécaniques intéressantes et il s'avère qu'il pourrait être une solution intéressante pour une meilleure valorisation en éco-modelé paysager. Afin de vérifier la faisabilité à l'échelle semi-industrielle, nous avons procédé à la réalisation d'une planche expérimentale d'éco-modelé paysager et un suivi du relargage des sédiments à travers le temps.

Le suivi environnemental de la planche expérimentale l'éco-modelé réalisé à travers l'analyse des eaux de ruissellement et de percolation qui la traversent a montré une faible teneur en éléments métalliques et que la valorisation des sédiments pour cette filière n'a pas d'impact néfaste sur le milieu récepteur. Néanmoins, le suivi mécanique prévu pour la planche n'a pas pu aboutir en raison des dimensions moyennement faibles de l'ouvrage, ainsi que l'absence d'engin adéquat à ce type de planche pour les travaux de prélèvement.

En l'absence de données accessibles sur des buttes paysagères existantes réalisées à base de sédiments fluviaux, nous avons pu, pour des fins de comparaisons, réaliser un suivi des paramètres mécaniques et environnementaux d'une butte à base de sédiments marins située au GPMD.

Nous avons carotté des échantillons de 4m de profondeur en haut de la butte et avons installé des piézomètres pour le suivi environnemental et le control du relargage des métaux lourds. Les résultats des essais œdométriques réalisés sur les prélèvements montrent que l'ouvrage a une compressibilité modérée avec un indice de compression égal à 0,15. Concernant les résultats de cisaillement à la boîte de Casagrande, l'angle de frottement est égal à 35° et la cohésion est de 32 kPa. À partir de ces résultats, nous nous apercevons que les valeurs des différents paramètres mécaniques étudiés que ce soient pour les sédiments fluviaux ou marins sont similaires ces deux sédiments comportent de la même manière.

L'étude de l'impact environnemental de l'éco-modelé paysager de Dunkerque a révélé des dépassements des seuils de chlorure et de sulfate pour des eaux piézométriques et de surface, ce qui pourrait être raisonnable en raison de l'agressivité et la salinité du milieu marin dans lequel l'ouvrage a été instrumenté. À partir de ces résultats, nous étions contraints de réaliser un essai de percolation selon la norme CEN/TS 14405. Après le montage de la colonne, la pose d'un échantillon saturé de sédiment marin et après la stabilisation du volume d'eau sortant, nous avons

procédé à l'analyse des lixiviats obtenus au fil du temps. Les résultats montrent qu'il n'y a pas de relargage des éléments métalliques en particulier le chlorure et le sulfate et que par conséquent notre sédiment marin est inerte et ne pollue pas l'environnement.

Pour la valorisation des sédiments fluviaux en sous-couches routières, nous avons dans un premier temps évalué la possibilité de valoriser les sédiments de la Deûle uniquement par traitement aux liants hydrauliques (Rolac PI LH et ROLAC 645 LH). Les résultats mécaniques sur les éprouvettes confectionnées n'étaient pas du tout satisfaisants et le matériau était trop friable même en diminuant la quantité de sédiments et en rajoutant différentes proportions de sable qui ne comblait pas l'absence de fractions fines spécifiques.

Ceci, nous a conduits à trouver une autre solution pour valider notre formulation au laboratoire d'où vient l'idée d'intégrer un deuxième sédiment SH dans le mélange. Pour cela, nous avons effectué un essai de compacité afin de fixer les proportions de chaque constituant et nous avons finalement opté pour un mélange de 2% de chaux, 7% de liant hydraulique, 20% du sédiment SD, 20% du sédiment SH et 60% de sable boulonnais tamisé à 2mm.

Cette formulation a été étudiée d'un point de vue mécanique à différentes échéances pour pouvoir classer le matériau routier selon le guide GTS à partir du couple (Rt, E). Les essais de compression, de traction et de module d'élasticité ont été réalisés à 7, 28, 60 et 90 jours. Pour les résistances à 360 jours, elles ont été estimées en se référant à des coefficients empiriques basés sur les résistances à 28 et 90 jours. Le matériau obtenu est classé en classe S3 et peut donc être utilisable en couches d'assise de chaussée et plus précisément en couche de base (IPI >45).

