

N° D'ORDRE :

ECOLE DES MINES DE DOUAI



UNIVERSITE LILLE 1



THESE

présentée en vue
d'obtenir le grade de

DOCTEUR

en

Spécialité : Génie Civil

par

Dongxing WANG

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

Titre de la thèse :
Solidification et Valorisation de Sédiments du Port de Dunkerque en Travaux
Routiers

Soutenu: le 12 Décembre 2011 devant le jury d'examen :

Président	<i>Denis DAMIDOT, Professeur, ENSM de Douai</i>
Rapporteur	<i>Ange NZIHOU, Professeur, Ecole des Mines d'Albi</i>
Rapporteur	<i>Daniel LEVACHER, Professeur, Université de Caen</i>
Membre	<i>Salima AGGOUN, Maître de conférences-HDR, Université de Cergy-Pontoise</i>
Membre	<i>Rachid ZENTAR, Enseignant-chercheur, ENSM de Douai</i>
Directeur de thèse	<i>Nor Edine ABRIAK, Professeur, ENSM de Douai</i>

Laboratoire d'accueil : Département Génie Civil et Environnemental de
l'Ecole des Mines de Douai

Ecole Doctorale SPI 072 (Lille I)

Remerciements

Mes remerciements s'adressent, tout d'abord, à CHINA SCHOLARSHIP COUNCIL (CSC), qui finance mes études doctorales en France.

Je tiens à remercier sincèrement Monsieur Nor Edine ABRIAK, Professeur à l'Ecole des Mines de DOUAI et directeur de ma thèse de doctorat, pour ses conseils, la confiance qu'il m'a témoignés.

Je souhaite remercier et exprimer ma profonde gratitude à Monsieur Weiya XU, Professeur à l'Université de HoHai et co-directeur de ma thèse de doctorat. Il m'a donné une occasion la plus importante dans ma vie pour étudier à l'étranger.

Je suis très reconnaissant à Monsieur Rachid Zentar, Enseignant-chercheur à l'Ecole des Mines de DOUAI, pour m'avoir encadré, guidé, conseillé tout au long de ce travail ainsi que pour ces ses corrections de cette thèse.

Je remercie aussi Monsieur Denis DAMIDOT, Professeur et Chef du Département Génie Civil, pour m'avoir accueilli dans son laboratoire.

Ma reconnaissance s'adresse à M. LEVACHER Daniel, Professeur de l'Université de Caen et M. NZIHOU Ange, Professeur de l'Ecole des Mines d'Albi pour avoir accepté d'être rapporteurs de cette thèse. Je souhaite également remercier Mme. AGGOUN Salima, Maître de conférences-HDR de l'Université de Cergy-Pontoise, pour avoir fait l'honneur d'examiner mon travail.

Ce travail n'aurait pas été possible sans l'aide de mes chers collègues: Mohamed MIRAOU, Nathalie GINEYS, Caroline VANSIMAEYS, Nassim SEBAIBI, Idriss MOUNDOUNGOU, LE Ngoc Hung, Abdeljalil ZRI, Erwan SIMON, Fanfei ZENG, Zengfeng ZHAO, Yanyun LU, Dulin CHEN, Yongdong Men, et de techniciens au laboratoire: Christophe CAPPELAERE, Guillaume POTIER, Michael D'HELFT, Dominique DUBOIS, Damien BETRANCOURT.

Finalement, j'adresse aussi tous mes ami(e)s pour pour les bons moments et l'ambiance agréable que nous avons partagés.

Surtout, je remercie ma femme et ma famille pour leur amour, leur aide, leur soutien et leur encouragement qu'elles m'ont apporté depuis mon arrivée en France.

Résumé

Chaque année, environ 50 millions de m³ des sédiments sont dragués des ports et des cours d'eau en France. La gestion d'une tellement grande quantité des sédiments est donc très intéressante. La solution traditionnelle comme le dépôt en terre et l'immersion en mer pour les sédiments devient de plus en plus réglementée, ce qui amène les gestionnaires à trouver de nouvelles solutions de gestion. L'utilisation des sédiments dans le domaine de construction peut non seulement résoudre les problèmes relatifs aux sédiments, mais également constituer une nouvelle source de matériaux. En France, au moins 350 millions tonnes de matériaux sont consommés chaque année dans le domaine du Génie Civil. La valorisation des sédiments comme matériaux de construction est faisable.

Les travaux dans le cadre de cette étude portent sur la proposition d'une solution pour l'utilisation des sédiments marins en couche d'assise de chaussée à travers le respect d'une méthodologie générale de valorisation. Après une identification des caractéristiques physiques, chimiques, minéralogiques et environnementales, le potentiel d'utilisation des sédiments bruts en technique routière est évalué. Pour améliorer les propriétés mécaniques des sédiments, le ciment, la chaux et les cendres volantes sont employées dans cette étude.

La valorisation des sédiments marins par le ciment et la chaux dans le domaine routier est évaluée en point de vue de la portance immédiat et de la performance mécanique. L'effet du ciment et de la chaux sur le compactage, la résistance, le gonflement, la durabilité et le changement des phases minérales est étudié en fonction de la quantité de ciment et de chaux. Cela nous permet de mieux connaître les propriétés des formulations élaborées basées sur le ciment et la chaux.

Les cendres volantes peuvent être utilisées pour la valorisation des sédiments à cause de sa propriété pouzzolanique en présence du ciment ou de la chaux. Pour les sédiments traités au ciment ou à la chaux, l'ajout des cendres volantes induit certainement le changement des propriétés mécaniques et chimiques, qui sont évaluées par les essais de compaction, les essais de l'indice portant immédiat, les essais en compression et en traction, les essais du cycle au gel-dégel, les essais de l'immersion à l'eau et les essais DRX et ATD/ATG. Le potentiel des formulations élaborées est évalué pour une utilisation en technique routière.

Enfin, l'étude mécanique complémentaire sur les sédiments bruts et les sédiments traités à la chaux est présentée. Les performances mécaniques plus approfondies des sédiments sont prises en compte à l'aide de l'essai de compressibilité, de l'essai de cisaillement direct CU et de l'essai triaxial CU. L'effet de la chaux sur les performances mécaniques est étudié par rapport aux sédiments bruts.

Mot clés: Sédiments marins, couche d'assise, compactage, portance, résistance, gonflement, durabilité, DRX, ATD/ATG

Abstract

Nearly 50 millions m³ of sediments are dredged each year from rivers and ports in France. Therefore the management of so much sediment is an interesting issue. The traditional solution such as land deposit and ocean dumping to manage dredged sediments is increasingly restricted due to more stringent environmental regulations. However, with the increase of environmental awareness and the progress of national and international regulation, harbours managers focus on developing alternative solutions for the traditional practice. The use of sediments in the field of construction can not only solve problems related to sediments, but also provide a new source of construction materials. In France, at least 350 million tons of materials are consumed each year in the field of Civil Engineering. So the valorization of sediments as building materials is feasible.

The work in this study focuses on a proposed solution for use of marine sediment in roadbed layer by the respect of a general methodology. After identifying the physical, chemical, mineralogical and environmental characteristics, the potential of raw sediments directly used in roadbed is assessed. To improve the mechanical properties of sediment, cement, lime and fly ash are used in this study.

The evaluation of marine sediments by cement and lime in roadbed is assessed in terms of bearing capacity and mechanical performance. The effect of cement and lime on soil compaction, strength, swelling, durability and le change in mineral phases is studied with the change in cement and lime amount.

Fly ash can be used for the valorization of sediments because of its pozzolanic property in the presence of cement or lime. For sediments treated with lime or cement, the addition of fly ash induces certainly the change in mechanical and chemical properties, which are evaluated by the compaction tests, the bearing capacity tests, the compressive and tensile strength tests, the freezing-thawing cycle tests, the immersion in water tests and the XRD and DTA/TGA tests. The potential of the developed formulations was evaluated for use in road engineering.

Finally, the supplementary mechanical study on raw sediments and sediments treated with lime is presented. The mechanical performance of sediments is furthermore taken into account using the compressibility tests, direct shear CU tests and triaxial CU tests. The effect of lime on the mechanical performance is studied in comparison with raw sediments.

Key words: Marine sediments, foundation layer, compaction, bearing capacity, strength, swelling, durability, XRD, DTA/TGA

Sommaire

REMERCIEMENT	1
Résumé	1
Abstract	1
Sommaire	i
Liste des Figures.....	v
Liste des Tableaux.....	ix
Introduction générale.....	1
Chapitre 1 ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.....	3
1.1 Les déchets.....	3
1.1.1 Définition.....	3
1.1.2 Classification des déchets.....	4
1.1.3 Gestion des déchets	4
1.2 Notion sur les sédiments.....	5
1.2.1 Définition.....	5
1.2.2 Origine.....	5
1.2.3 Composition des sédiments	5
1.2.4 Granulométrie des sédiments	7
1.3 Polluants potentiels.....	8
1.3.1 Les polluants organiques	8
1.3.2 Les métaux lourds	10
1.3.3 Les éléments nutritifs	11
1.4 Problématique des matériaux de dragage.....	11
1.4.1 Technologie du dragage	11
1.4.2 Quantité des matériaux dragués.....	12
1.5 La gestion des sédiments	14
1.5.1 Législations et réglementations	14
1.5.2 Sédiments considérés comme les déchets	19
1.5.3 Les devenirs des sédiments	19
1.6 Notion sur les cendres volantes	22
1.6.1 Définition.....	22
1.6.2 Origine.....	22
1.6.3 Composition	23
1.6.4 Production des cendres volantes.....	24
1.6.5 Emploi des cendres volantes	25
1.6.6 Classification	27

1.6.7 Utilisation des cendres volantes dans le domaine géotechnique en Chine	27
1.7 Interaction entre sédiments et liants	29
1.7.1 Liants	29
1.7.2 Réaction sédiment/ciment	30
1.7.3 Réaction sédiment/chaux	32
1.8 Modification des propriétés après traitement	33
1.8.1 Limites d'Atterberg	33
1.8.2 Compactage	35
1.8.3 Résistances à la compression et à la traction	36
1.8.4 Cisaillement	36
1.8.5 Compressibilité	37
1.8.6 Perméabilité	37
1.8.7 Gonflement	38
1.9 Effet des éléments néfastes	39
1.9.1 Effet des matières organiques	39
1.9.2 Présence des métaux	39
1.10 Critères de recyclage dans les travaux routiers	41
1.11 Généralités concernant le traitement des sédiments en Chine	43
1.12 Conclusion	46
Chapitre 2 Caractérisation des matériaux valorisés	47
Partie 1 : Sédiments marins	47
2.1 Echantillonnage	47
2.2 Caractérisation géotechnique	48
2.2.1 Teneur en eau naturelle	49
2.2.2 Granulométrie	50
2.2.3 Masse volumique absolue et apparente	55
2.2.4 Valeur au bleu de méthylène	58
2.2.5 Etats de consistance - Limites d'Atterberg	59
2.2.6 Teneur en matière organique et perte au feu	63
2.2.7 Classification des sédiments	64
2.3 Caractérisation minéralogique	65
2.3.1 Fluorescence des rayons X (FRX)	65
2.3.2 Diffraction de rayons X (DRX)	67
2.4 Comportement à la lixiviation	68
Partie 2 : Cendres volantes	72
2.5 Caractérisation des cendres volantes	72
2.5.1 Introduction	72
2.5.2 Granulométrie	72
2.5.3 Analyse minéralogique	73

2.5.4 Perte au feu.....	74
2.5.5 Masse volumique absolue.....	75
2.5.6 Évolution du pH des mélanges sédiment-cendre volante.....	76
2.5.7 Classification.....	77
2.5.8 Comportement à la lixiviation.....	77
Partie 3 : Chaux.....	78
2.6 Caractérisation de la chaux.....	78
2.6.1 Composition.....	78
2.6.2 Granulométrie.....	78
2.6.3 Transformation de la chaux.....	79
2.6.4 Evolution du pH des mélanges sédiment-chaux.....	80
Partie 4 : Ciment.....	81
2.7 Caractérisation du ciment.....	81
2.7.1 Composition.....	81
2.7.2 Granulométrie.....	81
2.7.3 Evolution du pH des mélanges sédiment-ciment.....	82
2.8 Conclusion.....	82
Chapitre 3 Traitement des sédiments par S/S à base de ciment/chaux.....	85
3.1 Déshydratation.....	85
3.2 Comportements mécaniques des matériaux formulés.....	86
3.2.1 Caractéristiques de compactage.....	86
3.2.2 Performances mécaniques à court terme et à long terme.....	90
3.3 Durabilité des matériaux formulés.....	95
3.3.1 Propriété de gonflement.....	95
3.3.1.1 Principe.....	95
3.3.1.2 Gonflement et IPI après immersion.....	96
3.3.2 Essai de résistance au gel - dégel.....	97
3.3.3 Essai d'immersion à l'eau pendant 32 jours.....	99
3.4 Propriétés pouzzolaniques.....	100
3.4.1 ATD/ATG.....	100
3.4.2 DRX.....	102
3.5 Conclusion.....	103
Chapitre 4 Traitement des sédiments marins avec chaux+cendres volantes et ciment+cendres volantes.....	105
4.1 Activation alcaline.....	105
4.2 Propriétés de compactage.....	106
4.2.1 Formulation.....	106
4.2.2 Compactage - IPI.....	106
4.3 Propriétés mécaniques à court et à long terme.....	108

4.3.1 Performance mécanique	108
4.3.2 Evaluation du potentiel en assise de chaussée	110
4.4 Etude environnementale sur les matériaux formulés	111
4.5 Evaluation de la durabilité	113
4.5.1 Propriété de gonflement	113
4.5.2 Essai de résistance au gel - dégel	115
4.5.3 Essai d'immersion à l'eau pendant 32 jours	115
4.6 Analyse micro-structurale	116
4.6.1 ATG/ATG	116
4.6.2 DRX	118
4.7 Conclusion	119
Chapitre 5 Etude supplémentaire des comportements mécaniques des sédiments bruts et traités à la chaux	121
5.1 Préparation des échantillons par préconsolidation	121
5.1.1 Choix des appareils	121
5.1.2 Paramètres déterminés et procédures utilisées	122
5.1.3 Analyse de préconsolidation	123
5.2 Etude de l'homogénéité des échantillons	125
5.3 Etude du comportement de cisaillement	127
5.3.1 Description de l'essai	127
5.3.2 Résultats	128
5.4 Comportement à l'essai œdométrique	129
5.4.1 Description de l'essai	129
5.4.2 Résultats	131
5.5 Comportement à l'essai triaxial	133
5.5.1 Description de l'essai	133
5.5.2 Résultats	134
5.6 Conclusion	138
Chapitre 6 Conclusions générales et perspectives	141
6.2.1 Conclusions	141
6.2.2 Perspectives	143
Références	145
Publications et Communications	155

Liste des Figures

Figure 1.2.1 : Diagramme triangulaire utilisé pour la classification des sols fins (Bonnet, 2000)..	7
Figure 1.3.1: Schéma de la classification et de la provenance des polluants	8
Figure 1.3.2: Mécanismes généraux de transport et de transformation des polluants organiques dans les sols (Fantozzi-Merle, 2003).....	9
Figure 1.4.1: Les techniques de dragage	12
Figure 1.4.2: Quantité de matériau de dragage immergés dans la mer dans les pays européens (Valeur exprimée en millions de tonnes de matériau sec) (OSPAR, 2003, 2004, 2005, 2007)	13
Figure 1.4.3: Quantité de matériaux dragués (entretien et travaux neufs) dans les ports Autonomes et d'intérêt national français métropolitains (valeur exprimée en milliers de tonnes de matériau sec) (Foucher, 2005).....	14
Figure 1.5.1: Devenirs des sédiments.....	19
Figure 1.5.2: Stockage ou dépôt du sédiment.....	20
Figure 1.6.1: Principe de production des cendres volantes	23
Figure 1.6.2: Cendres volantes dans le diagramme ternaire $\text{SiO}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$ de Keil-Rankin (Minoux, 1994).....	24
Figure 1.6.3: Emploi des cendres volantes	25
Figure 1.6.4: Répartition des cendres volantes en génie civil en Europe en 2002 (Ayrinhac, 2005)	26
Figure 1.6.5: Cendres volantes utilisées en couches de forme (Zhang et al., 2001).....	28
Figure 1.7.1: Modèle de colloïde d'hydratation du ciment	30
Figure 1.7.2: Modèle de cristal d'hydratation du ciment	31
Figure 1.7.3: Schéma d'échange cationique.....	32
Figure 1.7.4: Diagramme de la réaction pouzzolanique.....	33
Figure 1.8.1: Effet du traitement à la chaux sur la consistance des sols (Dupraz et Zohry).....	34
Figure 1.8.2: Modification des limites d'Atterberg (GTS, 2000).....	34
Figure 1.8.3: Relation entre la teneur en eau et la masse volumique sèche, sensibilité à la compacité.....	35
Figure 1.8.4: Modification de la courbe de compacité	36
Figure 1.9.1: Les interactions possibles entre les contaminants et les particules de ciment (Yousuf et al, 1995).....	40
Figure 1.9.2: Mécanisme de l'empoisonnement généralisé de l'hydratation (Malviya et Chaudhary, 2006 (Source: Hills et Pollard, 1997)).....	41
Figure 1.10.1: Critère de l'IPI pour les différentes couches de la chaussée.....	42
Figure 1.10.2: Classification des matériaux traités aux liants hydrauliques (NF P 98-113, 1994).....	42

Liste des Figures

Figure 2.1.1: Port de Dunkerque et site du prélèvement de sédiments marins.....	48
Figure 2.1.2: Le zonage du Port est de Dunkerque (PREDIS).....	48
Figure 2.2.1: Évolution de la teneur en eau des sédiments marins en fonction du temps	50
Figure 2.2.2 : Répartitions granulométriques des sédiments.....	52
Figure 2.2.3 : Distributions granulométriques cumulées des sédiments	53
Figure 2.2.4 : Classification des sédiments marins dans la classification triangulaire des sols fins (Bonnet, 2000).....	55
Figure 2.2.5: L'évolution de la masse volumique des sédiments bruts et des sédiments calcinés	56
Figure 2.2.6: Évolution de la masse volumique des sédiments bruts et des sédiments calcinés ...	57
Figure 2.2.7: Classification des sols en fonction de VBS (GTR, 1992).....	59
Figure 2.2.8: Etats de consistance d'un sol	59
Figure 2.2.9: Détermination de la limite de liquidité	60
Figure 2.2.10: Classification des sédiments selon l'abaque de plasticité de Casagrande.....	61
Figure 2.2.11: Relations entre la teneur en eau et la pénétration du cône	62
Figure 2.3.1: Analyse thermogravimétrique (ATG) en fonction de la température des sédiments	66
Figure 2.3.2: Phases cristallines des sédiments étudiés.....	68
Figure 2.5.1. Granulométrie des cendres volantes de SILICOLINE®SECHE	73
Figure 2.5.2. Principaux minéraux des cendres volantes de SILICOLINE®SECHE	73
Figure 2.5.3: Variation des masses volumiques des cendres volantes	76
Figure 2.5.4: Evolution du pH en fonction de la teneur en cendre volante	76
Figure 2.6.1: Granulométrie de la chaux	79
Figure 2.6.2: Processus de transformation	79
Figure 2.6.3 : Evolution du pH en fonction du dosage de chaux	80
Figure 2.7.1: Granulométrie du ciment	81
Figure 2.7.2: Evolution du pH en fonction du dosage de ciment	82
Figure 3.1.1: Processus de déshydratation des sédiments	85
Figure 3.1.2: Schéma de déshydratation des sédiments marins	86
Figure 3.2.1: Protocole de compactage	87
Figure 3.2.2: Courbes de compactage des sédiments traités à la chaux	88
Figure 3.2.3: Courbes de compactage des sédiments traités au ciment.....	88
Figure 3.2.4: Variation de ω_{opt} et ρ_{opt} en fonction de la teneur en liant	89
Figure 3.2.5: Variation de l'IPI en fonction de la teneur en liant.....	90
Figure 3.2.6: Evolution des résistances en compression des matériaux élaborés.....	91
Figure 3.2.7: Principe de l'essai de traction brésilien.....	92
Figure 3.2.8. Résistance en traction en fonction du temps et de la quantité du liant.....	93
Figure 3.2.9. Module élastique en fonction du temps et de la quantité du liant.....	94
Figure 3.2.10: Positionnement des matériaux élaborés à 360 jours dans l'abaque de classement	95
Figure 3.3.1: Gonflement vertical en fonction du temps et de la teneur en liant.....	96
Figure 3.4.1: Analyses thermiques des sédiments traités à la chaux	101

Liste des Figures

Figure 3.4.2: Analyses thermiques des sédiments traités au ciment	101
Figure 3.4.3: DRX des sédiments traités à la chaux	102
Figure 3.4.4: DRX des sédiments traités au ciment	103
Figure 4.1.1: Mécanisme de réaction entre liants et matériaux pozzolaniques	106
Figure 4.2.1: Courbes de compactage - IPI des sédiments mélangés avec chaux-cendres volantes	107
Figure 4.2.2: Courbes de compactage - IPI des sédiments mélangés avec ciment-cendres volantes	107
Figure 4.3.1: Résistance en compression des matériaux formulés	109
Figure 4.3.2: Résistance en traction des matériaux formulés	109
Figure 4.3.3: Modules d'élasticité des matériaux formulés.....	110
Figure 4.3.4: Classification des sédiments traités à la chaux et au ciment avec des cendres volantes.....	111
Figure 4.5.1: Développement du gonflement des matériaux traités	114
Figure 4.6.1: Analyses thermiques des sédiments traités à la chaux et aux cendres volantes	117
Figure 4.6.2: Analyses thermiques des sédiments traités au ciment et aux cendres volantes	117
Figure 4.6.3: DRX des sédiments traités à la chaux et aux cendres volantes.....	118
Figure 4.6.4: DRX des sédiments traités au ciment et aux cendres volantes	119
Figure 5.1.1: Deux types de moules utilisés.....	121
Figure 5.1.2: Evolution de l'indice des vides en fonction de la charge pour les échantillons placés en cellules oedométriques.....	124
Figure 5.1.3: Evolution de l'indice des vides en fonction de la charge pour les échantillons placés en consolidomètres	124
Figure 5.2.1: Coupe de l'échantillon consolidé en cellule oedométrique.....	126
Figure 5.2.2: Evolution de la teneur en eau en fonction de la hauteur d'un échantillon	127
Figure 5.3.1: Les appareils utilisés pour l'essai de cisaillement direct	127
Figure 5.3.2: Essais de cisaillement rectiligne pour les sédiments bruts.....	128
Figure 5.3.3: Essais de cisaillement rectiligne pour les sédiments traités à 3% chaux	129
Figure 5.4.1: Courbes de compression unidimensionnelle.....	132
Figure 5.5.1: Presse triaxiale et vérins hydrauliques au laboratoire.....	133
Figure 5.5.2: Relation entre le déviateur de contrainte q et la déformation axiale ϵ_a	135
Figure 5.5.3: Relation entre le déviateur de contrainte u_c et la déformation axiale ϵ_a	135
Figure 5.5.4: Chemin de contraintes effective et totale pour un essai CU+u	136
Figure 5.5.5: Relation entre la déformation axiale ϵ_a et la déformation radiale ϵ_r	136
Figure 5.5.6: Détermination des paramètres de cisaillement en contraintes effectives.....	137
Figure 5.5.7: Détermination des paramètres de cisaillement selon en contraintes totales.....	137
Figure 5.5.8: Modalités de la rupture des échantillons.....	138

Liste des Tableaux

Tableau 1.1.1: Récapitulatif des techniques de gestion des déchets	5
Tableau 1.2.1: Classification granulométrique.....	7
Tableau 1.3.1: Classification des métaux et des métalloïdes en fonction de leur toxicité et de leur disponibilité (Geffard, 2001).....	11
Tableau 1.5.1: Valeurs guides des niveaux 1 et 2 pour les métaux (en mg/kg de sédiment sec) pour différents pays signataires de la convention d'Oslo (Alzieu, 1999) et <i>GB 18668-2002</i> de la RPC (2002).....	15
Tableau 1.5.2: Valeurs guides des niveaux 1 et 2 des polluants organiques (en µg/kg de sédiment sec) pour différents pays signataires de la convention d'Oslo (Alzieu, 1999) et <i>GB 18668-2002</i> de la RPC (2002).....	16
Tableau 1.5.3: Niveaux relatifs aux éléments traces et aux composés traces (mg/kg sédiment sec sur la fraction inférieure à 2mm) (G.E.O.D.E, 1996).....	17
Tableau 1.5.4: Teneurs limites en métaux lourds dans les boues et les sols pour l'épandage.....	18
Tableau 1.5.5: Teneurs limites en composés-traces organiques dans les boues pour l'épandage.	18
Tableau 1.5.6: Valeurs limites en matières de lixiviation pour l'admission des déchets dans les décharges (Test de lixiviation sur la base d'une ratio liquide/solide de 10 l/kg).....	21
Tableau 1.6.1: Production des cendres volantes dans plusieurs pays (Alkan et al, 1995; Ayrinhac, 2005; Chandra et al, 2005; Lee et al, 2008; Karouite, 2003; Kim et Prezzi, 2008).....	25
Tableau 1.6.2: Etat du recyclage des cendres volantes (Bhattacharjee et al, 2002; Cho et al, 2005; AADA; Rapport d'enquête « <i>Le vrai coût du charbon</i> », 2011).....	26
Tableau 1.6.3: Classification des cendres volantes	27
Tableau 1.10.1: Critères de jugement de l'aptitude d'un sol traité à la chaux et/ou aux liants hydrauliques (NF P 94-100, 1999).....	43
Tableau 2.2.1: Les teneurs en eau initiales des sédiments.....	49
Tableau 2.2.2: Teneurs en eau des sédiments provenant de différents ports.....	50
Tableau 2.2.3 : Récapitulatif des fractions granulométriques des sédiments de dragage.....	53
Tableau 2.2.4: Caractéristiques granulométriques des sédiments de dragage.....	54
Tableau 2.2.5: Masses volumiques absolues des sédiments marins de Dunkerque	56
Tableau 2.2.6: Masse volumique apparente des sédiments marins de Dunkerque.....	58
Tableau 2.2.7: Les valeurs de VBS des sédiments marins	58
Tableau 2.2.8: Classification de l'argilosité d'un sol selon l'indice de plasticité I_p	59
Tableau 2.2.9: Limites d'Atterberg des sédiments de Dunkerque	60
Tableau 2.2.10: Limites d'Atterberg déterminées par la méthode au cône de pénétration	62
Tableau 2.2.11: Comparaison des limites d'Atterberg déterminées par différentes méthodes	62
Tableau 2.2.12: Teneur en matière organique et perte au feu des sédiments	63