Après la validation mécanique du matériau routier à l'échelle laboratoire, nous avons entrepris la réalisation d'une planche expérimentale de 1m² de surface pour l'étude de la faisabilité semi-industrielle. Cette planche a été réalisée avec la même formulation effectuée au laboratoire avec des installations spécifiques pour le suivi des eaux de percolation et de ruissellement. Les essais mécaniques réalisés sur les échantillons carottés classent le matériau routier en classe S2. Une légère diminution des résistances mécaniques a été constatée, ceci est peut-être dû à la différence des conditions de mise en œuvre in situ ainsi que l'imprécision de l'énergie de compactage sur la surface de la planche.

Les premiers résultats du suivi environnemental de la planche ont montré que le relargage des éléments métalliques ne dépasse pas les seuils fixés par le guide méthodologique Setra. Le suivi environnemental va être continué pour une durée fixée initialement d'une année.

Les travaux concernant la valorisation des sédiments fluviaux en matériaux cimentaires avait pour but principal d'étudier la faisabilité d'une telle valorisation en laboratoire en se référant aux résistances mécaniques exigées par la norme. Pour cela, nous avons étudié différentes formulations à base de sédiments, sable et ciment pour une valorisation en béton, coulis, et bétons réservoirs chaussée.

Pour la prospection de valorisation en blocs béton, nous avons réalisé 4 formulations avec des substitutions de sédiment de 5%, 7,5%, 10% et 12,5%. Deux types de ciments ont été utilisés pour ces formulations ; le CEM I 52,5 N et le CEM I 52,5 PM. En analysant les résultats de l'essai de compression effectué sur les blocs de béton, nous remarquons que pour le CEM I 52,5 N, uniquement 5% de substitution de sédiment entrant dans la gamme de la résistance 15-, 25 MPa est envisageable. Cependant, le seuil de 15 MPa est atteint pour l'ensemble des formulations contenant le ciment CEM I 52.5 PM ES.

Une étude de faisabilité de BRC a été également réalisée. Au total, six formulations ont été mises au point avec des substitutions en sédiments allant de 10% jusqu'à 50%. La faisabilité a été validée pour les formulations B10 et B15 avec 10% et 15% de sédiments et ayant des résistances respectives de 39 et 31 MPa à 28 jours. Suite à ces résultats obtenus en laboratoire, une campagne In situ (planche expérimentale) sera réalisée afin de produire 1m³ de BRC. Une série d'essais mécaniques et d'étude de durabilité est envisagée afin de valider l'étude In situ. Le suivi environnemental de cette planche expérimentale sera également effectué par une entreprise partenaire.

La troisième voie étudiée dans la filière « matrices à base cimentaire » est celle des coulis de remplissage de tranchée à base de sédiments et de cendres volantes. Pour ceci, cinq formulations ont été effectuées avec l'ajout de différents liants : le CEM I 52,5 N et le Rolac PI. Quatre paramètres essentiels ont été vérifiés pour ces formulations : l'PIPI, l'affaissement et la résistance à la compression immergée et non immergée. Il s'avère que le liant « Rolac » donne les meilleures performances mécaniques et ceci pourrait être dû à sa composition (plus de 60% de laitier). D'un point de vue environnemental, les concentrations des éléments analysés restent inférieures aux seuils fixés par la norme.

Le quatrième et dernier chapitre a été consacré à un modèle mathématique d'aide à la décision qui valide les formulations obtenues au laboratoire pour la filière route. Ce logiciel développé au sein du groupe de travail du laboratoire génie civil traite principalement toutes les caractéristiques physiques et chimiques des constituants à utiliser ainsi que les paramètres liés à la

formulation des mélanges, aux coûts de transport et de stockage. Les compositions obtenues par ce modèle sont presque identiques à celles obtenues expérimentalement au laboratoire avec un écart moyen de 5% ce qui valide l'approche de modélisation mise en place.

Dans le but d'améliorer la qualité de ce travail et d'améliorer certains critères nécessaires à la valorisation des sédiments de dragage en génie civil, il serait intéressant de réaliser des planches expérimentale à échelle 1 sous condition de trafic et d'exposition réels. Ceci nous permettrait d'apprécier le comportement in situ des solutions proposées sur une longue durée et pendant plusieurs saisons.

Pour la valorisation des sédiments fluviaux en matériaux à base cimentaire, l'impact de la matière organique sur le comportement de ces matériaux pourrait être étudiée à travers des essais de durabilité et des prospections à l'échelle microscopique (DRX, MEB, ATG...). Il serait également intéressant de faire un suivi environnemental approfondi pour s'assurer de la stabilité des éléments chimiques présents dans la matrice cimentaire. Nous pourrions aussi élargir l'étude sur d'autres sédiments avec des caractéristiques et des provenances différentes.