Tableau 2.2.13: Perte au feu des SD 2009 en fonction de la température et de la durée de calcination	64
Tableau 2.2.14: Synthèse des caractéristiques physiques des sédiments étudiés	65
Tableau 2.3.1: Les éléments chimiques déterminés par fluorescence X	67
Tableau 2.4.1: Seuils des polluants dans les centres de stockage relatifs aux éluats (JOCE, 2003)	69
Tableau 2.4.2: Seuils des polluants dans les centres de stockage relatifs aux solides (JOCE, 2003)	69
Tableau 2.4.3: Études sur l'impact environnemental (sur éluat L/S=10, valeur en mg/kg)	71
Tableau 2.4.4: Résultats des dosages en polluants sur solides	71
Tableau 2.5.1: Composition chimique moyenne	72
Tableau 2.5.2: Eléments détectés semi-quantitativement par fluorescence X	74
Tableau 2.5.3: Perte au feu des cendres volantes à différentes températures	75
Tableau 2.5.4: Résultats des études sur l'impact environnemental (sur éluat L/S=10, valeur en mg/kg)	77
Tableau 2.5.5: Résultats des dosages en polluants sur solides	78
Tableau 2.7.1: Composition chimique du ciment CEM I 42.5 R HSR LA (http://www.ccb.be) ..	81
Tableau 3.3.1: Résistances d'immersion à l'eau pendant 4 jours	97
Tableau 3.3.2: Effet de gel-dégel sur la résistance des formulations élaborées	99
Tableau 3.3.3: Effet de l'immersion à l'eau sur la résistance des formulations élaborées	100
Tableau 4.2.1: Les formulations relatives aux cendres volantes	106
Tableau 4.2.2: Paramètres de compactage des formulations étudiées	108
Tableau 4.4.1: Résultats des études sur l'impact environnemental (sur éluat L/S=10, valeur en mg/kg)	112
Tableau 4.4.2: Résultats des dosages en polluants sur solides	113
Tableau 4.5.1: Valeurs d'IPI et de gonflement à l'immersion à l'eau pendant 4 jours des mélanges	114
Tableau 4.5.2: Aptitude au traitement - Résistance en traction et en compression au gel-dégel	115
Tableau 4.5.3: Aptitude au traitement - Résistance en compression à l'immersion à l'eau	116
Tableau 5.1.1: Programme de chargement	123
Tableau 5.1.2: Variations des indices des vides des sédiments bruts et traités	125
Tableau 5.2.1: Teneurs en eau de chaque fraction de l'échantillon découpé	126
Tableau 5.3.1: Paramètres déterminés à la boîte de cisaillement pour les essais de cisaillement	129
Tableau 5.4.1: Résultats des essais de compressibilité	132
Tableau 5.5.1: Les paramètres de résistance de cisaillement d'après les calculs de Mohr-Coulomb	137

Introduction générale

Chaque année, une grande quantité de sédiments sont dragués de leur environnement aquatique afin de maintenir ou d'améliorer les conditions de navigation. En France, environ 25 à 45 millions de m³ de sédiments secs sont annuellement dragués dans les ports français (Alzieu et al., 1999). En Chine, environ 400 millions de m³ de sédiments liquides sont dragués par an (Zhang et al., 2004), lorsque environ 300 millions de m³ de sédiments sont prélevés chaque année aux Etats-Unis (Amiran et al., 1999). Par conséquent, la quantité importante de sédiments prélevés est un problème qu'il serait intéressant de traiter. Les solutions traditionnelles, comme le dépôt à terre et l'immersion en mer, sans doute polluent plus ou moins l'environnement aquatique et continental. Les sédiments marins contiennent différents types de contaminants: les métaux lourds et les matières organiques. Ces contaminants d'une part, peuvent être interdits de l'immersion en mer selon le degré de contamination, d'autre part, être potentiellement problématique dans un procédé de valorisation.

Pour l'instant, la valorisation des sédiments peut intéresser plusieurs domaines tels que le génie civil, l'agriculture et la réhabilitation. Ces filières de valorisation ont pour principaux avantages de limiter les volumes de sédiments mis en dépôt et rejetés en mer. Les lois relatives à la protection de l'environnement demandent de respecter les réglementations très exigeantes. Dans le domaine du génie civil, les sédiments valorisés dans le domaine de la construction constituent une nouvelle source de matériaux. En particulier, le domaine de génie civil consomme annuellement plus de 400 millions de tonnes de matériaux granulaires dont plus de la moitié dans le domaine des travaux routiers (UNPG, 2005; Michel, 1997). L'utilisation des sédiments dragués peut donc améliorer la gestion des ressources naturelles de granulats en constituant une nouvelle source de matériaux dans le contexte d'une gestion écologique basée sur le développement durable. Sachant que les sédiments sont considérés comme des déchets, on doit s'assurer qu'à terme leur utilisation ne présente pas un risque inacceptable pour l'environnement.

En terme de valorisation des sédiments en technique routière, on peut choisir différents liants, comme le ciment, la chaux, le laitier, les cendres volantes, etc. Dans cette étude, on choisit d'utiliser le ciment, la chaux et les cendres volantes pour solidifier les sédiments. Les cendres volantes sont des fines particules solides de cendre, de poussière et de suie émises dans l'air lorsqu'un combustible est brûlé dans une centrale électrique au charbon. Non seulement elles polluent l'environnement, mais également occupent une grande quantité des terres. En Chine, la quantité des cendres volantes, en 2009, a atteint 424 millions de m³. De ce fait, la gestion des stocks de cendres volantes constitue une véritable problématique environnementale. Sur la base de sa propriété pouzzolanique, on peut utiliser les cendres volantes pour stabiliser et solidifier les sédiments en présence d'activateur.

Cette étude s'intéresse à l'élaboration d'une démarche globale pour une meilleure gestion de la valorisation des sédiments de dragage et des cendres volantes. Pour assurer une valorisation convenable des matériaux étudiés dans le domaine routier, il est donc fondamental d'améliorer leurs durabilités et leurs propriétés mécaniques et environnementales. L'étude menée dans le cadre de cette thèse, réalisée au département génie civil et environnemental de l'Ecole des Mines de Douai, comporte cinq parties:

- La problématique de gestion de sédiments de dragage et de cendres volantes a été globalement abordée. Une étude bibliographique concernant les compositions des sédiments, les polluants potentiels dans les sédiments, les réglementations en vigueur pour leur gestion et leur devenir sont exposés. Après l'analyse des interactions entre sédiments et liants, les modifications des propriétés des sédiments dues à l'ajout des liants sont étudiées. D'ailleurs, la problématique de gestion des cendres volantes est exposée dans la première partie.

- L'identification des sédiments bruts est nécessaire avant d'élaborer les formulations et d'étudier les propriétés des sédiments traités. Les caractéristiques physiques, chimiques, minéralogiques et environnementales sont présentées. Cette partie permet de mieux connaître les propriétés intrinsèques des sédiments bruts. Il apparaît que les sédiments ne peuvent pas être directement utilisés comme matériau de construction à cause d'une teneur en eau initiale importante, d'une teneur élevée en matière organique et d'une faible portance.

- La troisième partie présente les performances des sédiments traités au ciment et à la chaux, les caractéristiques de compactage et de portance, les propriétés mécaniques, le gonflement, la durabilité et le changement des phases minérales. Dans cette partie, l'accent est particulièrement mis sur l'effet du ciment et de la chaux sur les performances mécaniques et les indices portants immédiats, qui sont les plus importants pour évaluer leur potentiel d'utilisation comme matériaux routiers. L'analyse du gonflement et de la durabilité permet de mieux connaître la performance des formulations élaborées. Les résultats de DRX et ATD/ATG aident à expliquer la variation de ces performances mécaniques des sédiments traités.

- Dans la quatrième partie, les cendres volantes silico-alumineuses sont introduites grâce à leur potentiel pouzzolanique dans la solidification des sédiments lorsque le ciment et la chaux sont les activateurs. Pour les sédiments traités au ciment et à la chaux, l'ajout des cendres volantes induit certainement le changement des propriétés, qui sont évaluées par les essais de compactage, les essais de l'indice portant immédiat, les essais en compression et en traction, les essais de gel-dégel, les essais d'immersion, et l'analyse DRX et ATD/ATG. Après une comparaison concernant l'effet des cendres volantes sur les résistances des mélanges sédiment-ciment et sédiment-chaux, on peut observer des résultats inverses pour les deux mélanges.

- La dernière partie présente l'étude mécanique complémentaire sur les sédiments bruts et les sédiments traités à la chaux. A l'aide de l'essai de compressibilité, de l'essai de cisaillement à la boîte de Casagrande et de l'essai triaxial, les performances mécaniques plus approfondies des sédiments sont prises en compte dans le cadre d'une utilisation des sédiments en technique routière.

Chapitre 1 ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Le traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques est depuis longtemps utilisé dans le monde entier et principalement appliqué à la réutilisation en remblai des sols. Aujourd'hui, la technique est étendue à la réalisation de couches de forme, principalement pour les autoroutes. Cette technique est relativement mature, bien que de nombreuses questions soient encore en suspens.

Il s'agit d'une synthèse de travaux ou de données pour non seulement présenter l'origine, la composition, la gestion et les réglementations des sédiments, mais aussi les différents aspects de la stabilisation/solidification des sédiments. Celle-ci permet de connaître les effets des ajouts de liants sur les caractéristiques physiques, chimiques, mécaniques et environnementales des sédiments afin de mieux comprendre leur comportement et anticiper les problèmes rencontrés dans le processus de valorisation. La problématique de gestion des cendres volantes est décrite afin de mieux comprendre la nécessité de la réutilisation des cendres volantes. Les cendres volantes considérées comme déchets sont introduites afin de stabiliser/solidifier les sédiments et de réutiliser les cendres volantes considérées comme déchets dans le domaine routier. Enfin, on s'attardera sur les critères permettant d'évaluer l'applicabilité des sédiments de dragage et des cendres volantes dans le domaine des travaux routiers.

1.1 Les déchets

Depuis la fin du 20^e siècle, de plus en plus de pays émettent des lois à dimension nationale et internationale afin de protéger l'environnement. Ceci fournit une base juridique pour les gestionnaires. Plusieurs organismes gouvernementaux, comme l'agence de protection de l'environnement (EPA) aux États-Unis, l'agence fédérale de l'environnement allemande, l'agence de protection de l'environnement et département d'administration de l'océan (SOA) chinois, le ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer (MEEDDM) en France, le ministère du logement, de l'aménagement du territoire et de l'environnement (VROM) aux Pays-bas, s'engagent activement dans la gestion et dans la protection de l'environnement.

1.1.1 Définition

Un déchet est un résidu en fin de vie ou un produit jugé inutile, dangereux et dégoûtant destiné à l'abandon. Afin de réduire la circulation des déchets dangereux entre les pays, la convention de Bâle a été ouverte à la signature le 22 mars 1989 (en vigueur le 5 mai 1992). La définition suivante a été adoptée pour les déchets dangereux: On entend par "déchets" des substances ou objets qu'on élimine, qu'on a l'intention d'éliminer ou qu'on est tenu d'éliminer en vertu des dispositions du droit national.

Selon la «*directive 2006/12/CE du parlement européen et du conseil du 5 avril 2006*» et la «*directive 2009/48/CE du parlement européen et du conseil du 18 juin 2009*», la définition des déchets a été donnée: Toute substance ou tout objet qui relève des catégories figurant à l'annexe I des directives, dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire.

Dans le code de l'environnement français (version du 1 septembre 2009), deux définitions sont données. D'après l'«*Article L541-1*», le déchet est " tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon". Dans l'«*Article L541-3*», le déchet " est réputé abandonné tout acte tendant, sous le couvert d'une cession à titre ou onéreux, à soustraire son auteur aux prescriptions législatives et réglementaires".

La loi fédérale sur la protection de l'environnement (LPE) du 7 octobre 1983 en Suisse a stipulé que les déchets sont "les choses meubles dont le détenteur se défait ou dont l'élimination est commandée par l'intérêt public".

L'union européenne en donne une définition similaire à la convention de Bâle (*Convention de Bale sur le controle des mouvements transfrontiers de déchets dangereux et de leur élimination daoptée par la conférence de plénipotentiaires du 22 Mars 1989*). Si les définitions diffèrent, les déchets créent un même enjeu sociétal important: l'élimination des ordures.

1.1.2 Classification des déchets

Il est difficile de classer tous les déchets, mais les déchets sont généralement liquides, gazeux ou solides. Le déchet est classé et comprend un nombre de classes suivant ses différents composants, ses propriétés, son impact sur l'environnement.

Généralement, on distingue quatre types de déchets: les déchets recyclables (matériaux de construction, métaux, matières plastiques), les déchets biodégradables ou composés (résidus verts, boue d'épuration des eaux, restes alimentaires...), les déchets spéciaux, les déchets industriels dangereux et les déchets ultimes (<http://itinerairesdecitoyennete.org>).

En France, les déchets sont identifiés d'après un code à six chiffres selon *le décret N° 2002-540 du 18 avril 2002 relatif à classification des déchets* («Décret n° 2002-540»). Les premiers deux chiffres représentent la catégorie d'origine, les deux suivants le regroupement intermédiaire et les deux derniers la désignation du déchet.

En Chine, les déchets sont globalement divisés en deux parties selon la propriété du recyclage: déchets recyclables et déchets non recyclables (<http://baike.baidu.com/view/160814.htm#7>). Un classement plus fin distingue quatre types de déchets: déchets recyclables et dangereux, déchets non recyclables et dangereux, déchets banals et recyclables, déchets banals et non recyclables (Nie, 2000). D'après «*La loi de la République populaire de Chine sur la prévention et le contrôle de la pollution environnementale des déchets solides*» (Edition revue, 2005, Ministère de protection de l'environnement, RPC), les déchets solides comprennent des déchets solides industriels, les ordures ménagères urbaines et les déchets dangereux. Il est à noter que cette loi est convenable pour le contrôle et la prévention du déchet liquide excepté l'eau résiduaire déversée dans la mer, les rivières et les fleuves.

1.1.3 Gestion des déchets

Afin de réduire les effets néfastes des déchets sur l'environnement et sur la santé humaine, l'accent a été mis sur la gestion des déchets: la collecte, le transport, le traitement et l'élimination des déchets. D'habitude, la gestion des déchets consiste à les récupérer puis à les stocker. Une grande variété de techniques peut être utilisée pour stocker et gérer les déchets. Ces dernières décennies, le critère des 3R (Réduction, Réutilisation et Recyclage) devient le principe dominant de gestion des déchets. Ainsi, le déchet peut être vu comme une ressource potentielle à exploiter et à valoriser.

Depuis quelques années, de nombreux pays travaillent à la revalorisation des déchets afin de les réutiliser comme matière première dans les domaines du génie civil, de la papeterie, des plastiques. Les moyens et les techniques se diversifient et progressent de jour en jour.

A l'heure actuelle, les techniques des gestion des déchets utilisent les méthodes suivantes: décharge, incinération, compost et fermentation, traitement biologique et mécanique, pyrolyse et gazéification. La méthode de stockage des déchets la plus utilisée en Australie est la décharge, la densité de population étant faible devant la grande superficie du pays. A l'opposé au Japon, la méthode la plus répandue est l'incinération des déchets à cause de la petite taille du Japon. Au Canada,

le tri sélectif est la méthode la plus fréquemment utilisée. Les techniques utilisées dans les différents pays sont résumées dans le Tableau 1.1.1. On remarque que les approches de gestion des déchets varient en fonction du temps, du pays et des types des polluants.

Pays	Techniques de gestion des déchets
Chine	décharge, incinération, compost
France	incinération
Australie	décharge
Japon	incinération
Canada	tri sélectif
Etats-Unis	décharge, incinération, compost

Tableau 1.1.1: Récapitulatif des techniques de gestion des déchets

1.2 Notion sur les sédiments

1.2.1 Définition

Plus communément appelés vases, la formation des sédiments est liée à la sédimentation de particules élémentaires ou agglomérées, qui sont le plus souvent transportées par les cours d'eau entraînées par le vent ou par les courants. Le nom de vase est la désignation d'une large famille de sédiments fins, argileux ou organiques ayant des teneurs en eau importante. Dans le dictionnaire de géologie, les sédiments sont définis comme " un ensemble constitué par la réunion de particules plus ou moins grosses ou de matières précipitées ayant, séparément, subi un certain transport " (Foucault et Raoult, 1980). Une autre définition a été décrite comme "les sédiments fins sont composés en grande partie de fines particules minérales avec quelques petits éléments de roches auxquels sont mélangés des débris d'origine végétale et animale" (Boutin, 2000).

1.2.2 Origine

En règle générale, les sédiments sont issus de l'érosion des sols et des roches, des volcans, des restes d'organismes aquatiques et de leur transport sous l'effet hydrodynamique. Schneider (2001) a déclaré que le sédiment est un matériau issu de l'érosion, transporté et déposé par un cours d'eau, et n'ayant pas encore subi de transformation diagénétique.

La formation des sédiments est certainement liée à la sédimentation, qui est un processus pendant lequel les particules organiques ou minérales en suspension et en transit cessent de se déplacer et se déposent. Dans les milieux marins, la sédimentation est liée à la production des particules minérales ou biologiques qui se déposent dans l'océan. Ce phénomène dépend du climat, du relief et de la répartition des terres au fond des océans.

1.2.3 Composition des sédiments

En général, les sédiments se caractérisent essentiellement par : leur composition minérale, leur granulométrie, leur teneur en matière organique et en eau. Les vases sont constituées de trois éléments (Agence de l'eau, 2002):

- La matrice minérale dont les particules sont supérieures à 2 μ m (quartz, feldspaths...);
- L'argile, fraction inférieure à 2 μ m (kaolinite, illite...);
- La fraction organique (débris végétaux, acides humiques...);
- La quantité d'eau présente sous différentes formes.

Les éléments de nature minérale influencent essentiellement les caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques des sédiments. Dans les sédiments, la composition minérale est diverse selon leur provenance (Schneider, 2001):

- Les sédiments terrigènes issus de l'érosion des sols : les blocs, les cailloux, les graviers et les sables;
- Les sables quartzeux (silice) ou silicaté (mica, feldspath), accompagnés de minéraux lourds (amphiboles, grenats, disthène...), et les sables calcaires;
- Les plus fines particules (limons, boues et vases) sont composées de minéraux argileux d'origine terrigène, et également des squelettes d'organismes d'origine endogène.

Les argiles sont des roches sédimentaires, composées des silicates d'aluminium plus ou moins hydratés qui existent sous forme d'une structure feuilletée (phyllosilicates) ou bien sous forme d'une structure fibreuse (sépiolite et palygorskite). L'origine des minéraux dépend du climat: héritage (à partir de la roche mère), transformation (à partir d'autres minéraux argileux), néoformation (à partir des ions transportés par l'eau du sol). Les minéraux les plus communs dans les argiles sont donc la kaolinite, la halloysite, la montmorillonite, l'illite et le vermiculite. La structure cristalline en feuillet permet l'hydratation des argiles avec plus ou moins un phénomène de gonflement. La souplesse des liaisons entre les feuillets permet aux argiles d'avoir une plasticité très importante. Les charges négatives des argiles sont neutralisées par des cations compensateurs, qui peuvent s'échanger avec ceux présents et les métaux lourds dans le milieu. Le sédiment fin a ainsi la propriété de capter, retenir et accumuler les polluants. Par conséquent, on peut dire que les propriétés des minéraux argileux sont dues à la structure en feuillets, la petite taille et la charge négative des particules.

En ce qui concerne la matière organique, on trouve tous les composés organiques naturels dans les sédiments. La matière organique est la matière carbonée, l'eau est le composant principal outre le carbone. On trouve également les éléments hydrogène, oxygène, azote, phosphore, soufre, et fer etc. En général, on considère les végétaux, les algues, les animaux, les bio-synthétisés issus de la microflore, ainsi que les colloïdes humiques pour l'origine des constituants organiques. La fraction organique comprend deux catégories: les substances non humiques et les substances humiques. C'est la substance humique qui colore le sédiment en noir et interagit avec le composé minéral dissous tel que les ions métalliques. Colin (2003) a indiqué que les substances humiques peuvent constituer entre 85% et 90% de la fraction organique totale du sol. La proportion de matière organique dans la matière sèche des sédiments varie de 2% pour les sables de rivière à 90% dans le cas de la tourbe (Schneider, 2001). Usuellement, la proportion de matière organique est de l'ordre de 2% à 10% pour les sédiments des cours d'eaux vives et elle est constituée à 60% de composés humiques (Schneider, 2001).

Enfin, la nature de l'eau contenue dans les sédiments doit être analysée, et l'eau est une composante très importante des sédiments. Normalement, l'eau peut être considérée comme faisant partie de cinq catégories:

- L'eau libre qui n'est pas liée aux fines.
- L'eau capillaire qui est liée aux fines par des forces de capillarité.
- L'eau colloïdale qui hydrate le colloïde.
- L'eau intercellulaire qui est liée à chimiquement à la surface des particules et constitue un film autour d'elles.
- L'eau qui participe à la réaction hydratation pour former les substances hydratées.

L'eau libre peut s'éliminer facilement par simple décantation, et l'eau capillaire et colloïdale par des procédés mécaniques de séparation solide-liquide. Pour l'eau intercellulaire et celle qui participe à la réaction, elle peut s'éliminer par des moyens thermiques.

1.2.4 Granulométrie des sédiments

L'étude granulométrique détermine les caractéristiques granulaires des matériaux et leur distribution statistique de tailles d'une population d'éléments. La répartition de fréquence de taille des grains explique la répartition des sédiments dans un milieu aquatique. Le tableau 1.2.1 détaille le classement granulométrique des sédiments utilisé en géologie.

Taille	Dénomination
> 20 cm	Bloc
2 cm à 20 cm	Galet et caillou
2 mm à 2 cm	Gravier
63 µm à 2 mm	Sable (grosier et fin)
2 µm à 63 µm	Limon
< 2 µm	Argile

Tableau 1.2.1: Classification granulométrique

Dans le processus d'étude des matériaux dragués, on doit clairement distinguer trois notions: le sédiment, la boue et la vase. La vase est généralement constituée de trois classes: sable, limon et argile, et la boue est un mélange d'eau et de particules sédimentaires fines de limons et d'argiles. La proportion des sables, limons et argiles des sédiments peut varier très fortement en fonction du lieu de prélèvement et de leur provenance géographique. Le plus souvent, les matériaux dragués dans les ports et les chenaux d'accès sont riches en sédiments fins. Dans le port du Dunkerque, la majeure partie des sédiments prélevés du port de Dunkerque sont considérés comme limons selon les travaux de Dubois (2006) et Tran (2009).

Pour classer les matériaux fins dont la taille des particules est inférieure à 2 mm, le diagramme triangulaire des sols fins de la Figure 1.2.1 est souvent utilisé. Ce diagramme est particulièrement adapté aux sédiments selon la taille et le pourcentage de chaque fraction. Evidemment, la limite entre le silt et le sable dans la Figure 1.2.1 est différente de celle présenté dans le Tableau 1.2.1.

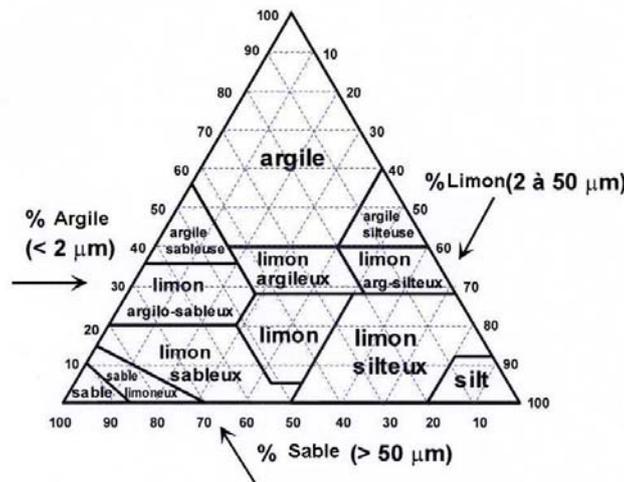


Figure 1.2.1 : Diagramme triangulaire utilisé pour la classification des sols fins (Bonnet, 2000)

1.3 Polluants potentiels

Les contaminations des sédiments sont principalement dues aux rejets industriels, urbains et agricoles, entraînant l'apport d'un grand nombre de substances toxiques. Dans des conditions normales, les polluants sont peu solubles dans l'eau et prédominent dans les matières en suspension et dans les sédiments. Il est très difficile de déterminer la dangerosité et la quantité réelle de ces matériaux dragués dans la mer, les lacs et les rivières. En général, les sédiments fins ont une teneur en matière organique élevée, et ils contiennent une quantité appréciable de sulfures et sont anoxiques. Par contre, les sédiments grossiers, qui sont généralement pauvres en matière organique, ont une faible capacité d'immobilisation des métaux et des polluants organiques (Alzieu, 1999). La classification et la provenance des polluants potentiels peuvent être représentées dans la Figure 1.3.1.

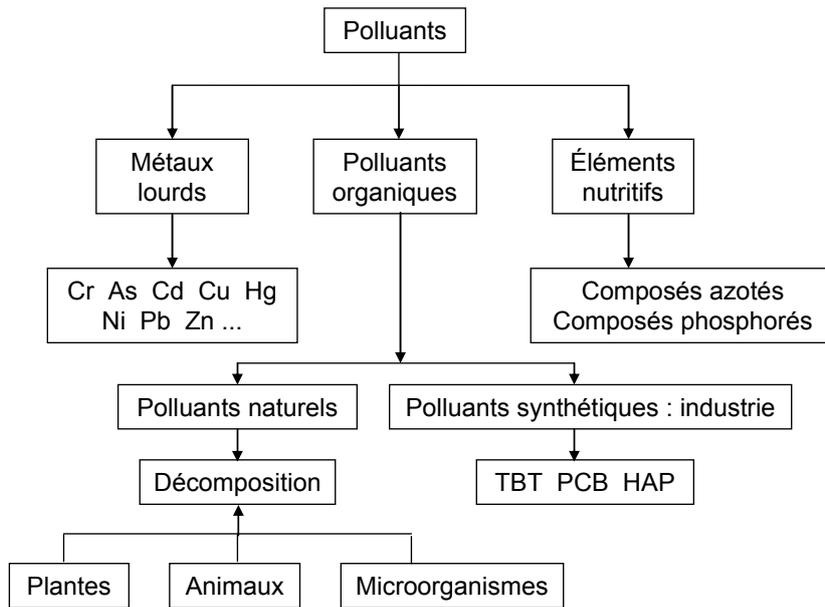


Figure 1.3.1: Schéma de la classification et de la provenance des polluants

1.3.1 Les polluants organiques

Les polluants organiques peuvent être divisés en deux catégories : les polluants organiques naturels, et les polluants organiques synthétiques (Figure 1.3.1). La matière organique naturelle des sédiments marins est un mélange complexe de constituants en voie de décomposition, provenant principalement des plantes mais aussi des animaux et des microorganismes. Les composés organiques sont représentés par plusieurs classes, les alcanes, les pesticides, les dioxines, les polychlorobiphényles et les hydrocarbures aromatiques polycycliques.

Dans cette partie, on distingue principalement trois composés ou familles de polluants organiques synthétiques provenant de l'industrie:

➤ Le tributylétain (TBT): c'est une molécule biocide incorporée dans la composition de certaines peintures antisalissures pour protéger la carène des navires contre la fixation d'organismes vivants. Le TBT et ses deux produits de dégradation (MBT : le monobutylétain; DBT : le dibutylétain) constituent la famille des composés organostanniques ou étain organique. Dans le milieu aquatique, le TBT se présente à l'état dissous sous forme d'hydroxyde de carbonates ou de chlorures faiblement associés aux matières en suspension (Alzieu et Michel, 1998). Les tributylétains sont très toxiques pour les mollusques à des concentrations extrêmement faibles. D'après Alzieu (1999), la concentration

dépassant les 400 µg/kg de sédiment démontreraient une contamination. Mais pour le moment, il n'existe pas de seuils officiels des niveaux de TBT. Les niveaux proposés non officiels par IFRMER sont le niveau 1: 400 µg/kg et le niveau 2: 1000 µg/kg.

➤ Les polychlorobiphényles (PCB): les PCB ayant une formule $C_{10}H_{(10-n)}Cl_n$ sont un groupe de composés organochlorés qui comprennent 209 congénères. Les congénères se distinguent par le nombre d'atomes branchés sur la molécule et par leur position sur le noyau biphényle. Les PCB ne présentent pas de toxicité aiguë, et ils proviennent des pertes lors de remplissages et retraitements des systèmes clos, des rejets urbains, des décharges de matériel usagé et des activités liées à la récupération des matériaux ferreux (Alzieu, 1999). La solubilité dans l'eau des PCB est très faible et diminue avec le nombre d'atomes de chlore dans la molécule. Le devenir des PCB dans l'environnement peut s'expliquer par leurs propriétés physico-chimiques. En effet, l'accroissement de quantité de particules fines et du taux de carbone organique présent peut entraîner l'augmentation de la capacité du sédiment superficiel à piéger les PCB. De l'année 1986 à 1993, les concentrations en PCB de la Manche/Mer du Nord, de l'Atlantique, de la Méditerranée sont respectivement de 0.01-0.14µg/kg, 0.005-0.1µg/kg et 0.1-0.81µg/kg.

➤ Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP): les HAP qui sont présents sous forme dissoute, complexés à la matière organique dissoute ou adsorbée sur les particules, désigne les substances dont la structure chimique est constituée de plusieurs noyaux aromatiques. Les sources principales anthropiques sont liées à la production d'énergie à base de combustibles fossiles ou naturels, aux produits pétroliers, à l'industrie métallurgique et au trafic automobile. L'effet des HAP sur l'environnement dépend de leurs propriétés physico-chimiques, qui sont caractérisées par: une solubilité faible dans l'eau de mer, une forte affinité pour les solvants organiques et une adsorption élevée sur les matières en suspension et les colloïdes (Alzieu, 1999). Les HAP, dont la solubilité dans l'eau de mer est faible, se différencient par leur position dans la structure moléculaire, le nombre de noyaux aromatiques, la nature et la position des substituants.

Dans les déchets, l'évolution et le transport des composés organiques dépend de beaucoup de paramètres, tels que l'immobilisation, la volatilisation, la mise en solution, la transformation chimique et biologique (Figure 1.3.2). Les polluants organiques comme les HAPs sont transportés par les poussières, les précipitations atmosphériques ou encore par les particules entraînées par le ruissellement.

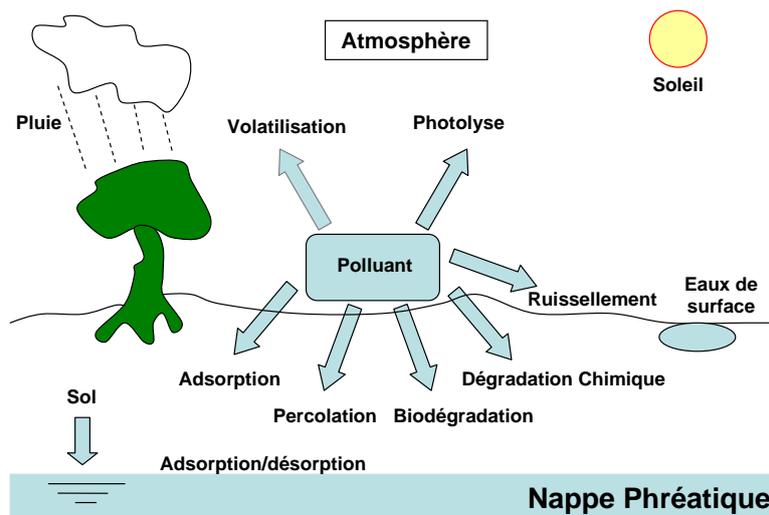


Figure 1.3.2: Mécanismes généraux de transport et de transformation des polluants organiques dans les sols (Fantozzi-Merle, 2003)

1.3.2 Les métaux lourds

Il n'y a pas de réelle définition scientifique ou juridique des "métaux lourds" (Deschamps et al, 2006). Le terme "éléments traces" est souvent utilisé pour décrire ces mêmes éléments, car ils se retrouvent souvent en très faible quantité dans les solides. Les métaux lourds qu'on retrouve le plus souvent sont: le vanadium, le chrome, le cobalt, le nickel, le cuivre, le zinc, l'arsenic, le sélénium, le plomb, le cadmium, le mercure.

Les métaux lourds proviennent principalement de l'érosion des roches et des sols et des activités humaines. Comme pour les matières organiques, les métaux sont répartis dans les diverses fractions des sédiments. Les métaux lourds liés aux phénomènes de précipitation se présentent sous les différentes formes: complexes, ions, adsorbés à la surface des particules, et peuvent être fixés sur les particules minérales et les matières organiques des sédiments.

Dans les présents travaux, les principaux secteurs et sources sont présentés ci-dessous (Alzieu, 1999).

- Arsenic (As) : L'extraction, le transport et le traitement métallurgique; les rejets liquides ou solides et les émissions atmosphériques; la combustion du charbon; production de trioxyde d'arsenic.
- Cadmium (Cd): La fabrication des batteries, pigment; le traitement de surface des aciers; la stabilisation des matières plastiques; la composition des alliages non ferreux.
- Chrome (Cr): L'extraction de la chromite, minerai de fer et de chrome; la métallurgie; des matériaux réfractaires; l'industrie chimique.
- Cuivre (Cu): L'industrie électrique; l'utilisation de l'oxyde Cu_2O comme matière active des peintures antisalissures marines.
- Mercure (Hg): La fabrication et l'usage de catalyseurs, de fongicides, de pigments et composés mercuriels, les piles au mercure, la fabrication de chlore électrolyse sur cathode de mercure, le traitement des minerais non ferreux, l'incinération de déchets et la combustion du charbon.
- Nickel (Ni): L'utilisation des combustibles fossiles; la production de métaux non ferreux; l'activité volcanique; l'érosion éolienne.
- Plomb (Pb): L'utilisation de plomb tétraéthyle comme additif antidétonant dans les carburants; la fabrication d'accumulateurs; les essences; les émissions atmosphériques.
- Zinc (Zn): La dissolution des masses de zinc pur fixées sur les immergées des bateaux; certaines peintures antisalissures.

Une fois le seuil de tolérance dépassé, les métaux lourds peuvent être considérés comme toxiques (Schneider, 2001). L'impact toxicologique des métaux lourds dépend de leur concentration, du contexte environnemental, de leur forme chimique et de la possibilité de passage dans la chaîne du vivant. Par exemple, l'absorption de plomb provoque le saturnisme, mais le plomb est considéré comme biocompatible et utilisé en chirurgie ou dentisterie. Les différents métaux et métalloïdes ont été classés en fonction de leur toxicité et leur disponibilité dans l'environnement (Tableau 1.3.1).

Pas toxique		Toxique, mais peu soluble ou rare				Très toxique et relativement disponible	
Na	C	F	Ti	Ga	Be	As	Au
K	P	Li	Hf	La	Co	Se	Hg
Mg	Fe	Rb	Zr	Os	Ni	Te	Tl
Ca	S	Sr	W	Rh	Cu	Pb	Pb
H	Cl	Al	Nb	Ir	Zn	Ag	Sb
O	Br	Si	Ta	Ru	Sn	Cd	Bi
N			Re	Ba		Pt	

Tableau 1.3.1: Classification des métaux et des métalloïdes en fonction de leur toxicité et de leur disponibilité (Geffard, 2001)

1.3.3 Les éléments nutritifs

Les éléments nutritifs ou les nutriments, sont des éléments ou des composés qui sont essentiels à la croissance et à la survie des organismes. La plupart des cellules vivantes dans les eaux ont besoin de nombreux éléments nutritifs, tels que le phosphore, le carbone, le calcium et le potassium. Les nutriments qui sont à l'origine de l'eutrophisation des milieux, proviennent des rejets et des eaux municipales et rurales, d'agriculture, des rejets industriels, d'aquaculture.

L'apport d'éléments nutritifs a deux effets très importants: effet d'enrichissement et effet toxique. Généralement, l'apport d'éléments nutritifs favorise la croissance des végétaux dans l'écosystème aquatique. Il convient de noter que la partie la plus importante est le phosphore et le composé azoté. Bien que les composés phosphorés présents à l'état naturel ne comportent aucun risque de toxicité majeur, certains composés azotés peuvent plus ou moins avoir des effets détériorants sur la santé des animaux, des végétaux et des êtres humains.

1.4 Problématique des matériaux de dragage

1.4.1 Technologie du dragage

Le dragage est une opération qui consiste à prélever des matériaux (sables, graviers, des matériaux calcaires) du fond de la mer. Les procédés de dragage changent selon les zones, le type des travaux et la nature du sédiment à draguer. Classiquement, on distingue trois types de dragage: le dragage d'approfondissement, le dragage d'aménagement de nouvelles aires portuaires et le dragage d'entretien (Foucher, 2005). Le dragage d'approfondissement est entrepris lorsqu'il est nécessaire de moderniser des ports et d'adapter des seuils de navigation. Le dragage d'entretien périodique vise à extraire les sédiments qui se sont déposés et gênent la navigation dans les chenaux d'accès des ports maritimes et estuaires, et les bassins à flots. Le dragage d'aménagement de nouvelles aires portuaires concerne le déplacement des volumes de matériaux divers (sables, argiles, graviers).

En terme d'équipements, on distingue généralement les dragues mécaniques, hydrauliques et pneumatiques (CETMEF, 2000). Il existe plusieurs types de drague, et le classement des dragues est présenté dans la Figure 1.4.1. Les dragues mécaniques sont utilisées dans des zones difficiles d'accès (bordures de quais, bassins étroits) et peuvent travailler jusqu'à des profondeurs de 25 m (drague à godets) à 30 m (drague à benne) (Foucher, 2005). Les dragues hydrauliques sont basées sur le principe de la pompe à eau centrifuge et opèrent par création d'un vide à l'entrée de la pompe. La pression

atmosphérique dans l'eau oblige la mixture à suivre la conduite d'aspiration, seule trajectoire disponible (Foucher, 2005). Le dragage hydraulique est la méthode la plus utilisée, qui comprend les catégories suivantes: drague aspiratrice refouleuse stationnaire ou aspiratrice simple, drague aspiratrice à désagrégateur, drague aspiratrice porteuse à élinde traînante ou plus communément nommée drague aspiratrice en marche, drague à balayage, drague coupeuse à disque et drague à vis sans fin (Foucher, 2005). La drague pneumatique est particulièrement adaptée au dragage des sédiments contaminés, et les matériaux sont ensuite évacués par chaland ou par conduite flottante (Foucher, 2005).

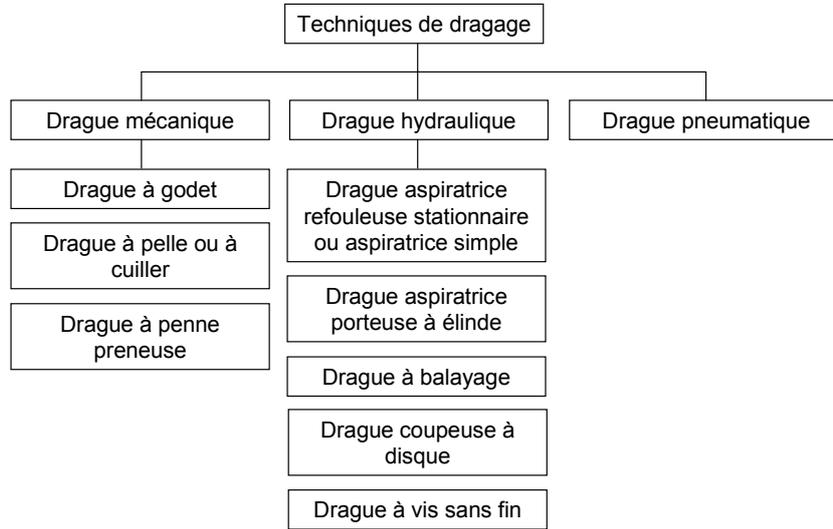
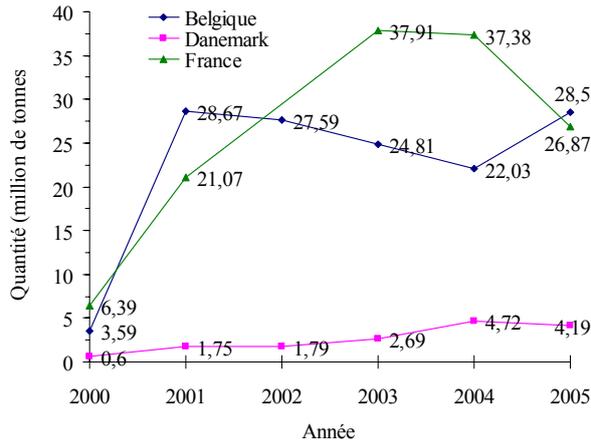


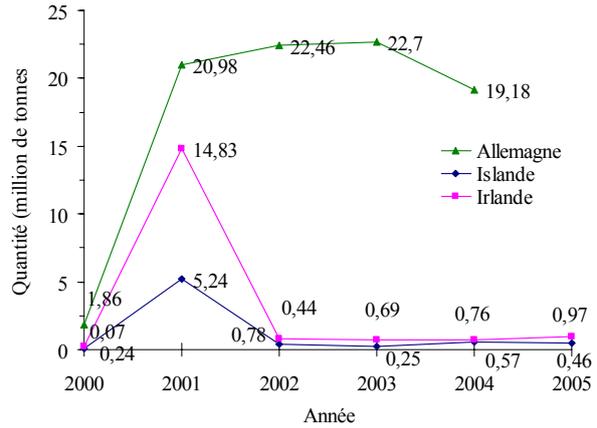
Figure 1.4.1: Les techniques de dragage

1.4.2 Quantité des matériaux dragués

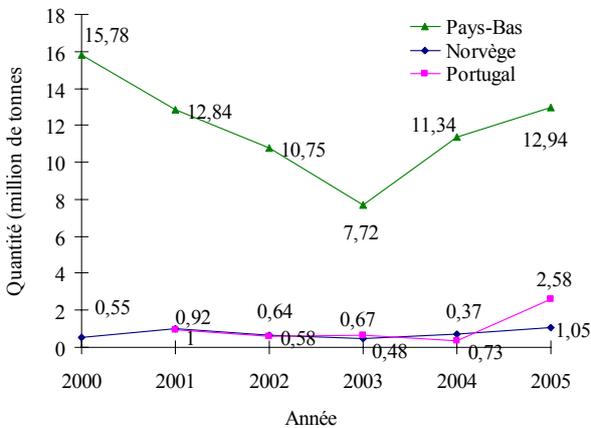
Dans les pays européens, notamment la France, une grande quantité de matériaux doit être draguée annuellement des fonds marins, des rivières, des fleuves, des lacs et des ports par des dragues. L'activité de dragage est effectuée, soit pour réaliser les travaux de génie portuaire, soit pour exploiter les matériaux dragués. La situation du dragage des sédiments de nombreux pays européens est représentée dans les graphes de la quantité draguée et immergée de 2000 à 2005 réalisé par l'enquête annuelle de la commission d'OSPAR (Figure 1.4.2: (a) (b) (c) (d)). On peut voir que la plupart des matériaux sont prélevés par les cinq pays: Belgique, Angleterre, Pays-Bas, Allemagne et France. Par contre, les trois pays où les quantités draguées sont les plus faibles voire négligeables sont: le Danemark, la Norvège et la Suède.



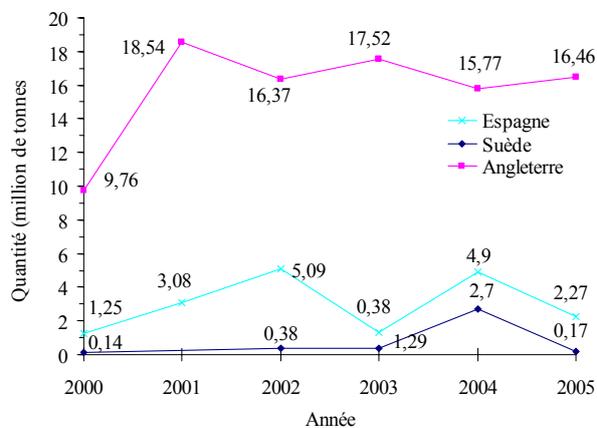
(a) : Belgique, Danemark et France



(b) : Allemagne, Islande et Irlande



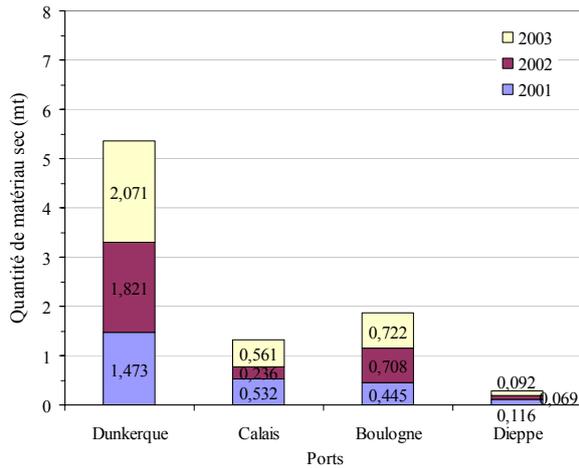
(c) : Pays-Bas, Norvège et Portugal



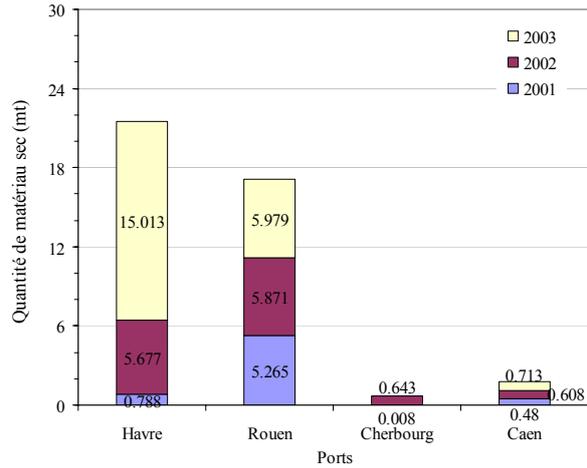
(d) : Espagne, Suède et Angleterre

Figure 1.4.2: Quantité de matériau de dragage immergés dans la mer dans les pays européens (Valeur exprimée en millions de tonnes de matériau sec) (OSPAR, 2003, 2004, 2005, 2007)

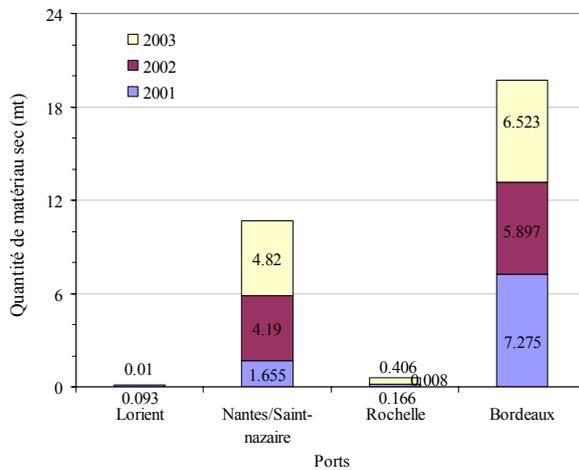
En France, il y a 69 ports de commerce et de pêche dont 17 ports métropolitains d'intérêt national et 6 ports autonomes. Chaque année, il y a entre 25 et 45 millions de tonnes de sédiments secs qui sont dragués pour l'entretien des ports. La quantité de matériaux dragués (entretien et travaux neufs) dans les ports autonomes et d'intérêt national français métropolitains est listée dans la Figure 1.4.3. Dans les cinq grands ports maritimes: Dunkerque, Calais, Boulogne, Le Havre et La Rochelle, un volume moyen annuel d'environ 4 millions de tonnes est dragué. Dans les trois ports d'estuaire (Rouen, Nantes Saint-Nazaire et Bordeaux), un volume moyen annuel d'environ 15 millions de tonnes des sédiments sont dragués. Mais les dragages dans les ports de Lorient, Sète et Port la Nouvelle sont négligeables en quantité. Les quantités des sédiments dragués au total dans les ports listés dans la Figure 1.4.3 sont respectivement 20440, 27354 et 43424 milles de tonnes en 2001, 2002 et 2003.



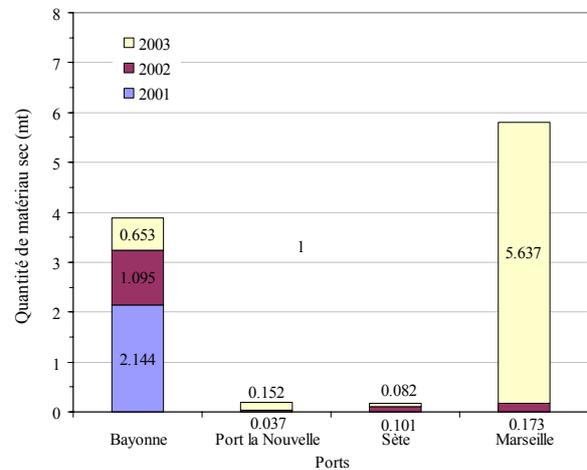
(a): Dunkerque, Calais, Boulogne et Dieppe



(b): Havre, Rouen, Cherbourg et Caen



(c): Lorient, Nantes/Saint-nazaire, Rochelle et Bordeaux



(d): Bayonne, Port la Nouvelle, Sète et Marseille

Figure 1.4.3: Quantité de matériaux dragués (entretien et travaux neufs) dans les ports Autonomes et d'intérêt national français métropolitains (valeur exprimée en milliers de tonnes de matériau sec) (Foucher, 2005)

1.5 La gestion des sédiments

1.5.1 Législations et réglementations

1.5.1.1 Les dispositions internationales

De nombreuses dispositions internationales et françaises, mondiales et régionales préconisent le recours aux meilleures techniques disponibles et aux bonnes pratiques environnementales. Les conventions dans une très large mesure, régissent les immersions de matériaux de dragage. Les opérations relatives au dragage des sédiments et à leur dépôt à terre ou immersion sont soumises à des autorisations. Cela est basé sur des dispositions réglementaires dans le cadre de conventions internationales et sur les lois régionales.