En ce qui concerne l'outil d'aide à la décision, et après sa validation pour l'application routière, il serait intéressant d'introduire d'autres paramètres principalement mécaniques pour l'orienter vers d'autres applications de génie civil pour une validation globale qui réunit différentes voies de valorisation.

Références Bibliographiques :

- [1] **T. Tran. 2009** : Valorisation de sédiments marins et fluviaux en technique routière | Mines Douai | Février 2009
- [2] **Samara. 2007** : Valorisation des sédiments fluviaux pollués après inertage dans la brique cuite. | École Centrale de Lille | Décembre 2007
- [3] **G. Schneider. 2001** : Le curage des sédiments des cours d'eau | Le courrier de l'environnement de l'INRA | 2001
- [4] **M. Benzerzour, R.Mansi, N.Abriak, F. Becquart. 2013**: Mathematical model for beneficial use of dredged sediments in road construction | International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT). ISSN: 2277-3754, pages 1-6, Volume 3, Issue 5 | November 2013
- [5] **V. Dubois. 2006** : Caractérisation physico chimiques et environnementale des sédiments marins. Application en technique routière. | Thèse de Doctorat | Mines Douai | 2006.
- [6] **R. Zentar, N.E. Abriak and V. Dubois. 2009**: Effects of salts and organic matter on Atterberg limits of dredged marine sediments. | Applied Clay Science 42 pp 391-397 | 2009
- [7] **A. Maher, W.S. Douglas & F. Jafari. 2006**: Field placement and evaluation of stabilized dredged material (SDM) from the New York/New Jersey Harbor. | Marine Georesources & Geotechnology, Vol 24, | 2006
- [8] **S. Kamali, F. Bernard, N.E. Abriak, P. Degrugilliers. 2008**: Marine dredged sediments as new materials resource for road construction. | Waste Management, Vol. 28, pp 919-928. | 2008
- [9] **P.Y Scordia, Z. Lafhaj, F. Skoczylas et F. Mongeois. 2008**: Caractérisation et valorisation en technique routière des sédiments fluviaux pollués et traités | École Centrale de Lille | Octobre 2008
- [10] **M. Miraoui. 2010** : Prétraitement et traitement des sédiments de dragage en vue d'une valorisation dans le génie civil. | Thèse de doctorat | Mines Douai | Décembre 2010
- [11] **M. Dia. 2013** : Traitement et valorisation de sédiments de dragage en technique routière | Thèse de Doctorat | Mines Douai | Mai 2013
- [12] **R. Achour. 2013**: Valorisation et caractérisation de la durabilité d'un matériau routier et d'un béton à base de sédiments de dragage | Thèse de doctorat | Mines Douai | Décembre 2013

- [13] **S. Brakni, N. Abriak and A. Hequette. 2009:** Formulation of artificial aggregates form dredged harbor sediments for coastline stabilization. | Environment Technology, vol 30, no. 8, pp 849-854 | 2009.
- [14] **A. Zri. 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 | Thèse de doctorat | Mines Douai | Novembre 2010
- [15] **K. Hamer, et V. Karius. 2002:** Brick production with dredged harbour sediments. An industrial-scale experiment | Waste Management, Volume 22, Issue 5, pp 521–530. | 2002
- [16] **Z. Lafhaj, M. Samara, F. Agostini, L. Boucard, F. Skoczylas and G. Depelsenaire. 2008:** Polluted river sediments from the North region of France: Treatment with Novosol process and valorization in clay bricks | Construction and Building Materials, vol 22, pp 755-762 | 2008.
- [17] **A. Mezencevova, N. Yeboah, S. Burns, F. Kahn and K. Kurtis. 2012:** Utilization of savannah harbor river sediment as the primary raw material in production of fired brick. | Journal of Environmental Management 113 pp128-136. | 2012
- [18] **F. Agostini. 2006:** Inertage et valorisation des sédiments de dragage marins | Thèse de doctorat | École centrale de Lille. | 2006.
- [19] **D. Wang. 2011 :** Solidification et valorisation de sédiments du port de Dunkerque en travaux routiers | Thèse de doctorat | Mines Douai | Décembre 2011
- [20] **J. Limeira, M. Etxeberria, L. Agulló, D. Molina. 2011,** Mechanical and durability properties of concrete made with dredged marine sand. | Construction and Building Materials, Vol 25, pp 4165–4174 | 2011
- [21] **Hardy. 2002 :** Historique national des opérations de curage et perspectives | Rapport final | Agence de l'eau Artois-Picardie | 31 janvier 2002
- [22] **LIFE. 2002 : Méthodes** de gestion et de réutilisation des sédiments pollués | Projet européen LIFE réalisé par In Vivo, l'Agence de l'eau Artois Picardie, le Pôle de Compétence des sites et sols pollués. | 2002
- [23] **Duchaufour. 1983 :** Pédogénèse et classification. | Tome 1. 2^{ème} Edition | Paris : Masson | 1983
- [24] **Capilla. 2005 :** Dynamique de transfert du cadmium et du zinc au sein des dépôts de sédiments de curage végétalisés | École Nationale Supérieure d'Agronomie et des Industries Alimentaires | Octobre 2005
- [25] **Ademe. 2006 :** Étude sur le niveau de consommation de carburant des unités fluviales françaises | Agence de l'Environnement et de Maitrise de l'Énergie (ADEME) | Janvier 2006.