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

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

La convention d'Oslo pour la prévention de la pollution des mers par les opérations d'immersion, a été signée le 15 février 1972 et est entrée en vigueur le 6 avril 1974. Elle interdit tout d'abord l'immersion de plusieurs substances matériaux toxiques, autres matériaux synthétiques persistants, et les substances possédant un effet cancérigène. Ensuite, elle énumère une série de substances dont l'immersion nécessite un permis spécifique par l'autorité nationale compétence. Le tableau 1.5.1 et 1.5.2 rassemblent les niveaux N1 et N2 adoptés par les pays signataires de cette convention d'Oslo. On doit noter qu'il y a trois niveaux de polluants métaux et organiques, selon le critère de sédiment marin «*GB18668-2002*» de la République Populaire de Chine, et ce critère est entré en vigueur le premier octobre 2002.

Pays	Allemagne	Belgique	Espagne	France	Pays-Bas	Chine
Arsenic	30-150	36-100	80-200	25-50	29-29	20-65-93
Cadmium	2,5-12,5	3-7	1-5	1,2-2,4	0,8-4	0,5-1,5-5,0
Chrome	150-750	66-220	200-1000	90-180	100-120	80-150-270
Cuivre	40-200	65-91	100-400	45-90	36-60	35-100-200
Mercure	1-5	4-7	0,6-3	0,4-0,8	0,3-1,2	0,2-0,5-1,0
Plomb	100-500	400-600	120-600	100-200	85-110	60-130-250
Nickel	50-250	190-280	100-400	37-74	35-45	/
Zinc	350-1750	350-550	500-3000	276-552	140-365	35-100-200

Tableau 1.5.1: Valeurs guides des niveaux 1 et 2 pour les métaux (en mg/kg de sédiment sec) pour différents pays signataires de la convention d'Oslo (Alzieu, 1999) et *GB 18668-2002* de la RPC (2002)

Polluants	Allemagne	France	Pays-Bas	Chine
CB 28	2-6	25-50	1-30	/
CB 52	1-3	25-50	1-30	/
CB 101	2-6	25-50	4-30	/
CB 118	3-10	25-50	4-30	/
CB 138	4-12	50-100	4-30	/
CB 153	5-15	50-100	4-30	/
CB 180	2-6	50-100	4-30	/
ΣPCB	20-60	500-1000	/	0,02-0,2-0,6
α hexachlorocyclohexane	0,4-1	/	/	/
γ hexachlorocyclohexane	0,2-0,6	/	0,05-20/30	0,5-1-1,5
Hexachlorocyclohexane	2-6	/	/	/
Pentachlorobenzène	1-3	/	/	/
Octachlorostyrène	0,1-0,3	/	/	/
pp' DDT	1-3	/	/	0,02-0,05-0,1
pp' DDE	1-3	/	/	/
pp' DDD	3-10	/	/	/
ΣHAB (6) (mg/kg)	1000-3000	/	/	/
Huiles minérales (mg/kg)	/	/	/	500-1000-1500
Sulfure	/	/	/	300-500-600
Carbone organique	/	/	/	2-3-4

Tableau 1.5.2: Valeurs guides des niveaux 1 et 2 des polluants organiques (en µg/kg de sédiment sec) pour différents pays signataires de la convention d'Oslo (Alzieu, 1999) et GB 18668-2002 de la RPC (2002)

La convention de Paris qui a été signée le 4 juin 1974 et entrée en vigueur le 6 mai 1978, a pour objectif de prévenir de la pollution marine d'origine tellurique et couvre un champ très vaste de pollutions. Cette convention s'engage à éliminer et limiter la pollution générée par les produits dans lesquels on peut trouver les composés organo-halogénés, les métaux lourds, les matières synthétiques persistantes, les huiles et hydrocarbures persistants.

La convention des Nations Unies sur le droit de la mer (CNUDM) du 10 décembre 1982 à Montego Bay de Jamaïque, a été créée par l'assemblée générale de l'ONU le 16 novembre 1973 et constitue une contribution importante au maintien de la paix, à la justice et au progrès pour tous les peuples du monde. La convention qui est entrée le 16 novembre 1994, précise quelques notions apparues dans le droit coutumier, comme la mer territoriale, la zone économique exclusive et le plateau continental. Plus particulièrement, elle a défini les principes généraux de l'exploitation des ressources de la mer, et aussi a créé le Tribunal international du droit de la mer. Par rapport aux zones définies précédemment, cette convention aboutit à la compartimentation du droit de la mer et ajoute quatre zones maritimes: les eaux archipélagiques, la zone économique exclusive, les détroits navigables et le fonds des mers.

La convention, dite convention OSPAR, a été signée à Paris le 22 septembre 1992 pour la protection du milieu marin de l'Atlantique du Nord-Est. Elle est née de la fusion de la Convention d'Oslo (1972) traitant de la prévention de la pollution marine par les opérations d'immersion, et de la Convention de Paris (1974) traitant des rejets d'origine tellurique. Cette convention comportant les cinq annexes est en vue de fédérer globalement les moyens de connaissance et d'action des parties contractantes pour assurer la meilleure conservation possible de cet espace marin dans un esprit de développement durable. Ratifiée par tous les pays riverains de l'Atlantique Nord-Est (Allemagne, Belgique, Danemark, Espagne, France, Irlande, Islande, Norvège, Pays-Bas, Portugal, Royaume-Uni, la Suède), plus le Luxembourg, la Finlande, la Suisse et la Communauté Européenne, elle est entrée en vigueur en mars 1998. La convention comporte les domaines couverts par les conventions d'Oslo et de Paris, notamment à savoir l'immersion et la pollution tellurique.

1.5.1.2 Le règlement français

En France, toute opération d’immersion effectuée à partir d’un port français relève de *la loi N° 76 599 du 7 juillet 1976 et du décret N° 82 842 du 29 septembre 1982*. Après vingt ans, deux seuils ont été définis par *arrêté du 14 juin 2000* relatif aux niveaux de référence pour huit métaux et sept congénères de PCB lors d’une analyse de sédiments marins ou estuariens présents en milieu naturel ou portuaire (Tableau 1.5.3). Le degré de contamination des sédiments de dragage destiné à l’immersion est apprécié par rapport à des valeurs de référence selon ce tableau.

Polluants	France		
	BdF	Niveau 1	Niveau 2
Arsenic	4,4	25	50
Cadmium	0,5	1,2	2,4
Chrome	45	90	180
Cuivre	35	45	90
Mercure	0,2	0,4	0,8
Nickel	20	37	74
Plomb	47	100	200
Zinc	115	276	552
PCB 28	/	0,025	0,05
PCB 52	/	0,025	0,05
PCB 101	/	0,05	0,1
PCB 118	/	0,025	0,05
PCB 138	/	0,05	0,1
PCB 153	/	0,05	0,1
PCB 180	/	0,025	0,05
PCB totaux	/	0,5	1

Tableau 1.5.3: Niveaux relatifs aux éléments traces et aux composés traces (mg/kg sédiment sec sur la fraction inférieure à 2mm) (G.E.O.D.E, 1996)

A ce tableau, on peut ajouter les commentaires suivants:

- Le bruit de Fond (BdF): Concentrations en métaux considérées comme naturelles pour les sédiments portuaires.

- Le niveau 1 (N1): au-dessous duquel les opérations de dragage et d’immersion seraient autorisées sans autre étude: l’impact potentiel est jugé neutre ou négligeable, les valeurs observées se révélant comparables aux «bruits de fond» environnementaux.

- Le niveau 2 (N2): au-dessus duquel les opérations d’immersion sont susceptibles d’être interdites sous réserve que cette interdiction soit la solution de gestion la moins dommageable pour l’environnement: une investigation complémentaire est généralement nécessaire car des indices peuvent laisser présager un impact potentiel de l’opération. Une étude d’impact approfondie est alors jugée indispensable.

Entre les niveaux N1 et N2, une investigation complémentaire peut s’avérer nécessaire en fonction du projet considéré et du degré de dépassement du niveau N1. Des tests peuvent alors être pratiqués pour évaluer la toxicité globale des sédiments.

En l’absence de réglementation spécifique sur les sédiments de dragage, les autorités de la gestion des sédiments de curage ou de dragage ont été amenées à développer leurs propres valeurs guides non officiels, par exemple le port autonome de Rouen et les Voies Navigables de France (Clozel-Leloup et Freyssinet, 2003).

➤ Les voies Navigables de France ont défini des consignes de caractérisation des sédiments continentaux à draguer en fonction de leur qualité. Trois catégories de sédiments ont été établies selon les deux seuils retenus (Tableau 1.5.4 et Tableau 1.5.5). Le seuil 1 correspond aux valeurs limites «sol» de teneur en métaux définis dans l'arrêté du 8 janvier 1998 (*Arrêté du 08/01/98*), et le seuil 2 correspond aux valeurs retenues étant comprises entre les limites «sol» et «boues» de ce même arrêté.

Eléments	Eléments	Valeurs limites dans les sols (mg/kg de matière sèche)	Valeurs limites dans les boues (mg/kg de matière sèche)	Flux maximum cumulé apporté par les boues en 10 ans (g/m ²)
Cadmium	Cd	2	20*	0.03*
Chrome	Cr	150	1000	1.5
Cuivre	Cu	100	1000	1.5
Mercure	Hg	1	10	0.015
Nickel	Ni	50	200	0.3
Plomb	Pb	100	800	1.5
Zinc	Zn	300	3000	4.5
Chrome+Cuivre+Nickel+Zinc	Cr+Cu+Ni+Zn	/	4000	6

* 15mg/kg MS à compter du 1^{er} janvier 2001 et 10 mg/kg MS à compter du 1^{er} janvier 2004

** 0.015 g/m² à compter du 1^{er} janvier 2001

Tableau 1.5.4: Teneurs limites en métaux lourds dans les boues et les sols pour l'épandage

Composés-traces	Valeur limite dans les boues (mg/kg de matière sèche (MS))		Flux maximum cumulé, apporté par les boues en 10 ans (mg/m ²)	
	Cas général	Epannage sur pâturage	Cas général	Epannage sur pâturage
Total des 7 principaux PCB*	0.8	0.8	1.2	1.2
Fluoranthène	5	4	7.5	6
Benzo(b)fluoranthène	2.5	2.5	4	4
Benzo(a)pyrène	2	1.5	3	2

* PCB 28, 52, 101, 118, 138, 153, 180

Tableau 1.5.5: Teneurs limites en composés-traces organiques dans les boues pour l'épandage

Catégorie 1: Toutes les valeurs sont inférieures à celles imposées par le premier seuil. La valorisation des produits de dragage est recommandée sans les restrictions concernant le devenir de ces produits;

Catégorie 2: Chaque valeur ne peut pas être supérieure au second seuil mais elle peut être supérieure au premier seuil. Les conditions d'application de la catégorie 2 permettent de valoriser ou de stocker les produits de dragage, seul le régalage sur les terres agricoles est à proscrire;

Catégorie 3: Une des valeurs est supérieure à celles du second seuil. La valorisation ou le stockage des produits de dragage nécessite la mise en place d'une étude de faisabilité relative à la destination du produit de dragage.

1.5.2 Sédiments considérés comme les déchets

Les sédiments marins bénéficient d'un cadre réglementaire clair pour évaluer leur toxicité en fonction de leur classification. Il existe des valeurs guides permettant de juger de la dangerosité des sédiments dragués, cela fournit la base pour l'utilisation et la valorisation de sédiments marins.

En effet, d'après l'article L 541-1 du code de l'environnement («Article L 541-1»), les sédiments issus du processus de dragage, peuvent être considérés comme des déchets. Le décret n° 2002-540 du 18 avril 2002 («Décret n° 2002-540») a classé les sédiments sous la rubrique 17 05 05* ou 17 05 06. Les deux rubriques indiquent respectivement "Boues de dragage contenant des substances dangereuses" et "Boues de dragage autres que celles visées à la rubrique 17 05 05*". L'astérisque indique qu'il s'agit alors d'un déchet dangereux. Selon les rapports de la commission d'OSPAR, les sédiments dragués sont considérés comme les "déchets".

En Chine, les sédiments sont classés comme des déchets solides selon la loi nationale («La loi de la République populaire de Chine sur la prévention et le contrôle de la pollution environnementale des déchets solides» (Edition revue, 2005, Ministère de protection de l'environnement, RPC)). Par conséquent, les sédiments marins peuvent en général être considérés comme des déchets en Chine et en Europe.

1.5.3 Les devenirs des sédiments

Chaque année, plus de 365 millions de tonnes de granulats sont consommées (Michel, 1997), ensuite en 2006 la consommation de granulats en France a dépassé 557 millions tonnes (UNICEM, 2005). Donc le traitement des sédiments marins devient un problème très important. On peut distinguer quatre méthodes d'élimination des sédiments marins et fluviaux: le stockage ou le dépôt, la mise en décharge, le traitement et la valorisation (Figure 1.5.1). En effet, l'immersion de sédiments dragués n'est pas obligatoirement une finalité, et les déblais peuvent être valorisés, déposés ou confinés en mer et à terre ou être soumis à des traitements spécifiques selon leurs caractéristiques physico-chimiques et leur niveau de contamination (OSPAR, 1998).

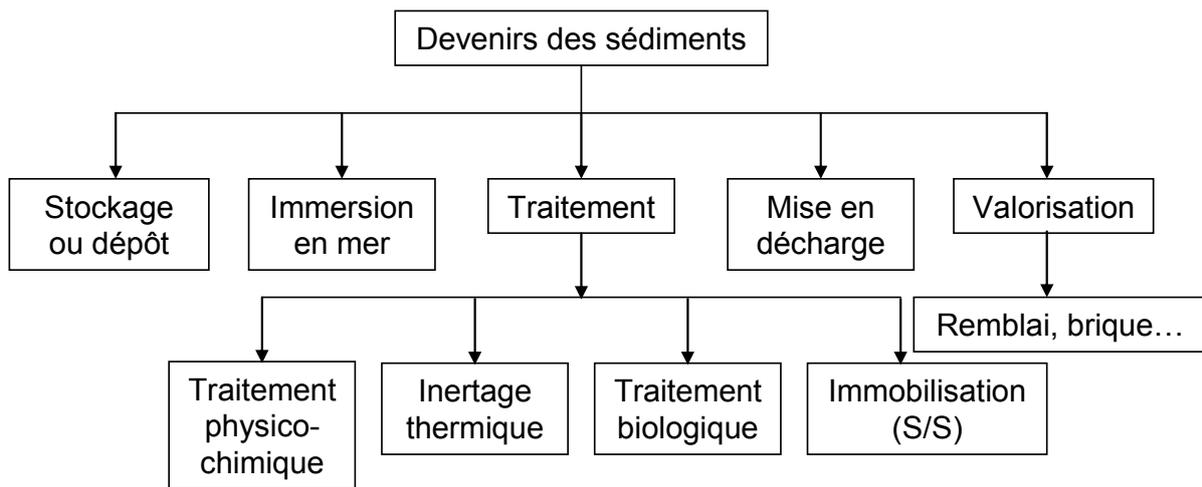


Figure 1.5.1: Devenirs des sédiments

➤ Le stockage ou le dépôt

La méthode de stockage ou de dépôt est un procédé utilisé classiquement pour les sédiments. Il faut noter que les sédiments se situent dans la catégorie «inertes» et «non dangereux» d'après les

conditions définies dans le Tableau 1.5.7. Une bande de terre et un bassin sont couramment utilisés pour déposer les produits de dragage et isoler les sédiments du milieu extérieur (Figure 1.5.2). Ce type de filière d'élimination dépend essentiellement de la dangerosité des sédiments et de la durée de stockage prévue. Il est clair que le stockage ou le dépôt demande de vastes espaces ouverts et de gros investissements en termes de suivi de la contamination.



Figure 1.5.2: Stockage ou dépôt du sédiment

➤ L'immersion en mer

L'immersion en mer constitue encore un mode d'évacuation qui contribue à l'élimination des déchets. Cette méthode s'applique uniquement aux matériaux peu ou pas pollués. Pour les sédiments contaminés, l'une des méthodes déjà envisagée et retenue est le confinement en milieu aquatique, dans un site où les conditions hydrodynamiques assurent la stabilité des matériaux dragués (Boutouil, 1998).

Pour le moment, l'immersion qui pollue plus ou moins l'environnement aquatique est de plus en plus limitée par les législations. L'immersion en mer des matériaux contaminés de dragage est réglementée par la Convention de Londres (1972) et du Protocole 1996, qui vise la protection de la pollution marine par les opérations d'immersion de déchets et d'autres matières. En France, le conseil général du Morbihan fait le choix de l'immersion des sédiments de dragage dans la Baie de Quiberon, et indique que toute demande d'autorisation d'immersion doit faire l'objet d'une information préalable suivie d'une enquête publique. Le "Protocole immersions" (adopté le 16 février 1976 ; modifié le 10 juin 1995) permet l'immersion de déchets et autres matières contenant les matériaux de dragage, et montre que "immersion" signifie : (a): tout rejet délibéré dans la mer de déchets et autres matières à partir de navires et aéronefs; (b): tout sabordage en mer de navires et aéronefs; (c): toute élimination ou dépôt et enfouissement délibérés de déchets et autres matières dans les fonds marins et leur sous-sol à partir de navires et aéronefs.

➤ La mise en décharge

Une décision a été prise par le conseil de l'Union Européenne le 19 décembre 2002 (JOCE 16 janvier 2003) établissant des critères et procédures d'admission des déchets dans les décharges. Ce document définit trois types de décharges: les déchets inertes, non dangereux et dangereux. Les seuils de pollution à respecter ont été précisés pour déterminer si les déchets sont aptes à être mis dans des décharges pour les matériaux (Tableau 1.5.6). Il est à noter que ces critères se basent en grande partie sur des tests de lixiviation et de percolation.

Paramètre	Seuils [1]	Seuils [2]	Seuils [3]	Seuils [4]	Paramètre	Seuils [1]	Seuils [2]	Seuils [3]	Seuils [4]
Fraction soluble	4000	60000	100000	<	Ni	0.4	10	40	<
Sb	0.06	0.7	5	<	Pb	0.5	10	50	<
As	0.5	2	25	<	Se	0.1	0.5	7	<
Ba	20	100	300	<	Zn	4	50	200	<
Cd	0.04	1	5	<	Cyanures			5	<
Cr total	0.5	10	70	<	Chlorures	800	15000	25000	<
Cr (VI)			5	<	Sulfates	1000	20000	50000	<
Cu	2	50	100	<	Fluorures	10	150	500	<
Hg	0.01	0.2	2	<	Indice phénol	1	50	100	<
Mo	0.5	10	30	<	COT	500	800	1000	<

Seuil [1] : Seuils de stockage de déchets inertes; Seuil [2] : Seuils de stockage de déchets non dangereux

Seuil [3] : Seuils de stockage de déchets dangereux; Seuil [4] : Traitement nécessaire avant le stockage

Tableau 1.5.6: Valeurs limites en matières de lixiviation pour l'admission des déchets dans les décharges (Test de lixiviation sur la base d'une ratio liquide/solide de 10 l/kg)

➤ Le traitement

Le traitement des sédiments proposant plusieurs méthodes, a de nombreux avantages: détruire, extraire, immobiliser ou neutraliser les contaminants. Ces méthodes sont en train de se développer et d'évoluer grâce aux avancées technologiques. Néanmoins, il est difficile d'établir une liste exhaustive de toutes les méthodes de traitements. Il est nécessaire de prétraiter les sédiments en vue de leur stockage, valorisation et traitement. Par exemple, on peut diminuer leur teneur en eau par décantation et séchage à l'air. Selon Boucard (2006), Lafhaj et al (2007) et Agence de l'eau (2002), les principaux procédés et techniques sont les suivants: le traitement physico-chimique, l'inertage thermique, le traitement biologique et l'immobilisation. Il est important d'étudier plusieurs critères afin d'évaluer les performances des traitements: facteurs techniques, socio-économiques et environnementaux.

(a): Le traitement physico-chimique: Ce traitement se base sur des interactions physico-chimiques pour détruire, transformer et immobiliser les contaminants, comme l'adsorption/désorption, l'oxydoréduction ou encore les échanges ioniques etc. Il n'a pas le problème d'émissions de gaz dans l'atmosphère, mais il est nécessaire de récupérer et traiter les solutions de lavage ou d'extraction. Le traitement physico-chimique concerne les procédés: l'acides, l'extraction sous vide, le lessivage aux solvants et fluides supercritiques, le déchloration, la flottation, le complexant et l'oxydation/réduction.

(b): L'inertage thermique: L'objectif de cette technique de traitement est de fixer les contaminants dans les matières afin qu'ils ne soient plus mobiles. Il est alors possible de revaloriser et stabiliser des produits contaminés. Le contaminant organique ou inorganique n'est pas détruit, il est donc nécessaire d'effectuer des études à long terme pour appréhender les risques de ce type de traitement, qui comprend désorption thermique, incinération, pyrolyse, réduction thermique, vitrification, oxydation humide, lit fluidisé et bain sur sels fondus.

(c): Le traitement biologique: Cette méthode présente différents intérêts: simplicité d'application, faible coût de mise en œuvre et écologique, cependant elle nécessite des délais de réalisation de plusieurs mois. Le traitement biologique utilise des champignons ou des levures ou des bactéries pour accélérer la dégradation des polluants organiques. A présent, les méthodes utilisées comprennent deux catégories, in situ: bioremédiation, phytorerédiation et sesatec et ex situ: bioréacteur, compostage, land farming et épandage sous serre.

(d): L'immobilisation au process de stabilisation/solidification (S/S): Cette technique désigne l'ensemble des techniques dont l'objectif est d'immobiliser les polluants à long terme dans les

matériaux traités en faveur d'un liant (ciment, chaux, cendre volante...). Les liants utilisés le plus souvent sont le ciment et la chaux, et ils permettent de stabiliser efficacement certains métaux comme le cadmium, le plomb, le chrome et le zinc etc, et quelques matières organiques. Mais on doit noter que l'effet de cimentation du liant hydraulique semble faiblement compétent pour les matières organiques. Globalement, cette méthode est une technique très efficace pour la stabilisation des polluants dans les sédiments, et les sédiments après un passage de traitement peuvent potentiellement être appliqués en travaux publics.

➤ La valorisation: travaux publics et remblais

La valorisation des sédiments est une technique utilisée dans un large éventail. Elle est particulièrement utilisée dans le domaine du génie civil, de l'agriculture et de la fabrication des briques. Les sédiments dragués présentent certaines caractéristiques: une teneur en eau élevée, une portance faible et une quantité de matières organiques. Donc, il est nécessaire d'en réduire leur teneur en eau, d'en améliorer leurs performances de portance afin d'utiliser les sédiments marins dans le domaine de construction.

Avant d'utiliser les sédiments dans les travaux, les sédiments doivent généralement être traités aux liants (ciment, chaux...) pour fixer les contaminants (métaux lourds, matières organiques) à long terme et améliorer les caractéristiques mécaniques (le module d'élasticité, la résistance en compression et en traction). Jusqu'à présent, les sédiments sont appliqués aux différents domaines: les travaux routiers, les amendements pour les sols cultivés (épandage), les premiers matériaux primaires de construction (sables) ou élaborés (briques), les remblaiements pour la réalisation d'infrastructures (chaussée) (Hamer et al, 2002; Ulbricht, 2002; Dubois, 2006; Tran, 2009).

1.6 Notion sur les cendres volantes

1.6.1 Définition

L'expression "cendres volantes" a été créée vers 1930 par l'industrie de l'énergie électrique au moment où les quantités récupérées des résidus de charbon dans les centrales thermiques deviennent de plus en plus importantes (Karouite, 2003). Globalement, les définitions les plus courantes des cendres volantes sont analogues. Jarrige (1971) avait remarqué que les cendres sont les résidus solides de la combustion du charbon (houille, lignite, anthracite). En vue de produire de l'électricité dans des centrales thermiques, les cendres volantes sont le sous-produit principal de déchets solides fins, qui résultent de la combustion d'une matière fossile majoritairement carbonée d'origine végétale (le charbon) (Moufti et Mountadar, 2004; Ayrinhac, 2005). Karouite (2003) a aussi remarqué que les cendres volantes sont des fines particules recueillies lors du dépoussiérage des gaz résultant de la combustion du charbon pulvérisé, utilisé dans les centrales thermiques.

1.6.2 Origine

La combustion d'un combustible fossile solide qui est préalablement pulvérisé en vue de produire de la vapeur et injecté dans la chambre de combustion dans les centrales thermiques, conduit à deux types sous-produits: les cendres de foyer et les cendres volantes. Il est à noter que pour le moment le combustible comprend principalement le charbon qui reste une source d'énergie incontournable pour la production d'électricité mondiale et sera la dernière des énergies carbonées disponibles si la consommation croît au rythme actuel (Ayrinhac, 2005). Généralement, le processus principal de production des cendres volantes dans une centrale thermique est présenté ci-dessous (Figure 1.6.1).

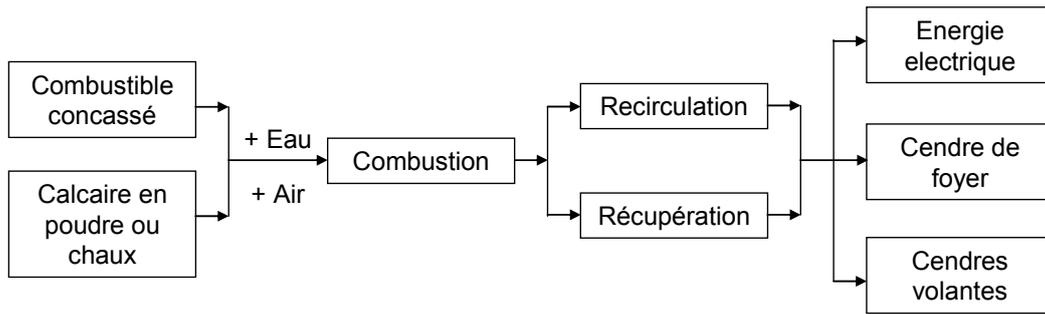


Figure 1.6.1: Principe de production des cendres volantes

1.6.3 Composition

La composition des cendres volantes dont la couleur varie du brun au gris et noir en fonction de la quantité de carbone non brûlé, est en relation avec les différents types de combustibles et les différents procédés de combustion utilisés dans les centrales thermiques. En ce qui concerne les cendres volantes du charbon, les constituants minéraux les plus communs sont les minéraux argileux: (illite et kaolinite), sulfures (pyrite et marcassite), carbonates (dolomite, ankérite, calcite et sidérite) et quartz (SiO_2) (Scheetz et Earle, 1998). D'une façon générale, on distingue deux grandes familles de cendres volantes selon leur composition chimique, sachant que les éléments principaux sont: le silicium, l'aluminium, le fer, le calcium et le magnésium.

- Cendre volante dite silico-alumineuse ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$): Elle se présente sous forme d'une poudre allant du gris au noir selon les teneurs en imbrûlés et en oxyde de fer (Karouite, 2003). Elle n'existe pas lorsque le combustible n'est pas du charbon (par exemple: coke de pétrole) (Ayrinhac, 2005). Les cendres volantes doivent comporter essentiellement de la silice réactive SiO_2 et de l'alumine Al_2O_3 , mais encore elle doit contenir d'autres oxydes, par exemple des oxydes de fer (Fe_2O_3 et Fe_3O_4), de la chaux (CaO), de la magnésie (MgO) et de l'anhydride sulfurique (SO_3). Notamment, la proportion de la chaux réactive CaO doit être inférieure à 5% en masse, et celle de la silice réactive doit être supérieure ou égale à 25% en masse (Karouite, 2003). Selon la norme NF P 98-110 (1991) («Produits»), la teneur importante en sulfates (>2.5%) et en soufre (>8%) ne permet pas de considérer cette cendre volante comme cendre silico-alumineuse dans le cas d'une utilisation en assise de chaussée. D'ailleurs, la teneur en carbone est admissible lorsque la perte en feu à 1000°C inférieure ou égale à 8%, et le pH des cendres volantes silico-alumineuses se situe autour de 10 («PREDIS-CV»).
- Cendre volante dite sulfo-calciq (ue ($\text{SO}_3 + \text{CaO}$): Sa principale caractéristique est qu'elle comprend une forte teneur en chaux (CaO) et en anhydride sulfurique (SO_3) par rapport aux cendres volantes silico-alumineuses. Les cendres volantes sulfo-calciques qui sont les résidus de la désulfuration des fumées ainsi présentent un taux de CaO beaucoup plus important que celles silico-alumineuses. Elle contient essentiellement de la chaux réactive, de la silice réactive et de l'alumine, c'est pourquoi elle est susceptible de faire prise sans liant en présence de l'eau. A ce titre, les cendres volantes sulfo-calciques peuvent être considérées comme de véritables ciments car elles sont proches des clinkers («PREDIS-CV»). La teneur en chaux réactive doit être supérieure ou égale à 5% en masse, et la

cendre volante contenant 5 et 15% de chaux réactive doit comprendre plus de 25% de silice réactive en masse («Produits»).

Du point de vue chimique, la silice et l'alumine sont les deux éléments majeurs qui sont associées à un diagramme triangulaire. Selon la Figure 1.6.2 ci-dessous, on peut observer que les cendres volantes de houille et de Gardanne dont les compositions sont différentes ne se placent pas dans la même zone du diagramme ternaire $\text{SiO}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$.

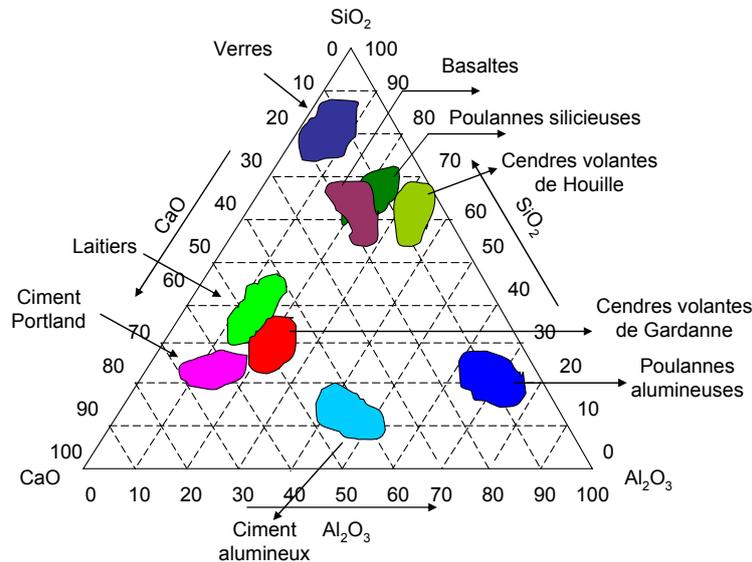


Figure 1.6.2: Cendres volantes dans le diagramme ternaire $\text{SiO}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$ de Keil-Rankin (Minoux, 1994)

1.6.4 Production des cendres volantes

Actuellement, les cendres volantes constituent un produit minéral pulvérulent résultant du dépoussiérage des fumées rejetées pendant le processus de production de l'électricité par les centrales thermiques qui utilisent les combustibles contenant les carbones. Dans le cas général, elles peuvent être considérées comme les résidus de combustion de certains combustibles, comme le lignite (65%-72% en carbone), le charbon sub-bitumineux (72%-76% en carbone), le charbon bitumineux (76%-90% en carbone) ainsi que l'anhracite (90%-95% en carbone) (Ayrinhac, 2005).

Pour l'instant, beaucoup de pays considère les charbons comme une source principale d'énergie électrique, comme en Chine et en Inde. Ce constat fait que l'on produit une grande quantité de cendres volantes en fournissant de l'électricité. A présent, 500 Mt de cendres volantes ont été produits annuellement dans le monde (Ahmaruzzaman, 2009). Stellacci et al (2009) ont estimé que la production mondiale en 2010 atteindrait 800 Mt/année. Le Tableau 1.6.1 qui regroupe les productions des cendres volantes dans divers pays, montre que la Chine et l'Inde produisent plus de cendres que les autres. Cela, dans une large mesure, est influencé par la situation d'un pays, le niveau de développement économique et la répartition des ressources naturelles dans leur pays respectif.

Pays/Région	Europe	Etats-Unis	Chine	Corée	Maroc	Inde	Turquie
Année	Par an	Par an	Par an	1997/2000	Par an	Par an	Par an
Quantité (Mt)	>50 (63 à 2005)	>70	>100	3.7/4.43	0.467	90	10

Mt : millions tonnes

Tableau 1.6.1: Production des cendres volantes dans plusieurs pays (Alkan et al, 1995; Ayrinhac, 2005; Chandra et al, 2005; Lee et al, 2008; Karouite, 2003; Kim et Prezzi, 2008)

1.6.5 Emploi des cendres volantes

Du point de vue globale, les propriétés des cendres volantes sont mises à profit dans les quatre domaines suivants: le génie civil, le traitement des sols et d’effluents, les applications minières et l’agriculture (Figure 1.6.3). Ce recyclage présente les avantages suivants: (1): contribution à la protection de l’environnement naturel et de cadre de vie; (2): contribution aux économies des matériaux traditionnels; (3): d’autant faible coût: \$15 par tonne selon Ahmaruzzaman (2009).

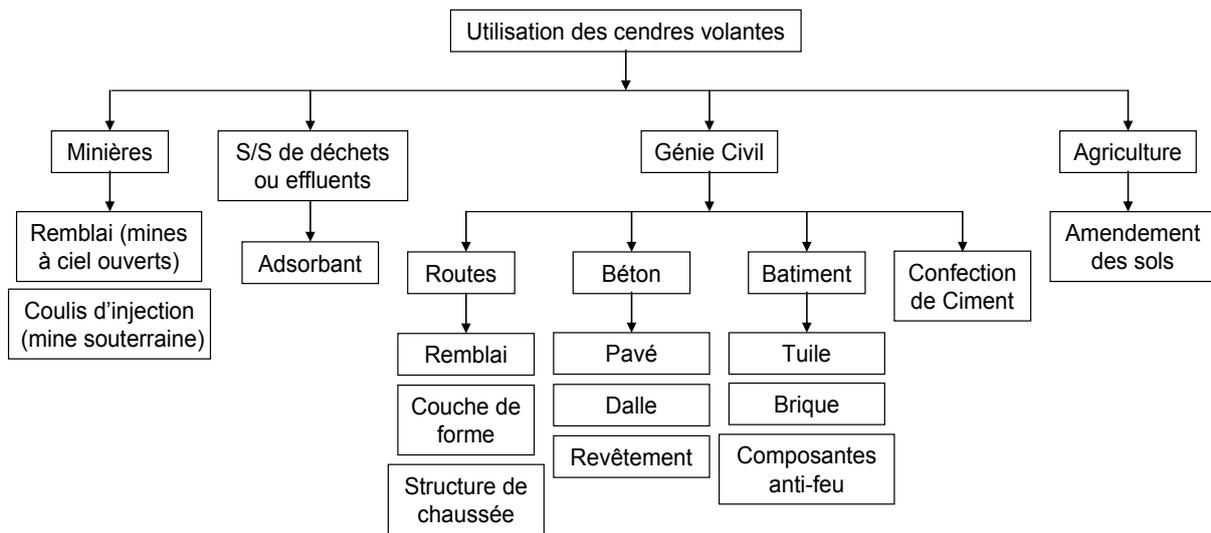


Figure 1.6.3: Emploi des cendres volantes

Pour trouver un débouché à ces déchets, plusieurs pays (USA, Europe, Chine, Inde...) proposent des valorisations dans plusieurs secteurs. Particulièrement, aux Etats-Unis et en Europe, les voies de valorisation des cendres volantes sont les suivantes: stabilisation/solidification de déchets et d’effluents, applications génie civil (la fabrication de béton et de ciment, l’utilisation en couches de forme), amendement de sols agricoles et applications minières (matériau de remblai dans les mines à ciel ouvert) (Klein, 1998). La répartition détaillée de l’emploi des cendres volantes dans le secteur du Génie civil en Europe est présentée dans la Figure 1.6.4, elle montre que les domaines comme la confection des bétons et des ciments, les cimenteries et les constructions de routes. Ils consomment environ 90% de la somme des cendres volantes produites.

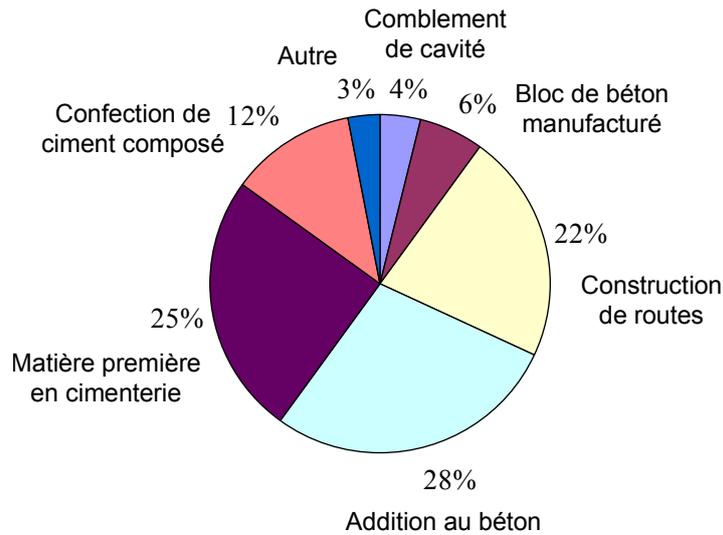


Figure 1.6.4: Répartition des cendres volantes en génie civil en Europe en 2002 (Ayrinhac, 2005)

L'emploi des cendres volantes dans différents pays s'appuie d'une part sur les caractéristiques des cendres volantes, d'autre part sur les conditions d'utilisation des ressources spécifiques dans les différents pays. Pour évaluer le niveau de recyclage des cendres volantes, le taux de réutilisation est défini, et son expression s'exprime par l'équation suivante (Equation 1.6.1).

$$\text{Taux de réutilisation} = \frac{\text{Quantité de cendres volantes réutilisées}}{\text{Production totale de cendres volantes}} \quad (1.6.1)$$

Basé sur le concept du taux de réutilisation, l'état de recyclage des cendres volantes dans quelques pays est reporté dans le Tableau 1.6.2 montrant que presque toutes les cendres volantes produites dans ces trois pays (Allemagne, Belgique, Etats-Unis) sont recyclées. L'organisation internationale de l'environnement Greenpeace en 2011 considère que le taux de réutilisation complète des cendres volantes en Chine est seulement environ 30% pour l'instant dans le rapport d'enquête « *Le vrai coût du charbon* ». En Inde, le taux de réutilisation des cendres volantes en Inde est faible à cause de ces facteurs: le frais de transport et l'hétérogénéité des cendres volantes produites par différents centrales thermiques. Mais globalement, moins de 25% des cendres volantes produites sont totalement réutilisées dans le monde (Bhattacharjee et al, 2002).

Pays	Allemagne	Belgique	Pays-Bas	Etats-Unis	Angleterre	Chine	Australie	Corée	Inde
Année	1996	1996	1996	1995	1998	1995 /2011	1995 /2008	2000	1996- 1997
Taux	>95%	>95%	>95%	32%	50%	40%/ 30%	20.6% /32.5%	54.6%	<10%

Tableau 1.6.2: Etat du recyclage des cendres volantes (Bhattacharjee et al, 2002; Cho et al, 2005; AADA; Rapport d'enquête « *Le vrai coût du charbon* », 2011)

1.6.6 Classification

Pour classer les cendres volantes de charbon, on peut utiliser plusieurs réglementations régionales et mondiales. Au niveau européen, d'après le «*Décret n° 2002-540 du 18 avril 2002 relatif à la classification des déchets (JO du 20 Avril 2002)*», il s'agit d'un résidu de procédé thermique (RPT) qui porte le numéro de code 10 (Tableau 1.6.3). On doit noter que les cendres volantes de charbon sont des déchets industriels, mais ils ne peuvent pas être considérés comme ni des déchets dangereux ni comme déchets industriels spéciaux.

Code	Description des déchets	Note
10	Déchets des procédés thermiques	
10 01	Déchets provenant de centrales électriques et d'autres installations de combustion (Autres que ceux visés au chapitre 19)	
10 01 02	Cendres volantes de charbon	
10 01 03	Cendres volantes de tourbe et de bois non traité	
10 01 04	Cendres volantes et cendres sous chaudière d'hydrocarbures	Déchets spéciaux
10 01 16	Cendres volantes résultant de la combustion de charbon et contenant des substances dangereuses	Déchets spéciaux
10 01 17	Cendres volantes résultant de la combustion de charbon, autres que celles visées à la rubrique 10 01 16	

Tableau 1.6.3: Classification des cendres volantes

Au niveau français, la «*Circulaire n° 96-85 du 11 octobre 1996 aux centres issus de la filtration des gaz de combustion de combustibles d'origine fossile dans des installations classées pour la protection de l'environnement (BO min. Equip. n° 1109-96/93 du 10 décembre 1996)*» présente que la plupart du temps les cendres peuvent être classées dans la catégorie des déchets inertes.

En Chine, «*La loi de la République populaire de Chine sur la prévention et la contrôle de la pollution environnementale des déchets solides*» (Edition revue, 2005, Ministère de protection de l'environnement, RPC) stipule que les cendres volantes sont considérées comme des déchets solides. On peut trouver les classifications des cendres volantes dans les différents pays sont conformes avec uns et aux autres.

1.6.7 Utilisation des cendres volantes dans le domaine géotechnique en Chine

L'accumulation de grandes quantités de cendres volantes non seulement occupe des terrains mais aussi pollue l'air et l'eau, même nuit à l'organisme humain et biologique. «*Rapport d'enquête sur les cendres volantes en 2010* » par l'organisation internationale GREENPEACE a déclaré que l'émission des cendres volantes est devenue la plus importante source de pollution parmi les déchets solides industriels en Chine. En 2009, la production des cendres volantes a atteint 375 millions de tonnes, et leur volume a atteint 424 millions mètres cubes. Cependant, le rapport d'enquête «*Le vrai cout du charbon* » publié par Greenpeace en 2011, a noté que: le taux de réutilisation complète des cendres volantes en Chine est en réalité seulement d'environ 30% pour l'instant.

En Chine, les cendres volantes sont non seulement réutilisées dans plusieurs domaines géotechniques, comme la construction de barrages, le traitement de fondations, la fabrication des bétons et de matériaux primaires de construction, mais aussi dans d'autres domaines comme la suppression des composants inorganiques dans les eaux usées, le synthèse de zéolithe et l'adsorbants

pour le nettoyage des gaz de combustion. L'étude bibliographique des cendres volantes dans le domaine géotechnique en Chine est présentée dans ce chapitre, en particulier pour les barrages de cendres volantes, les couches de chaussée et la fabrication du ciment et du béton.

(1) Barrage de cendres volantes : Beaucoup de barrages de cendres volantes ont été construits les années dans les vallées afin de stocker des millions de tonnes de cendres volantes en Chine (Huang et al, 1988; Zhang, 1988). Les vallées sont choisies grâce à leurs avantages suivants: grand volume, faible coût, faible pollution et faible occupation des sols. Cette méthode est encore mais rarement utilisée aujourd'hui en raison de la limitation environnementale et du développement d'autres méthodes, même si elle était populaire pour résoudre le problème de stockage de cendres volantes vers les années 80 en Chine.

(2) Matériaux de couches de chaussée : L'utilisation des cendres volantes en tant que matériau dans les routes et des projets périphériques est un débouché important pour les cendres volantes. Cela peut réduire des coûts de construction d'environ 10-20% et remplacer les granulats routiers d'une façon économique (Ahmaruzzaman, 2010). Les paramètres de cisaillement de beaucoup de cendres volantes peuvent satisfaire aux exigences des assises de chaussée et les résistances des cendres volantes de classe C peuvent dépasser celles des sols. Ceci est dû à la réaction pouzzolanique (Zhang et al, 2001). La résistance est due en partie à certaines cendres volantes ayant un auto-durcissement ou des propriétés pouzzolaniques, qui sont des caractéristiques plus communes aux cendres volantes de la Classe C. Zhou et al (2007) ont déclaré que les cendres volantes peuvent être utilisées en couches d'assise de chaussée après un traitement des cendres volantes. Cela peut fournir une grande quantité de nouveaux matériaux pour le domaine routier et contribuer à la protection de l'environnement menacée par le stockage des cendres volantes. L'utilisation des cendres volantes dans les travaux routiers a été pratiquée beaucoup en Chine (Zhang et al, 2001 ; Zhou et al, 2007; Wang et al, 2007). Le remplacement des sols par des cendres volantes voir la Figure 1.6.5 comme matériaux de la couche de forme non seulement diminue le tassement de la couche de forme, mais aussi réduit la masse totale de la chaussée.

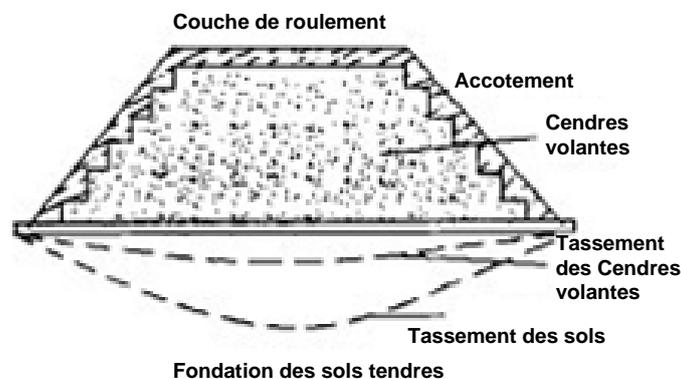


Figure 1.6.5: Cendres volantes utilisées en couches de forme (Zhang et al., 2001)

(3) Fabrication du ciment ou du béton : L'utilisation des cendres volantes semble être techniquement réalisable dans l'industrie du ciment. Il y a essentiellement trois demandes de cendres volantes dans le ciment: (1) le remplacement du ciment dans le béton en ciment Portland, (2) le matériau pouzzolanique dans la production du ciment et (3) les ingrédients mis en retardant en tant qu'un remplacement de gypse. The utilization of fly ash is en partie fondée sur des motifs économiques comme la pouzzolane pour le remplacement partiel du ciment, et en partie en raison de ses effets bénéfiques, tels que la demande plus faible d'eau, des saignements réduits et dégagement de chaleur inférieur (Hu et al, 2004; Shen et al, 2009). Hu et al (2004) ont indiqué qu'un ciment aux cendres volantes formulé basé sur plus de 50% de cendres volantes et un ciment Portland 42.5 peuvent

satisfaire à toutes les exigences du ciment Portland 32.5 définies par le standard chinois GB1344-1999. Ils ont rapporté que le ciment aux cendres volantes a les avantages suivants: bonne résistance à long terme, faible chaleur d'hydratation initiale, résistance à la corrosion chimique et prévention de la réaction alcali-granulats. Shen et al (2009) ont inventé un nouveau ciment spécial à fort volume de cendres volantes pour les couches d'assise de chaussée dans les travaux routiers, et ce ciment possède les caractéristiques suivantes: faible vitesse de prise et long temps de prise.

Les cendres volantes sont utilisées en particulier en grande masse et en grand volume pour des bétons en remplaçant partiellement ciment afin de réduire la chaleur d'hydratation et la fissuration à un âge précoce. Les bétons spéciaux à haute quantité de cendres volantes ont émergé comme un matériau spécial pour la construction. Ce type de béton contient plus de 30% des cendres volantes en masse des matériaux cimentaires. Beaucoup d'auteurs (Wu, 2005; Wu et al, 2005; Chen et al, 2007; Zheng et al, 2009) ont utilisé les cendres volantes de classe C et de classe F à haut volume dans le béton. Le fabrication du béton à fort volume de cendres volantes est faisable (Wu et al, 2005), et on peut atteindre 20 MPa à 3 jours de durcissement et 50 MPa à 28 jours de durcissement pour le béton à 70% des cendres volantes. Chen et al (2007) ont trouvé pour les bétons aux cendres volantes que la résistance initiale se développe à faible vitesse, plus la teneur en cendres volantes, et moins élevée la résistance initiale. Zheng et al (2009) ont étudié les propriétés des bétons cellulaires d'un point de vue physique, chimique et mécanique. Ils ont trouvé que le béton cellulaire possède des caractéristiques comme une faible masse volumique, une résistance élevée, une faible contraction et une faible déperdition de chaleur.

1.7 Interaction entre sédiments et liants

1.7.1 Liants

Afin d'améliorer les comportements mécaniques des sédiments comme matériaux premiers de construction, les correcteurs granulaires et/ou les ajouts de liants (ciment, chaux, liant hydraulique routier (LHR)) sont utilisés. Pour l'instant, lorsque l'on souhaite traiter un sol/sédiment, on le fait soit à la chaux, soit au ciment ou au liant hydraulique routier, ou bien en les associant. L'utilisation du ciment comme liant principal dans les procédés de solidification/stabilisation des déchets est largement reconnue, et les avantages qu'il procure sont les suivants: (a): Disponibilité et la constance des compositions à long terme; (b): Capacité d'absorption d'eau; (c): Matrice alcaline obtenue assure une faible solubilité de la majorité des métaux lourds; (d): Capacité d'augmentation de la résistance. Pour la chaux, elle est aussi utilisée grâce à (a): sa capacité d'augmentation de la résistance; (b): sa forte consommation d'eau; (c): son faible coût.

Ces dernières années, il y a plusieurs additifs qui ont été utilisés pour modifier le comportement mécanique, par exemple les cendres volantes, les fillers, les laitiers, les poussières de déchets de construction, les mâchefers etc. La norme NF P 15-301 (1994) aussi distingue les ajouts en fournissant une liste: laitiers de haut fourneau, pouzzolanes naturelles, cendres volantes, schistes calcinés, fumées de silice et fillers. Les cendres volantes sont de plus en plus employées à cause de leur faible coût et de leur grande disponibilité. En fait, les cendres volantes ont été définies comme "the finely divided residue resulting from the combustion of ground or powdered coal which is transported from the firebox through the boiler by flue gases; known in UK as pulverized fuel ash (pfa)" (ACI Committee 226, 1987). En raison de leurs propriétés pouzzolaniques, les cendres volantes peuvent être utilisées dans une grande variété de domaines, comme la production d'un ciment et d'un béton, la restauration des sols pollués, l'amendement des sols et les remblais.

La promotion de l'environnement et du développement durable exerce une pression sur la réutilisation des déchets. Avec une quantité croissante de déchets industriels et une forte demande de matériaux de construction, plusieurs matériaux qui sont considérés comme des déchets, par exemple

les sédiments, les boues, sont de plus en plus réutilisés dans les travaux publics. Beaucoup de chercheurs et de gestionnaires ont donc étudié la réutilisation des déchets. Vivian et al (2006) présentent une revue de l'état de l'utilisation des déchets de construction et des différentes techniques. Parmi les résidus les plus utilisés, on doit noter les déchets étudiés suivants: les poussières de roche (Ueno et al, 1996), les poussières de fours de cimenterie (Deok et al, 2008), les poussières de fonderie de fer et d'acier au four électrique à arc (Guray et al, 2008). Afin d'obtenir de meilleurs résultats, on ajoute toujours conjointement avec un agent activateur comme la chaux, le ciment ou les cendres volantes. En effet, les réactions pouzzolaniques ne sont pas possibles sans les activateurs.