- [26] **VNF. 2009** : Le volume à extraire pour entretenir et moderniser le réseau (vnf) | Schéma Directeur Régional des Terrains de Dépôt (SDRTD) | Voies Navigables de France | Direction régionale Nord-Pas de Calais
- [27] **VNF. 2010** : Guide des opérateurs fluviaux en Europe | Les éditions de la navigation du Rhin & Voies Navigables de France | Novembre 2010
- [28] **VNF. 2011** : Voies navigables 2013 - Relance pour la voie d'eau | Octobre 2011
- [29] **C. Le Guyader. 2013** : Enquête dragage 2010 - Analyse des données | Centre d'Études Techniques Maritimes et Fluviales | Département Environnement et Aménagement | Avril 2013.
- [30] **Power EA and Chapman PM. 1992**: Assessing sediment quality. In: Burton GA (ed), Sediment toxicity assessment | Lewis publishers, Boca Raton | 1992.
- [31] **Sigg L, Stumm W et Behra P. 1992** : Chimie des milieux aquatiques | Masson. Paris, France | 391p | 1992
- [32] **Marot F .1997** : Caractérisation et traitement de sédiments de dragage contenant des polluants métalliques | Université du Havre.
- [33] **L. Gontier. 2005** : La grappe d'Autan n° 54 | Éléments de gestion de la matière organique en sols viticoles | Institut Français de la Vigne et du Vin pôle Sud-Ouest (IFV Sud-Ouest) | Mars 2005
- [34] **Znaïdi I. E. 2002**. Etude et évaluation du compostage de différents types de matières organiques et des effets des jus de composts biologiques sur les maladies des plantes. Master of Science Degree N° 286, Méditerranéen Organic Agriculture, CIHEAM. Méditerranéen Agronomic Institute of Bari, 94 pp.
- [35] **D. Grosdemange. 2005** : Guide pour la gestion des opérations de dragage | IN VIVO Environnement | Décembre 2005
- [36] **CAR/PP. 2006** : Centre d'activités régionales pour la production propres | Prévention de la pollution dans le secteur de la céramique de la construction | Avril 2006
- [37] **Agence de l'eau. 2009** : Guide juridique et pratique sur la gestion des milieux aquatiques et humides | 'Agence de l'eau Seine-Normandie | Décembre 2009
- [38] **Agence de l'Eau Artois-Picardie. 2011** : Évaluation de l'état des plans d'eau « DCE » du bassin Artois-Picardie sur la période 2007-2010. | Rapport AEAP/DRM/SEM. | Novembre 2011
- [39] **SDRTD. 2009** : Schéma Directeur Régional des Terrains de Dépôt | Certification ISO 14001 | Voies Navigables de France | 2009
- [40] **Mémento du fluvial. 2012** : CAP sur le fluvial | Voies Navigables de France (VNF) | 2012