1.7.2 Réaction sédiment/ciment

Le ciment peut être considéré comme un système chimique complexe contenant un certain nombre de phases qui peuvent réagir avec de l'eau et/ou une solution saline à des vitesses différentes. Par la cuisson (1450°C) puis refroidissement du cru: mélange de calcaire ($\approx 80\%$) et d'argile ($\approx 20\%$), on peut obtenir le clinker de ciment. Le ciment Portland résulte du broyage du clinker, du gypse ($\approx 5\%$) et d'éventuels ajouts. Il comprend 50-70% de silicate tricalcique (Ca_3SiO_5 or C_3S), 20-30% de silicate dicalcique (Ca_2SiO_4 or C_2S), 5-12% d'aluminate tricalcique ($\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ or C_3A), et 5-12% ferro-aluminate de calcium ($\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$ or C_4AF). Il se forme une gangue hydraulique durcissant rapidement et atteignant en peu de jours son maximum de résistance en présence de l'eau. Le processus de réaction du ciment avec de l'eau est appelé l'hydratation. Selon les recherches précédentes, deux modèles classiques de l'hydratation du ciment ont été déjà proposés: un modèle de cristal et un modèle de colloïde (Hansen, 1982; Yousuf et al, 1995).

Modèle de colloïde (Figure 1.7.1): Selon ce modèle, une membrane de C-S-H est formée dans la surface de la particule quand l'hydratation se produit. Cette membrane formée autour des particules solides permet l'entrée d'eau à l'intérieur au travers de la membrane et la migration d'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) grâce au potentiel osmotique. Nous devons prêter attention à ce modèle qui peut expliquer le retardement du durcissement en présence de métaux lourds (Tashiro et al, 1977).

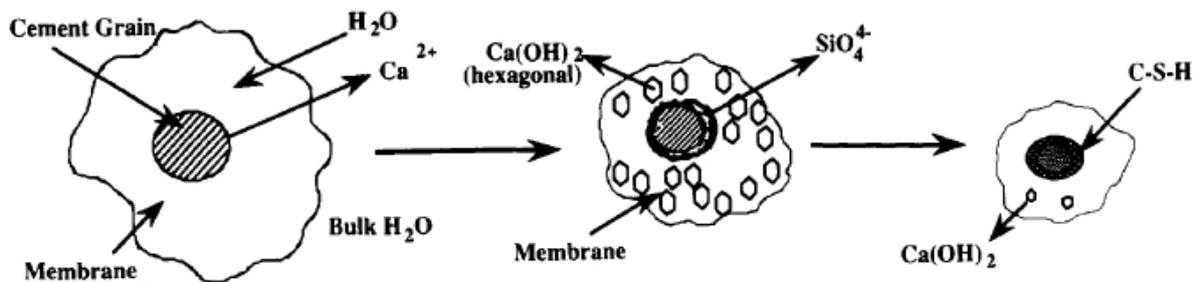


Figure 1.7.1: Modèle de colloïde d'hydratation du ciment

Modèle de cristal (Figure 1.7.2): Ce modèle suppose une fois que le ciment est mélangé avec de l'eau, les calciums de silicates sont dissociés en ion calcium et silicate chargé. Ces silicates d'ions (SiO_4^{4-}) se forment comme un film à la surface des grains du ciment et ce film empêche la réaction entre le ciment et l'eau. Cela peut retarder la libération de calcium et de silicate d'ions vers l'eau. Les particules de C-S-H se précipitent dans la couche des silicates dans la surface des particules du ciment.

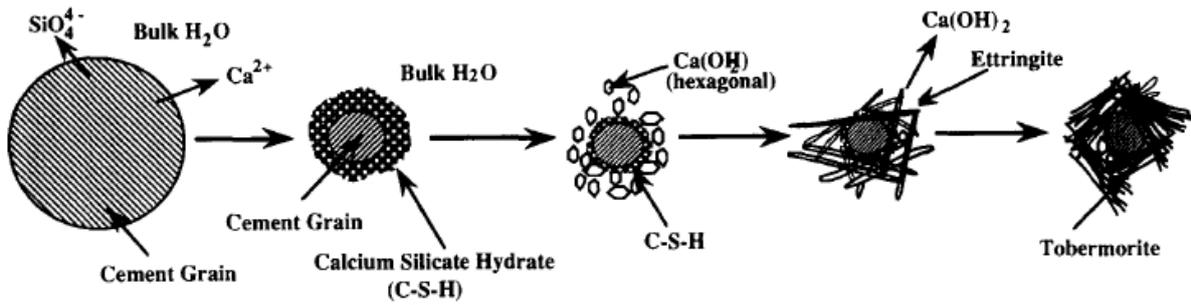


Figure 1.7.2: Modèle de cristal d'hydratation du ciment

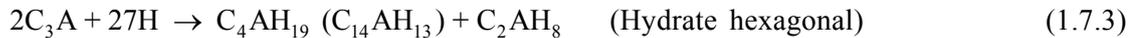
La cimentation du ciment Portland provient principalement de l'hydratation de l'alite (C_3S) et de la belite (C_2S). Environ deux tiers de l'hydratation s'achève en 28 jours (Glasser, 1997). L'hydratation de l'alite contrôle le durcissement et la résistance primaire du ciment. La présence de gypse entraîne la formation d'ettringite lors de l'hydratation, et l'ettringite se développe grâce à la réaction entre le gypse et l'aluminate de calcium. En général, les quatre périodes: réactions initiales, période dormante, période d'accélération et période de ralentissement, constituent le processus de l'hydratation du ciment.

L'hydratation de C_3S et C_2S est présentée selon les réactions suivantes (Equations 1.7.1 et 1.7.2).

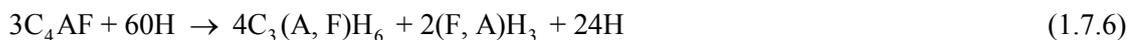


avec: $H=H_2O$, $C=CaO$, $S=SiO_2$.

L'hydratation de C_3A et C_4AF est expliquée à l'aide des équations 1.7.3-1.7.6.



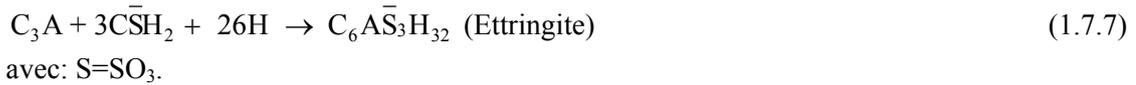
avec: $A=Al_2O_3$.



avec: $F=Fe_2O_3$.

D'après les explications énoncées ci-dessus, on peut savoir que les C_3A et C_2A réagissent immédiatement lors de la présence de l'eau, formant de l'ettringite et des C-S-H (métastables). Dans la période d'accélération, la sursaturation induit la précipitation de la portlandite, et il s'ensuit alors les mécanismes de dissolution, de nucléation et de précipitation des différentes phases, permettant la formation des hydrates (ettringite, portlandite, C-S-H). Cette activité chimique dégage beaucoup de chaleur. Dans la période de ralentissement, les grains anhydres s'empaquent d'une couche d'hydrates qui s'épaissit de plus en plus.

Les C_3A sont les plus actifs de tous les minéraux dans le ciment, et il exerce une grande influence sur la résistance primaire et la propriété rhéologique du ciment et du béton. Initialement, les C_3A forment en présence d'eau les hydrates hexagonaux métastables (C_4AH_{19} et C_2AH_8), qui sont alors convertis en hydrates cubiques stables (C_3AH_6). En présence de gypse ou sulfate calcique ($CaSO_4$) (régulateur de prise), les C_3A peuvent néanmoins être hydratés pour former l'ettringite selon la réaction (1.7.7).



La formation de l'ettringite s'accompagne d'un gonflement. Il faut savoir que la principale réaction dans un mélange sédiment/ciment provient de l'hydratation des constituants majeurs du ciment: les C_3S et les C_2S . Selon l'équation (1.7.8), les deux nouveaux composés qui sont les principaux agents liants du béton sont formés: l'hydroxyde de calcium (portlandite) et le silicate de calcium hydraté (C-S-H). Normalement, pour une hydratation complète du ciment, il faut un rapport E/C (E: eau, C: ciment) de 0.42 (Boutouil, 1998).



Contrairement à la chaux, la minéralogie et la granulométrie des sédiments traités au ciment influencent peu les réactions. En effet, la poudre de ciment contient tout ce dont elle a besoin pour réagir et former des produits cimentaires (Tremblay, 1998). La différence majeure est que les réactions pouzzolaniques consomment la chaux alors que le ciment la produit.

1.7.3 Réaction sédiment/chaux

L'utilisation de la chaux comme liant est très ancienne: la Grande Muraille de Chine est localement faite en argile traitée à la chaux et voies romaines. Le liant développe des liaisons dans le matériau. Sans ces liaisons le matériau serait trop déformable et sa portance trop faible. L'hydratation de la chaux vive au contact de l'eau contenue dans le sédiment provoque une quantité de consommation d'eau (Equation 1.7.9). Le contact de la chaux vive et de l'eau contenue dans le sédiment provoque la consommation de cette eau. Cette réaction est exothermique et c'est pourquoi cette réaction est mise à profit pour l'assèchement des sols fins humides et argileux. D'autre part, la chaux fournit de l'hydroxyde de calcium afin d'activer les pouzzolanes éventuellement présentes ou ajoutées dans les sédiments à traiter.



En effet, les réactions qui se produisent en présence de chaux dans les sédiments se résument comme suit (Choquette et al, 1987):

Echange cationique: L'ajout de chaux au sédiment provoque une modification de la qualité des matériaux argileux par échanges des cations alcalins (K^+ , Na^+) par des cations Ca^{2+} provenant de la chaux (Figure 1.7.3).

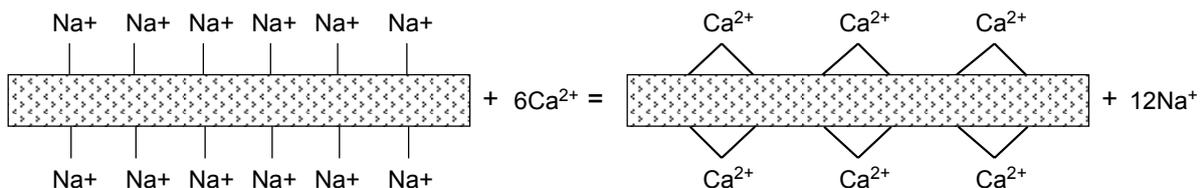


Figure 1.7.3: Schéma d'échange cationique

Agglomération et floculation: Échange cationique développe des forces électriques conduisant à l'agglomération des fines particules argileuses puis à des particules grossières et friables. La floculation intervient très rapidement et cause une modification de la plasticité du sédiment. D'après l'étude de Uppal et Chadda (1967), il existe une limite spécifique de la chaux: 3% (la masse sèche). Lorsque la chaux ajoutée dans le sol est inférieure 3%, elle va réagir principalement avec les argiles (éléments granulaires < 0.002 mm) formant des particules dont la taille varie entre 0.02 mm à 0.05 mm. Dans le cas où le pourcentage de la chaux serait supérieur à 3%, la taille des particules agglomérées par la présence de la chaux est supérieure à 0.075 mm.

Réaction pouzzolanique: La réaction entre la silice, l'alumine et la chaux produit normalement des agents cimentaires: C-S-H, C-A-H et C-A-S-H (Figure 1.7.4). Cette réaction est la plus importante, elle crée des liens de cimentation qui augmentent la résistance des sédiments. En ce qui concerne le temps de mûrissement, le tiers de la résistance finale est approximativement acquise pour les échantillons en 28 jours, et les trois quarts en 90 jours (Tremblay, 1998).

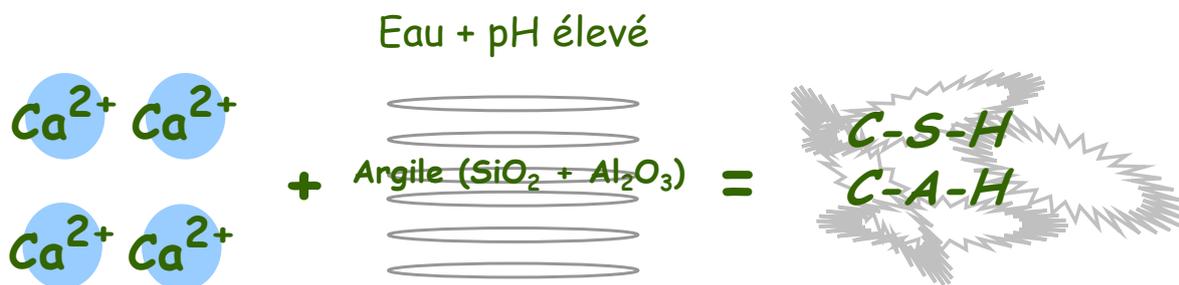


Figure 1.7.4: Diagramme de la réaction pouzzolanique

Carbonatation de la chaux: La chaux peut réagir avec le dioxyde de carbone de l'air en présence de l'eau pour former du carbonate de calcium, qui ne peut pas se dissoudre dans l'eau (Equation 1.7.10). Cette réaction est indésirable, car elle forme des liens de cimentation très fragiles.



Il est à noter que l'action de la chaux dépend de la teneur en eau, de la durée du traitement, de la teneur en chaux libre (élément actif), du compactage qui doit suivre rapidement le malaxage et de la finesse qui augmente la surface de contact.

1.8 Modification des propriétés après traitement

Le liant (ciment, chaux...) a un grand impact sur une variété de propriétés mécaniques, chimiques, physiques et environnementales. Généralement, les caractéristiques étudiées sont les limites d'Atterberg, la résistance en compression et à la traction, la résistance au cisaillement, l'essai triaxial, la perméabilité, la compressibilité et le gonflement etc.

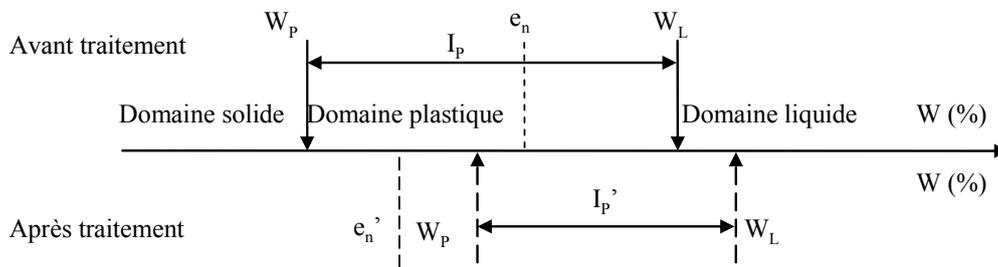
1.8.1 Limites d'Atterberg

Plusieurs études ont permis d'observer les changements causés par l'ajout d'un liant, cependant les conclusions sur les limites de liquidité et les limites de plasticité ne sont pas compatibles (Rahman, 1987; Osula, 1996; Al-Rawas et al., 2005). En effet, le changement des limites de

consistances en présence de liants est communément dû à l'effet de floculation et d'agrégation des particules après avoir ajouté des additifs chimiques (Brandl, 1981).

En ce qui concerne l'influence de la chaux et/ou du ciment sur les limites d'Atterberg, il y a des incohérences dans plusieurs études. Rahman (1987) a trouvé que les limites de plasticité et de liquidité de la latérite augmentent avec la teneur en chaux, l'augmentation de limite de plasticité est néanmoins plus lente que celle de la limite de liquidité. Il a aussi indiqué que l'indice de plasticité diminue au fur et à mesure que la teneur en chaux accroît. L'effet de la chaux sur les limites d'Atterberg a été exploré par Douglas (1991), ses résultats montrent que la limite de liquidité diminue et la limite de plasticité augmente avec l'augmentation de la teneur en chaux. Bell (1996) a évalué l'effet de la chaux sur la limite de liquidité et de plasticité de la kaolinite, de la polynite et du quartz. La relation entre l'indice de plasticité et le temps de durcissement de SSA (sewage sludge ash)/chaux éteinte a été étudiée, et l'indice de plasticité diminue beaucoup après le durcissement (Lin et al, 2007).

Il est clair que les modifications des limites dépendent de la quantité d'argiles, de limons et de sables. Le traitement à la chaux peut diminuer la teneur en eau des sols plastiques, neutraliser et floculer les argiles. Il s'ensuit une diminution de l'indice de plasticité (I_p), une augmentation de la limite de plasticité et de liquidité selon l'étude de Dupraz et Zohry (Figure 1.8.1).



- 1): Assèchement: la teneur en eau du sol avant traitement e_n est réduite à e_n' .
- 2): Floculation: le traitement à la chaux déplace vers la droite le domaine solide du sol.

Figure 1.8.1: Effet du traitement à la chaux sur la consistance des sols (Dupraz et Zohry)

Mais selon des recherches au LCPC, on observe généralement ces différents phénomènes: L'ajout de chaux mène à l'augmentation de la limite de plasticité et à la constance de la limite de liquidité (Figure 1.8.2).

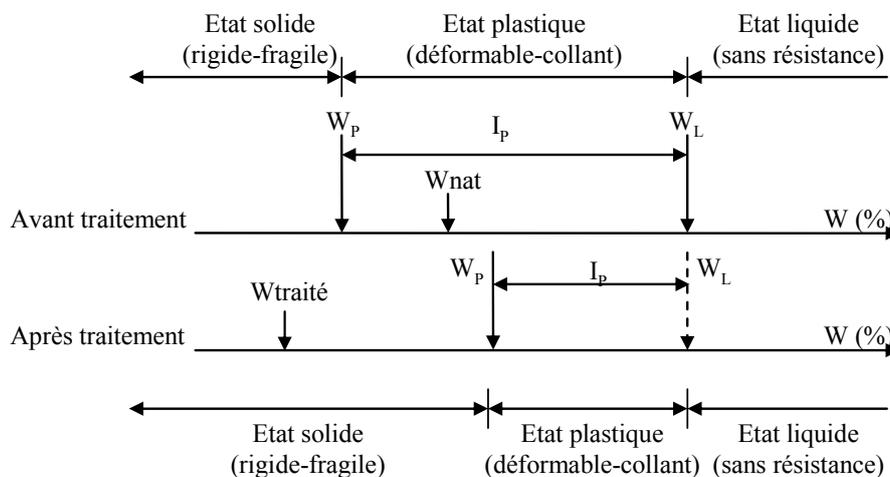


Figure 1.8.2: Modification des limites d'Atterberg (GTS, 2000)

Plusieurs auteurs (Osula, 1996; Al-Rawas et al, 2005; Rahman, 1987) ont étudié l'influence du ciment sur les limites d'Atterberg. Osula (1996) et Al-Rawas et al (2005) ont trouvé que la limite de liquidité et l'indice de plasticité diminuent avec la teneur en ciment, mais la limite de plasticité augmente. Rahman (1987) a indiqué que la limite de liquidité augmente avec la teneur en mixture (ciment et chaux), et cela contredit les résultats de Osula (1996) et d'Al-Rawas et al (2005).

1.8.2 Compactage

Le compactage est très important pour juger de l'applicabilité d'un matériau (traité ou non traité) dans le domaine routier. Les facteurs principaux qui influencent les propriétés du compactage comportent: la quantité de matières organiques, la teneur en eau, l'énergie de compactage et la composition de matériau. L'effet de la teneur en eau sur la masse volumique sèche et la sensibilité à la compacité est analysée dans la figure ci-dessous (Figure 1.8.3).

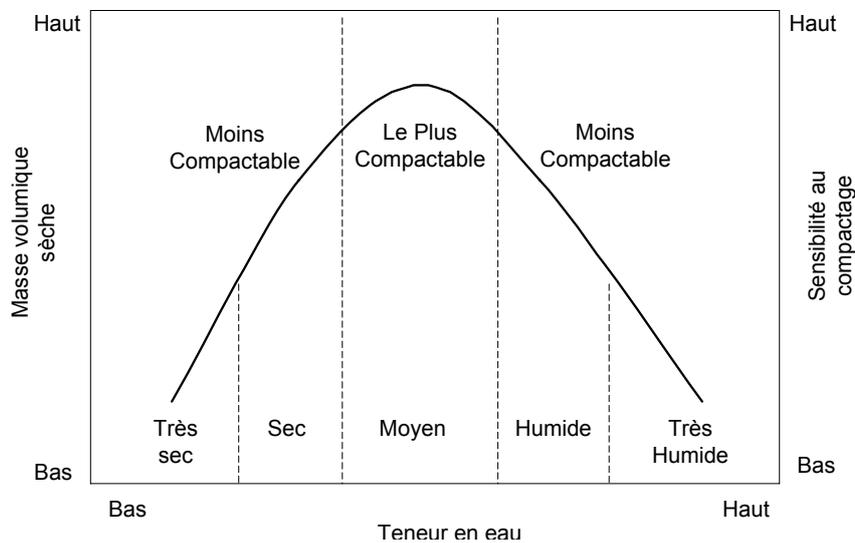


Figure 1.8.3: Relation entre la teneur en eau et la masse volumique sèche, sensibilité à la compacité

De nombreux auteurs ont mis l'accent sur l'impact du liant (ciment, chaux...) sur les caractéristiques du compactage d'un matériau envisagé. La masse volumique sèche et l'IPI sont les paramètres très importants pour juger de la portance d'un matériau. En général, la masse volumique diminue, alors que la teneur en eau et l'IPI index augmentent après un traitement avec de ciment et/ou de la chaux, par rapport au matériau non traité (Figure 1.8.4). Cette conclusion peut être tirée des études faites par beaucoup de chercheurs (Rekik et Boutouil, 2006; Dermatas et al, 2003; Bernert et al, 2000; Boutouil, 1998; Tran, 2009). Un traitement à 1% de CaO peut réduire de 1% à 5% de la teneur en eau, cela dépend dans une certaine mesure du temps et de la manière de malaxer.

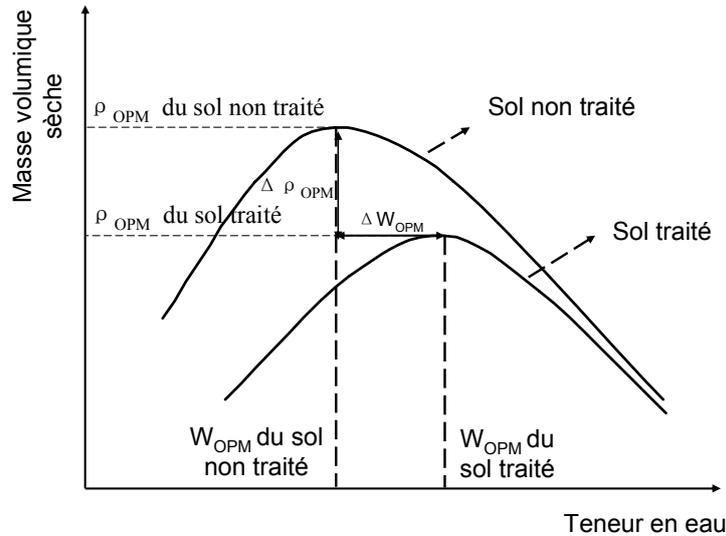


Figure 1.8.4: Modification de la courbe de compacité

1.8.3 Résistances à la compression et à la traction

La résistance à la compression et à la traction d'un sol/sédiment est une caractéristique très importante et un point délicat pour de nombreux d'universitaires et d'ingénieurs. Rahman (1987) a étudié l'évolution du CBR et de la résistance en compression avec l'augmentation de la quantité de ciment/chaux. Il a trouvé que la résistance maximale à la compression est atteinte lors de l'addition de 9% de ciment plus 9% de chaux. Cependant pour des raisons économiques et de CBR, le mélange de 3% de ciment plus 3% de chaux est choisi. Pour la kaolinite, la polynite et le quartz, les variations de la résistance en compression en fonction du temps du durcissement et de la teneur en chaux ont été abordées par Bell (1996). La résistance en compression de la latérite a été étudiée par certains auteurs (Samuel, 1977; Attoh-Okine, 1995). Zhu et al. (2005) ont recherché l'évolution de la résistance à la compression des sédiments marins pour différents pourcentages du ciment. Ils ont élaboré une formule statistique entre la résistance en compression et le contenu du ciment. Tran (2009) a montré que le pourcentage approprié de la chaux est de 2.5% selon l'évolution du pH. Il a mené beaucoup d'essais afin de mesurer la résistance en traction, la résistance en compression et le module d'élasticité des sédiments marins à différents dosages de ciment et de chaux.

1.8.4 Cisaillement

Beaucoup d'études ont été faites sur les propriétés relatives au cisaillement des sols/sédiments à l'aide de l'essai de Casagrande et de l'essai triaxial. Pour l'instant, de nombreuses études ont montré que le traitement des sols avec les liants hydrauliques (chaux et ciment) entraîne une augmentation de la résistance des sols traités par rapport aux sols non traités (Mahmood et al, 1986; Locat et al, 1996; Saitoh et al, 1986). Les études de ces auteurs montrent aussi que l'angle de frottement et la cohésion augmentent grâce à la présence de la chaux et du ciment.

Les liants que l'on peut utiliser pour améliorer les caractéristiques mécaniques des sols sont la chaux, le ciment, les cendres volantes, la fibre etc. Au cours de ces dernières années, les fibres attirent de plus en plus l'attention d'ingénieurs et de chercheurs. Tang et al (2007) ont analysé l'influence de ciment et de fibre sur la résistance en compression et la résistance au cisaillement direct des sols argileux après 28 jours de mûrissement. Ils ont tiré de leurs essais que les paramètres de cisaillement (l'angle de frottement et la cohésion) augmentent avec la teneur en chaux/fibre (5%, 10%, 15%). Sezer

et al (2006) et Türkel (2007) ont étudié sur l'impact des cendres volantes sur la résistance à la compression et au cisaillement direct, et trouvé que l'angle de frottement et la cohésion croissent avec la quantité de cendres volantes et du délai de mûrissement. L'essai du cisaillement de Casagrande de sédiments marins a déjà été effectué (Dubois, 2006; Zri, 2009), mais peu d'études se sont focalisées sur les propriétés du cisaillement des sédiments traités à la chaux ou au ciment.

Quelques recherches portent sur des essais triaxiaux sur des sols traités à la chaux ou au ciment (Chiu et al, 2008; Sariosseiri et Muhunthan, 2009; Lin et al, 2007). Les essais triaxiaux de Chiu et al (2008) réalisés en condition consolidée non drainée, montrent les influences du ciment et du temps de mûrissement sur les comportements en contrainte-déformation, les chemins des contraintes effectives. L'essai de compression et l'essai triaxial en condition consolidée non drainée pour les sols traités au ciment ont été analysés par Sariosseiri et Muhunthan (2009). Lin et al (2007) a exploré l'impact de la chaux (0%, 2%, 4%, 8%, 16%) et des pressions de confinement des triaxiaux en condition non drainée, non consolidée et non saturée. Ils ont trouvé que l'angle de frottement et la cohésion augmentent après l'ajout de la chaux.

1.8.5 Compressibilité

La compressibilité est une caractéristique très importante pour un matériau utilisé comme remblais en technique de fondation. Plusieurs auteurs ont étudié la compressibilité de sols naturels et de sols traités (Al-Amoudi et Abduljawwad, 1995; Rajasekaran et Narasimha Rao, 2002-a; Carlsten et Tränk, 1992; Narasimha Rao, 1993; Indraratna et Chowdhury, 1996). Al-Amoudi et Abduljawwad (1995) ont amélioré l'oedomètre traditionnel. Des différents essais oedométriques sur les sols Ras Al-Ghar sabkha pour comparer les résultats obtenus. Locat et al (1996) ont travaillé sur les comportements mécaniques de l'argile de Louiseville, et tracé des courbes de compressibilité unidimensionnelle sur l'argile de Louiseville traitée avec différents pourcentages de chaux. Ces courbes définissent une relation entre la compressibilité, la résistance, l'indice des vides et le pourcentage de la chaux ajoutée dans l'argile de Louiseville. Dubois (2006) a aussi exploré les caractéristiques de compressibilité des sédiments marins, mais on doit noter qu'il y avait peu d'études sur les comportements des compressibilités des sédiments marins traités aux liants hydrauliques.

Afin de réduire le tassement des sols et assurer la durabilité des ouvrages, le traitement au liant hydraulique ou au liant aérien est une solution convenable et recherchée. Indraratna et Chowdhury (1996) ont remarqué que la compressibilité des sols traités à la chaux est plus faible que celle des sols non traités, et ce phénomène est relié aux processus d'hydratation et de cimentation. Les résultats de Feng et al (2001) montrent que la pression de préconsolidation déduite est fonction de la teneur en ciment et de la période de cure du mélange vase-ciment. Locat et al (1996) ont vérifié que l'effet de la cimentation peut non seulement augmenter la pression de pré-consolidation, mais aussi l'indice de compression. Selon les résultats obtenus, on remarque que l'accroissement de la contrainte de pré-consolidation est lié à la maturation et à la quantité de chaux, et la contrainte de pré-consolidation augmente très rapidement avec la teneur en chaux pour une teneur supérieure à 2% de chaux. Nalbantoglu et Tuncer (2001) ont trouvé que l'apport de la chaux et des cendres volantes diminue la compressibilité des sols, et induit l'effet de pré-consolidation du fait du renforcement de la floculation et de l'agrégation.

1.8.6 Perméabilité

Mis à part l'augmentation de la résistance, l'ajout de la chaux ou du ciment peut aussi influencer la perméabilité des sols traités. Les facteurs qui influencent la perméabilité du sol traité sont: la teneur en eau, le temps de mûrissement, la composition du sol et la contrainte de confinement. Mais

Il faut noter que les résultats d'études concernant la conductivité hydraulique (souvent noté k) des sols traités au ciment ou à la chaux sont variables et parfois contradictoires. Plusieurs chercheurs mentionnent que la conductivité hydraulique des sols diminue après le traitement au liant (ciment, chaux) (Locat et al, 1996; Al-Tabaa et al, 1997), alors que d'autres affirment que la conductivité hydraulique augmente après le traitement (McCallister et Petry, 1992-a, 1992-b; Rajasekaran, 1993). Ainsi c'est difficile de tirer une conclusion générale sur l'effet de la chaux et/ou du ciment sur la conductivité hydraulique.

Les résultats des essais de McCallister et al (1992-a, 1992-b) ont indiqué que l'ajout de la chaux réduit considérablement la perméabilité du sol et la perméabilité atteint la valeur maximale à la quantité de LMO (lime modification optimum). L'effet de la cimentation sur le comportement mécanique du sol a déjà été exposé: la cimentation fait croître les pores pour les transports de l'eau, ainsi la perméabilité augmente (Rajasekaran, 1993). Locat et al (1996) mentionnent que la conductivité hydraulique diminue avec le temps suite au développement graduel des minéraux scellant qui cloisonnent les pores. L'étude de l'évolution de la conductivité hydraulique d'un sédiment argileux inorganique traité à la chaux montre que la conductivité hydraulique croît pour une teneur en chaux de 1% à 2%, et qu'elle diminue significativement pour la teneur en chaux de 5% à 10% (Locat et al., 1996). Nalbantoglu et Tuncer (2001) ont vérifié que la conductivité hydraulique augmente avec l'addition de la chaux, des cendres volantes et du mélange (chaux, cendre volante). Ils ont indiqué que la prorogation du temps de la cure conduit à l'augmentation de la conductivité hydraulique. Rajasekaran et Narasimha Rao (2002-b) ont également exploré l'effet de la chaux sur la caractéristique de perméabilité, et remarqué que la perméabilité des sols non traités est plus grande que les sols traités à la chaux.

1.8.7 Gonflement

Les phénomènes de gonflement de certains sols argileux à cause des pressions de gonflement peuvent induire des tassements différentiels affectant les structures qu'ils supportent, comme les canalisations, les fondations superficielles. Pour les sols gonflants, les grandes variations des caractéristiques sont liées principalement aux variations de leurs teneurs en eau à cause des variations des conditions climatiques. Lorsque celles-ci augmentent on assistera à un phénomène de gonflement du sol, et lorsqu'elles diminuent on observe, par contre un phénomène de retrait. Ce problème complexe dépend également dans une large part de la nature minéralogique des matériaux qui composent ces sols et de la proportion de ces composantes entre elles.

Certains auteurs (Derriche et Lazzali, 1997; Windal et Shahrour, 2001; Ali Al-Rawas et al, 2005; Yilmaz et Civelekoglu, 2009) ont axé leurs travaux sur l'application des techniques de stabilisation à ces sols gonflants par différents additifs, par exemple la chaux, le ciment, les cendres volantes et le gypse. Derriche et Lazzali (1997) ont montré que l'ajout de chaux vive sous différentes formes à une bentonite très gonflante, réduit son gonflement et améliore toutes ses propriétés mécaniques. La diminution du gonflement est liée à la réduction de la plasticité qui est due à une altération des films d'eau autour des minéraux argileux dans le sol. Ils ont aussi trouvé que, d'une part, plus la teneur en sable dans les sols est grande, plus l'amplitude et la pression de gonflement sont réduites; d'autre part une bonne partie du gonflement est encaissée par les vides existants entre les grains de sable. Windal et Shahrour (2001) ont présenté la mise au point d'un oedomètre flexible qui permet de réaliser des essais de gonflement avec mesure de la pression latérale. Mais le développement de la déformation latérale et de la pression latérale est principalement influencé par la rigidité de l'anneau, et les résultats obtenus doivent être confirmés par d'autres essais. Ali Al-Rawas et al (2005) ont montré que l'ajout du ciment et de la chaux diminue la pression du gonflement et le pourcentage du gonflement, et plus la teneur en chaux ou ciment, plus le gonflement et la pression de gonflement diminue. Yilmaz et Civelekoglu (2009) ont tenté d'utiliser du gypse pour stabiliser de la

bentonite et explorer la variation du gonflement en fonction de la teneur en gypse. La valeur du gonflement lie à la capacité d'échange cationique diminue considérablement avec l'augmentation de la quantité de gypse allant de 0% à 5%.

1.9 Effet des éléments néfastes

Normalement, les éléments néfastes contiennent les matières organiques, les métaux lourds et les matières inorganiques (sulfate, chlorure, nitrate...). La stabilisation des sols et des sédiments à l'aide du ciment et/ou de la chaux peut avantageusement immobiliser une partie des contaminants, et créer des barrières chimiques qui empêchent la dispersion des contaminants. Cette technique ne semble pas appropriée pour fixer des éléments organiques, même s'elle permet de stabiliser les métaux lourds.

1.9.1 Effet des matières organiques

Les études précédentes montrent que les matières organiques sont très difficiles à fixer à l'aide de ciment et/ou de chaux. Les principaux facteurs qui influencent l'immobilisation des contaminants organiques sont le taux de carbone organique, la température et le temps de durcissement et l'acidité.

Il est bien connu que la matière organique (MO) dans un sol possède une capacité de rétention d'eau très élevée. L'augmentation de la matière organique peut augmenter la limite de plasticité et de liquidité (Tremblay, 1998; Bennett et al, 1985). Husein Malkawi et al (1999) ont travaillé sur les effets des matières organiques sur les caractéristiques physiques et physicochimiques des sols. D'après les résultats, on peut trouver quelques conclusions intéressantes. L'indice de plasticité tout d'abord augmente lorsque la quantité de matière organique est faible, ensuite il diminue lors de la présence d'une forte quantité de matière organique. L'ajout de matières organiques élève la teneur en eau optimale et réduit la masse volumique et la capacité portante. Les matières organiques peuvent entraîner la diminution de la résistance et l'accroissement de la teneur en eau à la résistance maximale et du gonflement.

En fait, la chaux et le ciment peuvent réagir avec les fractions argileuses pour former l'agglomération des particules grâce à la réaction pouzzolanique et à l'échange d'ions. Dans le cas général, les matières organiques entravent le développement de cette réaction. Les matières organiques peuvent retarder le processus de durcissement du ciment du fait de la formation d'un film protecteur autour des particules de ciment (Sora et al, 2002; Paria et Yuet, 2006). Le développement des réactions de cimentation peut être retardé à cause de la présence de matières organiques qui peuvent consommer une quantité de produit de traitement pour neutraliser l'acidité du milieu (GTS, 2000). D'après l'étude de Fan et al (2005), il existe une teneur limite ($O_C=4.3\%$) en matière organique qui influence la résistance en compression des sédiments de dragage. Lorsque la teneur en matière organique est inférieure à O_C , la résistance en compression des sédiments descend rapidement vers celle correspondante à O_C . Lorsque la teneur en matière organique dans une intervalle de 1.39 à 5.78% est supérieure à O_C , la résistance est à peu près inchangée.

1.9.2 Présence des métaux

Les comportements des métaux lourds dans les sols/sédiments sont très complexes. Ils dépendent non seulement de la nature et de la proportion des différents composants dans le sol, mais aussi du pH, de la température, de la présence de chlorure et sulfures etc. Le pH influence beaucoup la

quantité de métaux en solution. Selon la recherche de Paria et Yuet (2006), nous pouvons conclure que le pH élevé de 10 à 12.5 favorise la précipitation de la plupart des métaux et la bande de pH efficace se situe entre 7 et 12.

Le mécanisme de rétention des métaux lourds dans les matériaux cimentaires ont déjà été discutés par plusieurs auteurs (Deschamps et al, 2006; Yousuf et al, 1995; Li et al, 2001; Minocha et al, 2003). Selon la recherche de Manceau et al (2002), Deschamps et al (2006) ont exploré les principales interaction entre un atome (ou une molécule) et un solide. Les processus physico-chimiques à l'interface solide/liquide sont: adsorption (adsorption physique, adsorption chimique), précipitation, substitution et inclusion (piégeage mécanique). Yousuf et al (1995) ont trouvé les interactions entre les contaminants et les particules de ciments (Figure 1.9.1). On peut s'apercevoir que les déchets peuvent réagir avec les ciments de la manière suivante: adsorption, précipitation, substitution, incorporation etc. Park (2000) a étudié l'effet de trois matériaux cimentaires sur le S/S (Solidification/Stabilisation) de déchets dangereux contenant des métaux lourds, et a déduit les mécanismes de S/S des métaux lourds: Le Pb (plomb) peut précipiter à la surface des hydrates, le Cr (chrome) peut être incorporé dans l'hydrate, notamment C-S-H, le Cd (cadmium) peut se substituer à l'ion de Calcium et former $CdCa(OH)_4$.

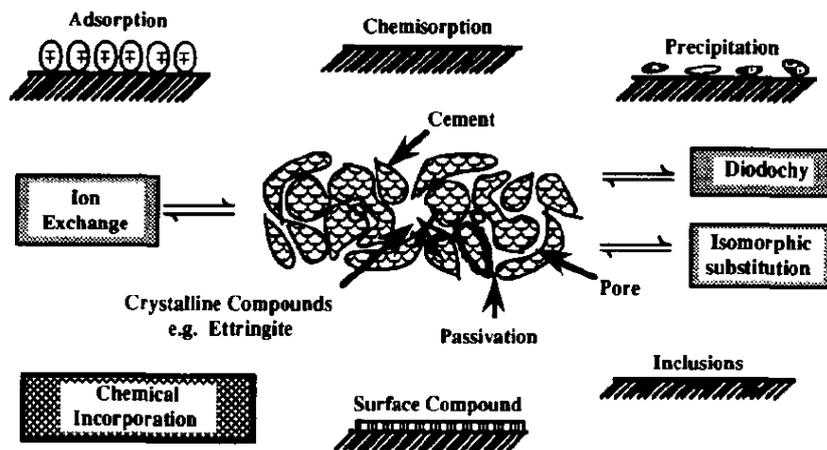


Figure 1.9.1: Les interactions possibles entre les contaminants et les particules de ciment (Yousuf et al, 1995)

Wang et Vipulanandan (2000) ont cru que l'addition de Cr(VI) inhibait l'hydratation du ciment et ainsi augmente le temps de la prise du ciment à la suite de sa réaction avec Ca^{2+} . Comme il est connu que plusieurs oxyanions des métaux lourds sont très mobiles dans les milieux alcalins, Chrysochoou et Dermatas (2006) ont indiqué que la formation de l'ettringite est un mécanisme viable pour l'immobilisation des oxyanions des métaux lourds. Kumpiene et al (2008) ont discuté la stabilisation des contaminants: As, Cr, Cu, Pb et Zn dans les sols traités. La restauration des sols ou des sédiments contaminés par les métaux lourds a été explorée par certains chercheurs (Peng et al, 2009; Mulligan et al, 2001; Sariosseiri et Muhunthan, 2009). Par ailleurs, la calcination à haute température peut-être est une technique viable pour immobiliser certains métaux lourds. Xu et al (2008) ont essayé de vérifier l'immobilisation d'ion de Chrome (Cr^{6+}) à travers un frittage au-dessus de $900^{\circ}C$ des boues d'épuration pour la fabrication de la céramique légère. Il a trouvé que cette technique peut en effet fixer le chrome hexavalent Cr^{6+} .

La capacité d'immobilisation des métaux lourds dépend fortement de leurs propriétés chimiques et du milieu dans lequel ils sont stabilisés. Le pH joue un rôle essentiel dans la solubilité des métaux lourds. En effet, grâce au processus d'hydratation des constituants du ciment, les hydrates formés précipitent et s'organisent en une structure mécaniquement résistante. Certains métaux lourds

sont fixés et leur mobilité est réduite en convertissant ces métaux lourds en hydroxydes insolubles à cause du pH élevé (11.5 à 12.5) du ciment hydraté. En même temps, dans cette gamme élevée de pH, la plupart des métaux lourds sont peu solubles (Boutouil, 1998).

Minocha et al (2003) ont prouvé que les éléments Cu et Pb peuvent réduire la résistance en compression, et ont également constaté que l'influence du Zinc (Zn) sur la résistance à la compression et la masse volumique est plus grande que celle des éléments: Cu et Pb. Le mécanisme d'empêchement de l'hydratation par certains hydroxydes de métaux a été expliqué par Hills et Pollard (1997). La Figure 1.9.2 explique ce mécanisme (Malviya et Chaudhary, 2006 (Hills et Pollard, 1997)). Ils ont trouvé que les hydroxydes de Cr, de Zn et de Fe aboutissent à l'entrave de l'hydratation du ciment en raison de l'effet de complexation ou de précipitation, et ces deux effets peuvent rendre la couche de gel (C-S-H) imperméable.

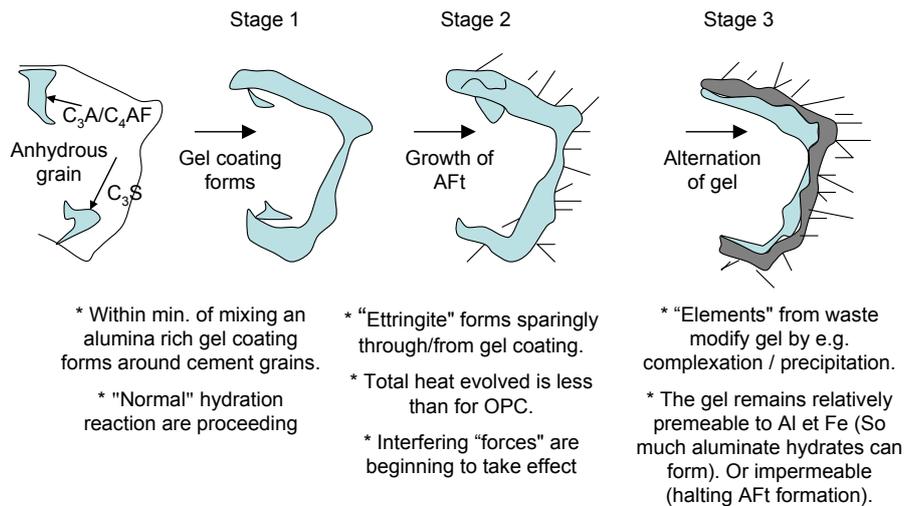


Figure 1.9.2: Mécanisme de l'empoisonnement généralisé de l'hydratation (Malviya et Chaudhary, 2006 (Source: Hills et Pollard, 1997))

1.10 Critères de recyclage dans les travaux routiers

L'avenir des matériaux dragués dépend de leur nature, et de leur concentration en polluants. Comme il a été précisé précédemment, beaucoup de matériaux comme les sédiments marins de dragage peuvent être réutilisés et recyclés selon les caractéristiques et le niveau de contamination dans plusieurs domaines: génie civil, industrie et agriculture etc. En 2003, les besoins en matériaux du BTP (Bâtiment et des Travaux Publics) en France se sont élevés à 408 millions de tonnes, et beaucoup de granulats restent inexploitable (Michel, 1997). Ces dernières années, une série de mesures de protection de l'environnement ont été introduites dans beaucoup de domaines. Le recyclage de sédiments marins doit donc respecter des règlements plus exigeants. Les sédiments marins comme des déchets, doivent être utilisés sans polluer l'environnement ou sur la base d'un risque acceptable pour l'environnement. Dans cette étude, nous présentons les critères et les raisons qui ont amené à explorer les possibilités de valorisation de sédiments marins dans les travaux routiers.

Pour être utilisé et valorisé en technique routière, plusieurs critères doivent être satisfaits pour un matériau potentiel. En France, les principaux paramètres jugeant l'adéquation d'un matériau pour une utilisation en assise de chaussée sont l'indice portant immédiat (IPI), la résistance en traction (Rt) et le module d'élasticité (E). Selon la norme française, l'essai Proctor (Normal et modifié) (NF P 94-093, 1997) et l'essai de traction (NF P 98-113, 1994) sont les essais les plus importants pour évaluer l'appropriation de sédiments marins comme matériaux de travaux routiers. L'indice IPI (Indice Portant

Immédiat) permet d'évaluer l'aptitude du matériau à supporter la circulation des engins (NF P 94-078, 1999). Selon la valeur de l'IPI, les caractéristiques des différentes couches sont présentées dans la Figure 1.10.1 (NF P 98-115, 1992). Les valeurs souhaitables de l'IPI ne doivent pas être inférieures à 25% pour la couche de forme, 35% pour la couche de fondation et 45% pour la couche de base. Colin (2003) a indiqué que les sédiments dragués peuvent être utilisés comme les matériaux routiers pour la couche de fondation de la chaussée.

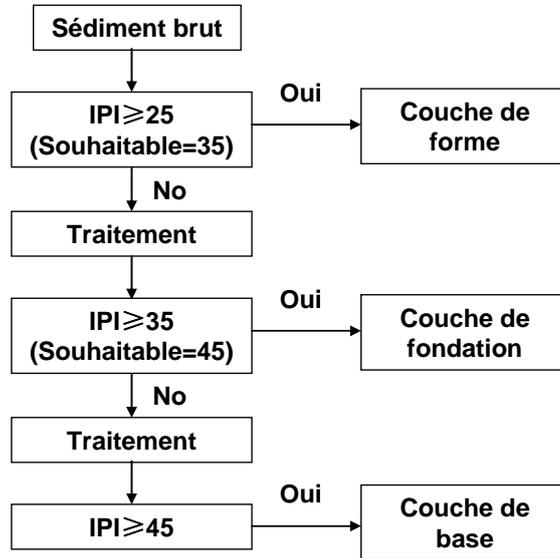


Figure 1.10.1: Critère de l'IPI pour les différentes couches de la chaussée

L'évaluation de la résistance en traction (R_t) et du module d'élasticité (E) est très important dans le processus de valorisation des matériaux. Les principaux paramètres permettent de déterminer l'adéquation du matériau pour une utilisation en assise de chaussée pour les matériaux traités aux liants hydrauliques. Afin d'évaluer la stabilité du matériau, les valeurs de ces paramètres sont reportées sur la Figure 1.10.2. La norme française (NF P 98-113, 1994) a cité six classes de S0 à S5 et recommand que les matériaux inférieurs à S2 ne puissent pas être utilisés en couche d'assise de chaussée.

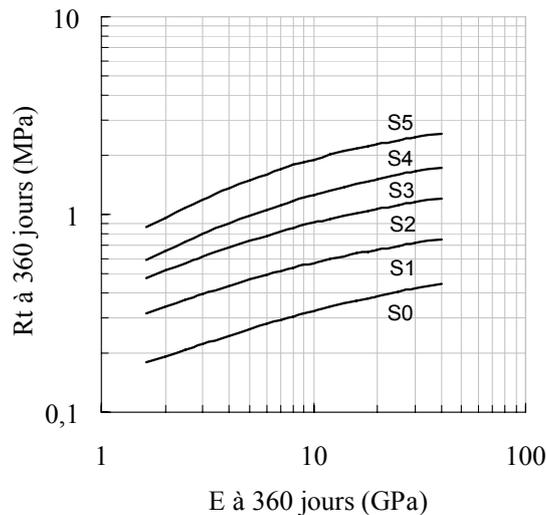


Figure 1.10.2: Classification des matériaux traités aux liants hydrauliques (NF P 98-113, 1994)

En général, la classification des matériaux est effectuée en raison de la valeur de la résistance en traction à 360 jours. Si la période ne permet pas de mesurer la résistance en traction à 360 jours et le module d'élasticité, on peut obtenir la résistance en traction et le module d'élasticité à 28 jours ou 90 jours. La résistance en traction et le module d'élasticité à 360 jours sont déterminés à partir des équations empiriques suivantes: Equation 1.10.1 et 1.10.2 (NF P 98-114-2, 1994).

$$\frac{R_{t28 \text{ jours}}}{R_{t360 \text{ jours}}} = 0,60 ; \quad \frac{E_{t28 \text{ jours}}}{E_{t360 \text{ jours}}} = 0,65 \quad (1.10.1)$$

$$\frac{R_{t90 \text{ jours}}}{R_{t360 \text{ jours}}} = 0,70 ; \quad \frac{E_{t90 \text{ jours}}}{E_{t360 \text{ jours}}} = 0,75 \quad (1.10.2)$$

D'ailleurs, les valeurs de gonflement volumique et de résistance en compression diamétrale peuvent s'interpréter conformément aux propositions du Tableau 1.10.1. On doit noter que le gonflement volumique doit être mesuré après 7 jours de délais de conservation à 20°C et à plus de 90% d'hydrométrie. Dans le cas douteux, la technique de traitement proposée peut être justifiée à l'aide d'autres caractéristiques du chantier. Dans le cas inadapté, la solution choisie de traitement ne peut être prioritairement appliquée.