- [41] **BRGM/ RP-57332. 2009** : Élaboration d'un protocole de classification des sédiments marins, fluviaux et lacustres en vue de leur gestion à terre | 2009
- [42] **D. Baize et S. Janiec. 1994** : Les éléments traces métalliques dans les sols | Éditions INRA., 1-52 pp | 1994
- [43] **M. Lallée. 2009** : Étude bibliographique de la contamination des milieux lacustres par les micropolluants (PCB, HAP) - Application au lac d'Annecy | Septembre 2009
- [44] **OMS. 1980** : Les micropolluants dans les sédiments fluviaux | Organisation Mondiale de la Santé (OMS) | Août 1980
- [45] **J. L'HER, P. Rochette et J. Leroy. 2006** : Gestion des sédiments dragués dans les ports et voies navigables | Colloque hydroéco 2006 | CETMEF (Centre d'Études Techniques Maritimes et Fluviales)
- [46] **GTR. 1992** : Guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme | fascicule II, LCPC | 1992
- [47] **Materials Testing. 2001**: Headquarters Department of the Army | Washington, DC | 1 July 2001.
- [48] **R.D. Holtz et W.D. Kovacs. 1991** : Introduction à la géotechnique | Éditions de l'École Polytechnique de Montréal. ISBN 2-553-00222-3, 808p. | 1991.
- [49] **Eau France. 2010** : Les efforts de surveillance de la qualité des cours d'eau | Service public d'information sur l'eau | Eau France | Juin 2010
- [50] **J. Méhu. 1998** : Évaluation de la dangerosité des déchets industriels | Polden RE.CO.R.D | Décembre 1996/ Octobre 1998
- [51] **J. Méhu, C. Bazin et L. Grelier-Volatier. 2004** : Classification réglementaire et éco-compatibilité des déchets | Division POLDEN (Pollution, Déchets et Environnement). | 10 pages | Techniques de l'ingénieur | 2004
- [52] **J. Rodier, B. Legube, N. Merlet et R. Brunet. 2009** : L'analyse de l'eau - 9ème édition - Eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer | Analyse de l'eau, 9ème édition | Paris, Dunod. 1600 p. Juin 2009
- [53] **C. Boillot. 2008** : Évaluation des risques écotoxicologiques liées aux rejets d'effluents hospitaliers dans les milieux aquatiques. Contribution à l'amélioration de la phase « caractérisation des effets » | Thèse de doctorat | INSA Lyon | Avril 2008
- [54] **Garde du littoral. 2005** : Revue d'information des gardes du littoral, employés des structures et des collectivités gestionnaires des sites du Conservatoire du littoral n° 56 | Octobre 2005
- [55] **Ifremer 2012** : La Directive Cadre sur l'Eau dans les eaux côtières et de transition | Ifremer Environnement | Juillet 2012

- [56] **N. Sebaibi. 2010** : Valorisation des composites thermodurcissables issus du recyclage dans une matrice cimentaire : Application aux bétons a ultra-haute performance | Thèse de doctorat | Mines Douai | Février 2010
- [57] **R. Collet. 2010** : Critères de malaxabilité des mélanges granulaires humides | Thèse de doctorat | Université de Toulouse | Janvier 2010
- [58] **Grosbellet. 2008** : Évolution et effets sur la structuration du sol de la matière organique apportée en grande quantité | Thèse de doctorat | Université d'Angers | p 173 | Mai 2008.
- [59] **Critt. 2007** : Centre de ressource technologique CRITT- Matériaux Alsace | 2007
- [60] **H. Saidi, M. Brahim et M. Gueddari. 2004** : Caractérisation granulométrique et minéralogique des sédiments de surface de la frange littorale Sidi Bou Saïd - La Goulette | 2004
- [61] **SETRA. 2010** : Guide méthodologique, Acceptabilité de matériaux alternatifs en technique routière, Évaluation environnementale | SETRA | Version définitive | Novembre 2010
- [62] **A. Nédélec. 2003**: Rapport d'études: merlons, écrans et paysage routier. | Centre d'Etudes Techniques de l'Ouest Division Infrastructures et Environnement – Groupe Environnement | Setra | 2003.
- [63] **W. Maherzi. 2013**: Valorisation des Sédiments de dragage marins bruts et/ou traités aux liants hydrauliques pour une application en technique routière | ESITC Caen et l'ABTE_ Université de Caen | Mai 2013
- [64] **M. Boutouil. 1998** : Traitement des vases de dragage par solidification/stabilisation à base de ciments et additifs |Thèse Université du Havre | 278 p | 2003.
- [65] **Science et techniques. 2004** : Hydrocyl, structure réservoir innovante en béton | Journal Routes N°90 | Décembre 2004
- [66] **L. Kalai, M. J. Rouis et T. Mnif. 2014** : Piégeage des métaux lourds dans le mortier à court terme | MATEC Web of Conferences 11, 03017 | 2014
- [67] **H. Bottcher and G.H. Rembold. 1977**: Optimization model for a regional system of solid-waste and wastewater disposal which considers legal pollution standards | Environment and Planning, vol 9, pp 771-786 | 1977.
- [68] **P. Das and Y.Y. Haines. 1979**: Multiobjective optimization in water quality and land management | Water Resources Research, vol 15, no. 6 | pp 1313-1322 | 1979.
- [69] **J.M. Bloemhof-Ruwaard, P. Van Beck, L. Hordijk, and L.N. Van Wassenhove. 1995**: Interactions between operational research and environmental management | European Journal of Operational Research, vol 85, pp 229–243 | 1995.

- [70] **K.J. Kim, D.H. Kim, J.C. Yoo and K. Baek. 2011:** Electrokinetic extraction of heavy metals from dredged marine sediment | Separation and Purification Technology, vol 79, pp 164–169 | 2011.
- [71] **R. Zentar, V. Dubois et N.E. Abriak. 2008:** Mechanical behavior and environmental impacts of a test road built with marine dredged sediments. Resources | Conservation and Recycling, 52: 947–954 | 2008.
- [72] **H. Tremblay, S. Leroueil et J. Locat. 2002:** Influence of the nature of organic matter on the soil stabilization with cement | Canadian Geotechnical Journal, 39: 535-546 | 2002.
- [73] **H.Satone, T. Mamiya, A. Harunari, T. Mori et T. Tsubaki T. 2008:** Solidification Mechanism of the Sediment Formed by Particle Settling — Analysis of the Final State of the Sediment. | Original Research Article Advanced Powder Technology, 19(3): 293-306 | 2008.
- [74] **C. Tribout. 2010:** Valorisation de sédiments traités en techniques routières : contribution à la mise en place d'un protocole d'acceptabilité | Thèse de doctorat | Université de Toulouse | Novembre 2010
- [75] **C Lors, C. Tiffreau et A. Laboudigue. 2004:** Effects of bacterial activities on the release of heavy metals from contaminated dredged sediments | Chemosphere, 56: 619–630 | 2004.
- [76] **M. Mustin. 1987 :** Le compost Gestion de la matière organique. | Éditions François Dubusc. Paris, France. | 954 p | 1987
- [77] **S. Brakni, N. Abriak and A. Hequette. 2009:** Formulation of artificial aggregates form dredged harbor sediments for coastline stabilization. | Environment Technology, vol 30, no. 8, pp 849-854 | 2009.
- [78] **R. Zentar, V. Dubois and N. Abriak. 2008:** Mechanical behavior and environmental impacts of a test road built with marine dredged sediments | Resources, Conservation and Recycling, vol 52, pp 947–954 | 2008.
- [79] **De Larrard, F. 2000 :** Structure granulaires et formulation des bétons | Laboratoire Central des Ponts et Chaussée (LCPC), 415 pages | 2000
- [80] **F. De Larrard F et T. Sedran. 1994:** Optimization of Ultra-High Performance Concrete by Using a Packing Model | Cement and Concrete Research. | Volume 24, Issue 6, pp 997–1009 | 1994
- [81] **Bournonville. B, Nzihou. A, Sharrock. P, Depelsenaire G. 2004:** Stabilisation of heavy metal containing dusts by reaction with phosphoric acid: study of the reactivity of fly ash | Journal of Hazardous Materials B116 pp 65–74 | 2004
- [82] **F. De Larrard. 1999 :** Concrete mixture-proportioning – A scientific approach | Modern concrete technology series, N° 9, E & FN SPON, Londres | 1999

- [83] **T. Sedran et F. De Larrard. 1994:** RENÉ-LCPC - Un logiciel pour optimiser la granularité des matériaux de génie civil | Note technique, Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, N°194 | Novembre Décembre, 1994.
- [84] **Marchand et al. 2004 :** Les contaminants chimiques dans la Directive Cadre sur l'Eau | Département Polluants Chimiques, Centre Ifremer de Nantes | Septembre 2004
- [85] **P. Van Beck, L. Fortuin and L.N. Van Wassenhove. 1992:** Operational Research and the Environment. | Environmental and Resource Economics, vol 2, pp 635-639 | 1992.
- [86] **A. Jones-Lee and G.F. Lee. 2005:** Water Quality Aspects of Dredged Sediment Management, Water Encyclopedia: Water Quality and Resource Development | Wiley, Hoboken, NJ, pp 122-127 | 2005.
- [87] **V. Dubois, N. Abriak, R. Zentar and G. Ballivy. 2009:** The use of marine sediments as a pavement base material | Waste Management, vol 29, pp 774-782 | 2009.
- [88] **D. Levacher and M. Sanchez. 2011:** Characterization of marine sediments for a reuse inland disposal land embankment | European Journal of Environmental and Civil Engineering, vol 15, pp 167-178 | 2011.

Normes utilisées :

- [1] **NF EN ISO 6341** : Qualité de l'eau - Détermination de l'inhibition de la mobilité de *Daphnia magna* Straus (Cladocera, Crustacea) - Essai de toxicité aiguë | Décembre 2012
- [2] **NF EN ISO 11348-3** : Qualité de l'eau - Détermination de l'effet inhibiteur d'échantillons d'eau sur la luminescence de *Vibrio fischeri* (Essai de bactéries luminescentes) - Partie 3 : méthode utilisant des bactéries lyophilisées | Février 2009
- [3] **NF ISO 13320-1** : Analyse granulométrique - Méthodes par diffraction laser - Partie 1 : principes généraux | Septembre 2000.
- [4] **NF EN 196-1** : Méthodes d'essais des ciments - Partie 1 : détermination des résistances mécaniques | Avril 2006
- [5] **NF EN 12350-2** : Essais pour béton frais - Partie 2 : essai d'affaissement | Avril 2012
- [6] **NF EN 12457-2** : Caractérisation des déchets. Lixiviation. Essai de conformité pour la lixiviation des déchets fragmentés et des boues. Partie 2 : essai en bûchée unique avec un rapport liquide - solide de 10l/kg et une granularité inférieure à 4mm (sans ou avec réduction de la granularité) | Décembre 2002.
- [7] **NF EN 12879** : Caractérisation des boues – Détermination de la perte au feu de la matière sèche | Novembre 2000
- [8] **NF EN 13286-41** : Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 41 : méthode d'essai pour la détermination de la résistance à la compression des mélanges traités aux liants hydrauliques | Septembre 2003.
- [9] **NF EN 13286-42** : Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 42 : méthode d'essai pour la détermination de la résistance à traction indirecte des mélanges traités aux liants hydrauliques | Septembre 2003.
- [10] **NF EN 13286-43** : Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 43 : méthode d'essai pour la détermination du module d'élasticité des mélanges traités aux liants hydrauliques | Septembre 2003.
- [11] **NF EN 13286-47** : Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 47 : méthode d'essai pour la détermination de l'indice portant Californien (CBR), de l'indice de portance immédiate (IPI) et du gonflement linéaire | Juillet 2012.

- [12] **NF EN 14227-1** : Mélanges traités aux liants hydrauliques : spécifications, partie 13 : sol traité au liant hydraulique routier | Décembre 2006.
- [13] **NF P 94-040** : 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 | Octobre 1993.
- [14] **NF P 94-050** : Reconnaissance et essais – Détermination de la teneur en eau pondérale des sols – Méthode par étuvage | Octobre 1991.
- [15] **NF P 94-051** : Reconnaissance et essais – Détermination des limites d’Atterberg – Limite de liquidité à la coupelle – Limite de plasticité au rouleau | Mars 1993
- [16] **NF P 94-052-1** : Reconnaissance et essais. Détermination des limites d’Atterberg – Partie 1 : limite de liquidité – Méthode du cône de pénétration | Novembre 1995
- [17] **NF P 94-054** : Sols : reconnaissance et essais - Détermination de la masse volumique des particules solides des sols - Méthode du pycnomètre à eau.
- [18] **NF P 94-068** : 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 | Novembre 1993.
- [19] **NF P 94-070** : Sols : reconnaissance et essais - Essais à l'appareil triaxial de révolution - Généralités – Définitions | Octobre 1994.
- [20] **NF P 94-074** : Sols : reconnaissance et essais - Essais à l'appareil triaxial de révolution - Appareillage - Préparation des éprouvettes - Essai (UU) non consolidé non drainé - Essai (Cu+U) consolidé non drainé avec mesure de pression interstitielle - Essai (CD) consolidé drainé. | Octobre 1994.
- [21] **NF P 94-078** : Indice CBR après immersion, indice CBR immédiat, indice portant immédiat, mesure sur échantillon compacté dans le moule CBR | Mai 1997
- [22] **NF P 94-093** : Détermination des caractéristiques de compactage d’un sol : essai Proctor normal, essai Proctor modifié | Décembre 1993
- [23] **NF P 94-100** : Sols : reconnaissance et essais - Matériaux traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques - Essai d'évaluation de l'aptitude d'un sol au traitement. | Aout 1999.
- [24] **NF P 98-114-3** : « 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 | Avril 2001.

- [25] **NF P 98 230-3** : Essais relatifs aux chaussées - Préparation des matériaux traités aux liants hydrauliques ou non traités - Partie 3 : fabrication en laboratoire de mélange de graves ou de sables pour la confection d'éprouvettes | Décembre 1993
- [26] **NF ISO 10390** : Qualité du sol - Détermination du pH | Mai 2005.
- [27] **XP P 94-047** : Sols : Reconnaissance et Essais – Détermination de la teneur pondérale en matière organique – Méthode par calcination | Décembre 1998
- [28] **XP P 94-090-1** : Sols : reconnaissance et essais - Essai œdométrique - Partie 1 : essai de compressibilité sur matériaux fins quasi saturés avec chargement par paliers. | Décembre 1997
- [29] **XP CEN ISO/TS 17892-10** : Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols - Partie 10 : essai de cisaillement direct | Aout 2005.
- [30] **XP X 31-211** : Déchets. Essais de lixiviation d'un déchet solide initialement massif ou généré par un procédé de solidification | Avril 2000.
- [31] **CEN/TS 14405** : Caractérisation des déchets – Essai de comportement à la lixiviation – Essai de percolation à écoulement ascendant | Juillet 2005.

Références netographiques :

PRISMA : <http://www.prisma-projects.eu/>

GPMD: <http://www.dunkerque-port.fr/>

SMOCS: <http://smocs.eu/>

DREDGDIKES: <http://www.dredgdikes.eu/en>

SEDIMATERIAUX: <http://www.sedilab.com/>

LMCU : <http://www.lillemetropole.fr/home.html>

CETMEF : <http://www.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/>

Les Moucheurs Endiablés : <http://www.moucheursendiabls.com>

COMMUNICATIONS ET PUBLICATIONS PERSONNELLES

Articles dans revues avec comité de lecture :

I. KHEZAMI, M.BENZERZOUR, R. MANSI, N. ABRIAK, Management of sediment's treatments through a new mathematical model. (**Soumis**).

Conférences internationales avec comité de lecture:

KHEZAMI Issameddine, BENZERZOUR Mahfoud, ABRIAK Nor-Edine, Valorization of dredged sediments on a subgrade layer: performing of an experimental plate. The 4th International Symposium on Sediment Management (I2SM). Ferrara, Italy, September 17-18-19, 2014.

KHEZAMI Issameddine, ABRIAK Nor-Edine, BENZERZOUR Mahfoud, ACHOUR Raouf, Characterization and valorization of river sediments in the landscaped mounds, Third International Conference on Geotechnical Engineering ICGE13, Hammamet (Tunisia) , 21 au 23 février 2013.

KHEZAMI Issameddine, ABRIAK Nor-Edine, BENZERZOUR Mahfoud, ACHOUR Raouf, Valorisation des sédiments fluviaux en génie civil : Application : Butte paysagère – Béton – Route. 11^{ème} Symposium international Environnement, Catalyse et Génie des procédés (Environment, Catalysis and Process Engineering) ECGP'11. Villeneuve d'Ascq, France, 26-28 Juin, 2013.

ACHOUR Raouf, ZENTAR Rachid, ABRIAK Nor-Edine, RIVARD Patrice, KHEZAMI Issameddine, BENZERZOUR Mahfoud, Valorisation des sédiments marins en couche de fondation, 11^{ème} Symposium international Environnement, Catalyse et Génie des procédés (Environment, Catalysis and Process Engineering) ECGP'11, Villeneuve d'Ascq, France, 26-28 Juin, 2013.

ACHOUR Raouf, ABRIAK Nor-Edine, ZENTAR Rachid, RIVARD Patrice, KHEZAMI Issameddine, Méthodologie de caractérisation et de valorisation des sédiments marins en génie civil, Third International Conference on Geotechnical Engineering, Hammamet (Tunisie), 21 au 23 février 2013.