Type de traitement	Aptitude du matériau au traitement	Paramètres considérés	
		Gonflement volumique G_{v7j} (%)	Résistance en compression diamétrale R_{tb} (MPa)
Traitement avec un liant hydraulique éventuellement associé à la chaux	Adapté	≤ 5	$\geq 0,2$
	Douteux	$5 \leq G_{v7j} \leq 10$	$0,1 \leq R_{tb} \leq 0,2$
	Inadapté	≥ 10	$\leq 0,1$
Traitement à la chaux seule	Adapté	≤ 5	Paramètre non considéré pour ce type de traitement du fait de la lenteur de la prise pouzzolanique
	Douteux	$5 \leq G_{v7j} \leq 10$	
	Inadapté	≥ 10	

Tableau 1.10.1: Critères de jugement de l'aptitude d'un sol traité à la chaux et/ou aux liants hydrauliques (NF P 94-100, 1999)

1.11 Généralités concernant le traitement des sédiments en Chine

En Chine, les liants utilisés pour la solidification/stabilisation des sédiments peuvent être classés en deux classes: liant traditionnel et nouveau liant. Les liants traditionnels concernent le ciment, la chaux et les déchets pouzzolaniques comme les cendres volantes, les laitiers de haut fourneau, les scories, les déchets d'acier, les déchets de gypse et les fumées de silice. On peut trouver que les compositions principales des liants traditionnels sont CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO et FeO. Les nouveaux liants sont utilisés en Chine ces dernières années pour diminuer la quantité de l'eau et améliorer les propriétés mécaniques des sédiments. Ils contiennent en général les liants spéciaux liquides, les polymères et les nanomatériaux. Le prix de revient des nouveaux liants est plus élevé que celui des liants traditionnels, bien que les nouveaux liants puissent solidifier les sédiments d'une meilleure façon.

Le traitement des sédiments avec les liants conduit inévitablement au changement de leurs propriétés physiques (Gao et Zheng, 1999; Deng, 2001; Zhang et al, 2004; Han et al, 2004). Han et al (2004) ont traité des sédiments de la teneur en eau de 62% avec du ciment. Ils ont trouvé que la densité spécifique des sédiments traités au ciment à 80-200g/kg est 1.611.65g/cm³. Gao et Zheng (1999) ont observé que les propriétés physiques des argiles limoneuses sont améliorées après ajout du ciment; l'indice de vide et la teneur en eau diminuent, lorsque la masse volumique est augmentée 0.3-0.6g/cm³ par rapport au sol non traité. Zhang et al (2004) ont étudié l'évolution des résistances des sols traités au ciment en fonction du temps de durcissement et de la teneur en ciment. Les résultats montrent qu'en comparaison avec le sol non-traité l'indice des vides des sédiments traités augmentent de 1.48-1.96 à 1.36-1.42.

En terme de résistance des sols traités, les études précédentes (Tang et al, 2000; Hou et al, 2000; Tang et al, 2001; Gu et Chen, 2002; Ji et al, 2004; Ding et al, 2004; Zhu et al, 2005) soulignent l'influence de la quantité du liant et du temps de durcissement sur la résistance en compression, la tension à limite d'élasticité et la résistance au cisaillement. Tang et al (2000, 2001) et Zhu et al (2005) ont étudié l'évolution de la résistance des sédiments traités au ciment et la teneur en ciment. Les résultats ont montré que la résistance des sédiments augmente linéairement avec la quantité du ciment ajoutée dans l'équation 1.11.1. Il existe une teneur minimale en ciment a_{cm} , et la résistance presque ne change pas lorsque la teneur en ciment est inférieure à a_{cm} .

$$q_u = k(a_c - a_{cm}) \quad (1.11.1)$$

où: q_u est la résistance en compression, kPa, k est le coefficient de solidification, kPa/(kg/m³), a_c est la teneur en ciment, kg/m³, a_{cm} est la teneur minimale en ciment, kg/m³.

Tang et al (2000) ont indiqué que la résistance en compression des sédiments traités au ciment dépend principalement de la teneur en ciment et de la teneur en eau, et proposé une simple formule empirique qui est exprimée par l'équation suivante. Cette équation 1.11.2 montre que la résistance en compression des sédiments mélangés avec le ciment augmente en proportion inverse de la valeur carrée de la teneur en eau w .

$$q_u = \frac{k(a_c - a_{cm})}{\left(w \frac{G_s}{100} + 1\right)^2} \quad (1.11.2)$$

où: q_u est la résistance en compression, kPa, k est le coefficient de solidification, kPa/(kg/m³), a_c est la teneur en ciment, kg/m³, a_{cm} est la teneur minimale en ciment, kg/m³, G_s est la densité spécifique.

Gu et Chen (2002) ont exploré la relation entre la fluidité et la résistance des sédiments traités à l'aide d'un cylindre creux, et obtenu la relation entre la résistance et la teneur en ciment satisfaisante l'exigence de fluidité. Gao et Zheng (1999) ont réalisé une série de tests au laboratoire, y compris l'essai en compression, l'essai en traction, l'essai de cisaillement et d'onde sonores. Les résultats expérimentaux ont montré que la résistance des sédiments traités est environ 10 fois plus élevée que celle des sédiments non-traités, mais elle dépend de la teneur en ciment, de la teneur en eau initiale et du temps de durcissement. D'après les résultats obtenus, l'évolution de la résistance en traction et au cisaillement évolue en conformité avec la résistance en compression pour les sédiments traités au ciment. La résistance en traction est en général 14% de la résistance en compression, lorsque la résistance au cisaillement est 14% de la résistance en compression. Ji et al (2004) ont traité des sédiments en utilisant du ciment et de la mousse plastique afin de formuler le sol léger, et la relation entre la contrainte et la déformation a été étudiée selon l'essai en compression. Li et al (1999) ont utilisé de la chaux éteinte, des cendres volantes, du ciment et d'autres liants à solidifier les sédiments.

Ils ont analysé la résistance, la durabilité et la vitesse de lixiviation des polluants à l'aide d'un essai en laboratoire. Ils ont essayé de trouver une formulation optimale et déterminer les pourcentages optimaux de tous les liants utilisés pour améliorer la durabilité et les propriétés mécanique et environnementales.

Han et al (2004) ont exploré l'effet du rapport C/E, de la teneur en ciment et du temps de durcissement sur les propriétés mécaniques et physiques. Les résultats expérimentaux ont montré que pour les sédiments traités au ciment leurs résistances en compression et au cisaillement augmentent évidemment en fonction de la croissance de la quantité du ciment et du temps de durcissement. Ding et al (2004) ont étudié les propriétés mécaniques des sols tendres à teneur en eau élevée en fonction de la quantité d'eau. Ils ont trouvé que la teneur en eau influence beaucoup la résistance des sédiments traités au ciment. Lorsque la teneur en eau initiale est inférieure à 80%, la résistance des sédiments traités augmente linéairement avec l'augmentation de la teneur en eau initiale, mais la résistance diminue significativement lors de la teneur en eau supérieure à 80%. Jia (2006) ont effectué une série d'essais en laboratoire et sur site afin d'étudier le rôle de l'eau pendant la processus d'hydratation du ciment et les facteurs influençant les propriétés mécaniques des sols traités. Pour les sols tendres de Shanghai en Chine, la teneur en eau optimale des sols traités au ciment aux temps de durcissement de 28 j et 90j est de 28% et 31%. Liu (1996) a réalisé des essais triaxiaux sur 170 échantillons compactés, et il a trouvé que la résistance des sédiments traités au ciment peut atteindre plus de 55% de la résistance limite en 10 jours, ensuite augmenter à la résistance limite puis se stabiliser en 60 jours. La teneur en eau influence beaucoup la résistance des sédiments traités, et la résistance augmente en fonction de la teneur en ciment en suivant une relation exponentielle.

En terme de déformation des sols traités, des travaux précédents (Liu, 1996; Tang et al, 2000; Zhu et al, 2005) ont aussi mis l'accent sur l'effet du liant, de la teneur en liant et du temps de durcissement sur la déformation. Liu (1996) a analysé la relation contrainte-déformation avec l'essai triaxial sur des sols traités au ciment. Les résultats montrent que l'évolution des courbes de contrainte-déformation s'accompagne d'un adoucissement. La déformation passe par trois étapes: étape élastique, étape élasto-plastique et étape plastique. Les résultats de Tang et al. (2000) et Zhu (2005) montrent que pour les sédiments traités au ciment la déformation à la rupture diminue avec la croissance de résistance en suivant une formule exponentielle, et elle diminue en suivant une fonction puissance avec l'augmentation de la quantité du ciment. La déformation à la rupture varie entre 1% et 2% pour les sédiments traités au ciment, lorsque le coefficient de déformation E_{50} et la résistance en compression q_u satisfont la relation $E_{50} = (100 - 200)q_u$. Zhu et al (2005) ont aussi observé que la relation contrainte-déformation varie d'une façon élasto-plastique à la façon plastique avec le temps et la teneur en ciment.

L'évaluation de la perméabilité est un paramètre important pour les sédiments traités comme les matériaux de la digue contre les inondations ou comme les matériaux anti-infiltration couche d'un site d'enfouissement des déchets. La perméabilité des sédiments traités au ciment est déterminée par la perméabilité des sédiments bruts et la réaction d'hydratation du ciment (Tang et al, 2000). Ils ont aussi trouvé que le coefficient de perméabilité diminue significativement, et plus élevée la teneur en ciment, moins le coefficient de perméabilité des sédiments traités. Gu et Chen (2002) ont fait l'essai de perméabilité sur des sédiments mélangés avec une quantité de ciment à 120 kg/m³. Ils ont trouvé un coefficient de perméabilité est de l'ordre de 10⁻⁶cm/s. Pour les sédiments à la teneur en eau de 62%, Han et al. (2004) ont trouvé que la perméabilité est dans l'ordre de 10⁻⁹cm/s après un traitement au ciment, et le rapport C/E, la teneur en ciment et le temps de durcissement ne peuvent pas conduire à un changement significatif de la perméabilité.

1.12 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons discuté de la gestion, du traitement et de la réutilisation des sédiments dans plusieurs domaines, particulièrement dans les travaux routiers et digues marines. Le recyclage des sédiments pollués et non pollués peut dans une certaine mesure soulager la pression liée à la pénurie de matériaux de construction. On doit noter que, quelques soient les voies de valorisation, le traitement des sédiments est obligatoire et doit satisfaire aux exigences environnementales, économiques et techniques. Ces dernières années, l'exigence environnementale devient de plus en plus importante.

L'utilisation de déchets industriels, déjà reconnus pour leur potentiel de valorisation en technique routière, pourrait aussi être envisageable. Les sédiments qui font l'objet de la présente étude, sont considérés comme les déchets, et leur utilisation doit assurer de ne pas porter atteinte au milieu environnant. En général, la stabilisation/solidification des sédiments à l'aide d'ajouts minéraux est bien connue. Les ajouts les plus couramment utilisés sont le ciment et la chaux, mais certaines contradictions persistent quant à leur effet, notamment concernant le changement de consistance des sédiments. Les sédiments présentent normalement de faibles propriétés mécaniques, mais l'ajout de ciment et de chaux peut améliorer les performances mécaniques pour une application dans les travaux, grâce à la réaction pouzzolanique et la réaction d'hydratation. Néanmoins les métaux lourds et les matières organiques empêchent les réactions entre les ajouts et les particules des sédiments et ainsi affecter la croissance de la résistance. Du reste, l'effet du ciment ou de la chaux sur les comportements mécaniques, physiques et chimiques des sédiments, comme les limites d'Atterberg, la granulométrie, la résistance en compression et en traction, la compressibilité et l'essai au cisaillement, a été résumée dans les paragraphes précédents.

Dans un contexte de développement durable et législatif de plus en plus sévère, la valorisation des sédiments reste pour l'instant à explorer au stade de la recherche, que ce soit dans la dépollution des sédiments ou dans la gestion des quantités importantes de matières, en respectant des critères techniques, économiques et environnementaux. La complexité des sédiments marins nécessite une caractérisation systématique pour mieux appréhender leurs comportements physiques, chimiques, mécaniques et environnementaux. Les travaux de cette thèse se placent dans une démarche de gestion globale des sédiments marins, en améliorant leurs comportements pour les valoriser efficacement dans le domaine routier en utilisant des techniques permettant un équilibre entre efficacité et coût.

Chapitre 2 Caractérisation des matériaux valorisés

Ce chapitre exposera les différentes caractéristiques physiques, chimiques, minéralogiques et environnementales des matériaux utilisés dans cette étude comme les sédiments dragués du Port Est de Dunkerque, les cendres volantes, le ciment et la chaux. L'objectif consiste à identifier les paramètres des sédiments et des cendres volantes tels que la granulométrie, l'argilosité, la teneur en matière organique, la masse volumique, la perte au feu et la teneur en eau initiale et d'identifier ultérieurement des solutions de valorisation. Les résultats minéralogiques et environnementaux permettent de mieux connaître la nature et les concentrations d'éléments polluants dans les sédiments étudiés et les cendres volantes utilisées. L'identification des sédiments bruts et des cendres volantes favorise la proposition d'une méthodologie générale de valorisation en technique routière à l'aide de liant. Enfin, les caractéristiques du ciment et de la chaux sont étudiées pour mieux connaître leurs propriétés et déterminer leurs quantités à ajouter dans les sédiments.

Partie 1 : Sédiments marins

2.1 Echantillonnage

Le Nord-Pas-de-Calais est une région administrative française, qui se situe entre la Picardie et la Manche à l'ouest de la Belgique. Il est composé de deux départements: le Nord et le Pas-de-Calais. En France le Pas-de-Calais est un des départements les plus peuplés et les plus urbanisés.

Au Nord de la France, les trois grands ports maritimes qui sont Boulogne-sur-Mer, Calais et Dunkerque, draguent un volume moyen annuel d'environ 2.5 millions de tonnes (matières sèches) (Foucher, 2005). Pour le Port de Dunkerque, environ 3 à 4 millions de m³ de matériaux bruts sont dragués chaque année. La France consomme en moyenne chaque année 400 millions de tonnes de granulats qui sont utilisés dans les domaines du bâtiment et du génie civil. Par conséquent, les sédiments dragués peuvent d'une part remplacer une partie des matériaux granulaires comme les matériaux de construction, et d'autre part assurer les accès des ports maritimes ou fluviaux.

Les sédiments marins étudiés dans cette thèse sont issus du Grand Port Maritime de Dunkerque. Premier port régional et troisième port de France, il réalise un trafic annuel de 57.7 millions de tonnes de marchandises. La zone industrielle de Dunkerque est caractérisée par une spécialisation dans différentes sources d'énergies (énergie nucléaire et éolienne, pétrole et pétrochimie, gaz etc.). Normalement, le port maritime de Dunkerque est composé du port Ouest et du port Est (Figure 2.1.1).

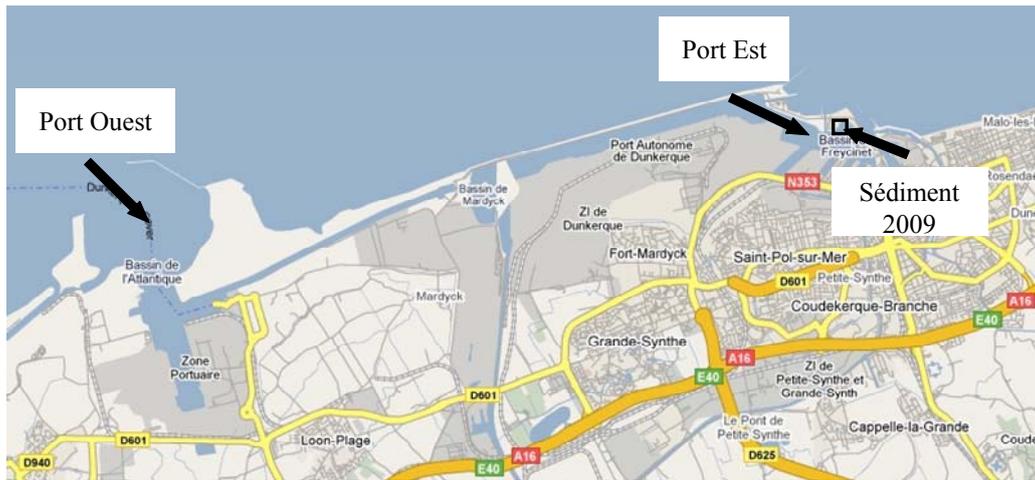


Figure 2.1.1: Port de Dunkerque et site du prélèvement de sédiments marins

Les sédiments étudiés sont dragués par une drague aspiratrice dans la zone du Port Est. On peut discerner la zone du prélèvement de sédiments marins à la Figure 2.1.1. Une fois que les sédiments sont dragués, ils sont, après homogénéisation, immédiatement stockés dans des fûts plastiques hermétiques d'un volume de 54 litres. Deux campagnes de prélèvement de la même zone ont été effectuées dans le cadre de projet PREDIS.

Selon les résultats de zonage «PREDIS» concernant les sédiments du Port de Dunkerque, 15 zones ont pu être définies. Les sédiments étudiés dans cette étude appartiennent à la zone des "DOCKS". Les analyses des contaminants et les granulométries des zones divisées sont présentées dans la Figure 2.1.2. Selon les résultats, on peut voir que les sédiments prélevés se placent dans la zone "Vases sableuses" avec un score de risque " $1.5 < \text{score de risque} < 2.0$ ", selon le guide régional «PREDIS». Celui détermine le score de risque en prenant en considération pour chaque contaminant analysé les scores de danger potentiel et de transfert et les scores de toxicité mesurée et de sensibilité de l'écosystème. Mais on doit noter qu'il est difficile de tirer des conclusions uniquement à partir de ces résultats. L'analyse de l'essai de lixiviation présentant les concentrations en contaminants est plus intéressante en terme d'identification de pollution.

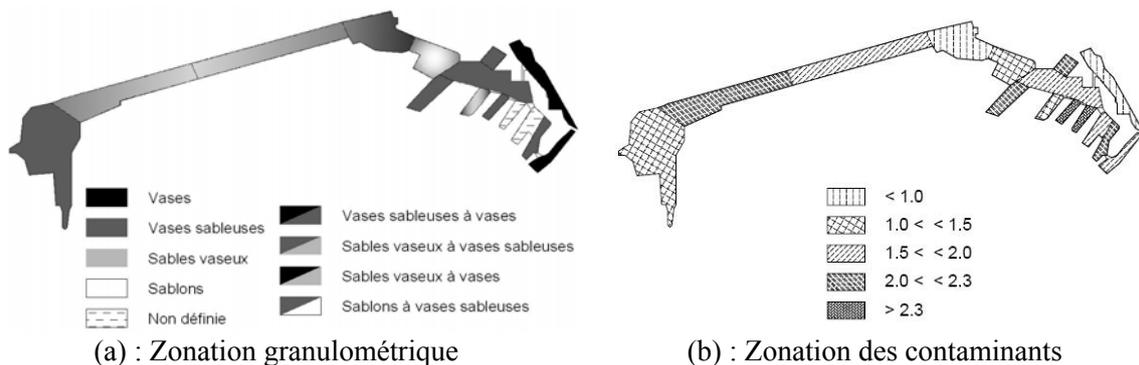


Figure 2.1.2: Le zonage du Port est de Dunkerque (PREDIS)

2.2 Caractérisation géotechnique

Dans cette partie, les propriétés physiques analysées forment la base scientifique et technique de la réutilisation envisagée des sédiments marins. En raison de leurs propriétés géotechniques

intrinsèques, on peut déterminer dans une certaine mesure le potentiel de la valorisation des matériaux et l'adaptabilité de leur application dans les domaines de la construction. Les caractéristiques suivantes sont déterminées en fonction d'une grande quantité d'essais, comme la mesure de leur teneur en eau, leur distribution granulométrique, leur valeur au bleu méthylène, leur masse volumique, leur teneur en matière organique et leur limite d'Atterberg etc.

2.2.1 Teneur en eau naturelle

La teneur en eau pondérale, qui est la plus intuitive, permet de décrire l'état hydrique d'un matériau. En géotechnique, la teneur en eau peut être mesurée directement en pesant d'abord l'échantillon de matériau, ce qui détermine une masse: m_h , puis le pesant après l'avoir passé pour faire s'évaporer l'eau complètement dans une étuve jusqu'à la masse constante: m_s . On obtient la valeur de la teneur en eau ($w\%$) selon la relation suivante:

$$w(\%) = \frac{m_h - m_s}{m_s} \times 100\% \quad (2.2.1)$$

Il existe une autre définition, notée ici w_h , qui est souvent employée par les pédologues: la masse d'eau divisée par la masse totale (Equation 2.2.2).

$$w_h(\%) = \frac{m_h - m_s}{m_h} \times 100\% = \frac{w}{w+1} \times 100\% \quad (2.2.2)$$

Afin d'évaluer la consistance des matériaux géotechniques, on utilise souvent la siccité notée S (%) (Equation 2.2.3).

$$S(\%) = \frac{m_s}{m_h} \times 100\% = \frac{1}{w+1} \times 100\% \quad (2.2.3)$$

Selon la norme NF P 94-050 (1995), le matériau doit être introduit dans une étuve à 40°C s'il est insensible à la chaleur et sinon à 105°C (XP CEN ISO/TS 17892-1, 2005). Dans cette partie, les mesures de la teneur en eau des sédiments marins ont été réalisées par trois moyens: dans un four à micro-ondes, dans une étuve à 40°C et à 105°C. Les résultats sont reportés dans le Tableau 2.2.1:

N°	Étuve à 40°C			Étuve à 105°C			Four à micro-ondes		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
w(%)	129.3	129.6	130.8	131.6	131.5	131.4	130.8	130.1	130.9
moyenne(%)		129.9			131.5			130.6	
S (%)	43.6	43.6	43.3	43.2	43.2	43.2	43.3	43.5	43.3
moyenne(%)		43.5			43.2			43.4	
w_h (%)	56.4	56.5	56.7	56.8	56.8	56.8	56.7	56.6	56.7
moyenne(%)		56.5			56.8			56.7	

Tableau 2.2.1: Les teneurs en eau initiales des sédiments

Généralement, il est difficile d'estimer précisément les teneurs en eau initiales des sédiments provenant des différents ports et même du même port. Elle dépend du site du prélèvement, de la nature

des matériaux dragués, de la méthode de prélèvement des sédiments. Dans le Tableau 2.2.2, on a comparé les valeurs de la teneur en eau de plusieurs ports français comme celles du port du Havre: de 150% à 180% (Boutouil, 1998), celles du port de Rouen: de 100% à 360% (Colin, 2003) et celles du port de Dunkerque: de 100% à 220% pour le port Est (Dubois, 2006; Tran, 2009; Miraoui, 2010) et environ 150% pour le port Ouest (Dubois, 2006). Pour les vases du Port de Havre, la teneur en eau est de 2 à 3 fois la limite de liquidité W_L ($2W_L < W < 3W_L$) (Boutouil, 1998).

Ports	Port du Havre	Port de Cherbourg	Port de Rouen	Port de Dunkerque	
				Port Ouest	Port Est
w initiale (%)	150 à 180%	140	100 à 360%	150%	100%, 150%, 205%, 220%

Tableau 2.2.2: Teneurs en eau des sédiments provenant de différents ports

Afin de suivre le procédé de déshydratation des sédiments dans l'étuve, la variation de la teneur en eau est décrite sur les trois échantillons (Figure 2.2.1). La teneur en eau diminue à une vitesse presque constante jusqu'à environ 30%, ensuite elle baisse à une vitesse diminuant graduellement jusqu'à atteindre son poids sec. En ce qui concerne la vitesse de réduction, elle atteint 4.2% par heure sur les 23 premières heures pour les échantillons séchés à 40°C et 28.2% par heure sur les premières 3 heures et demi pour les échantillons séchés à 105°C. Cette valeur diminuera jusqu'à ce que la quantité d'eau soit proche de zéro.

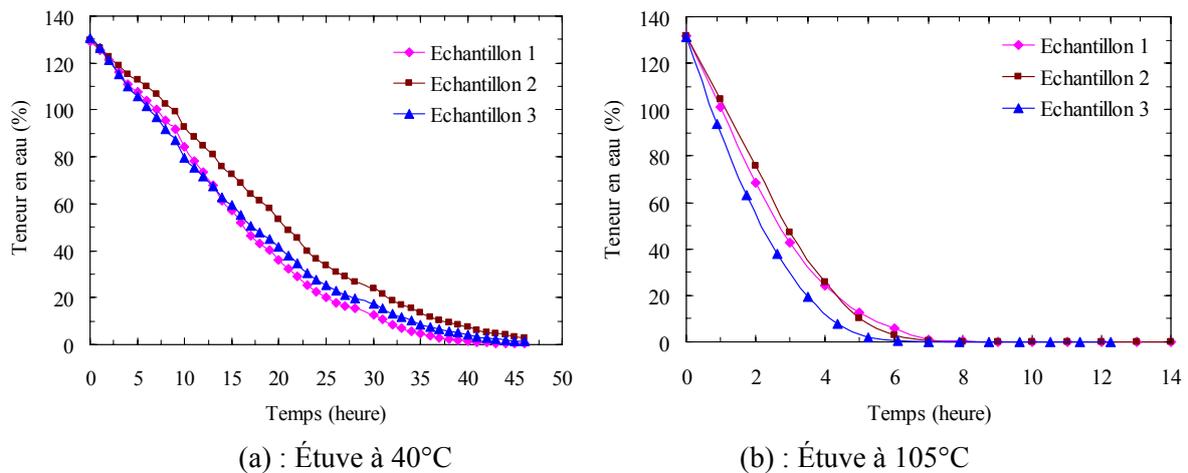


Figure 2.2.1: Évolution de la teneur en eau des sédiments marins en fonction du temps

2.2.2 Granulométrie

Le but de l'analyse granulométrique est de déterminer la distribution pondérale de la taille des différentes familles de grains des matériaux étudiés. Une courbe granulométrique permet d'évaluer quantitativement les différentes fractions des compositions granulométriques: argile, limon et sable ($argile < 2\mu m < limon < 63\mu m < sable$). Plusieurs méthodes sont couramment utilisées pour analyser la répartition granulométrique des matériaux géotechniques, comme le tamisage par voie humide (NF P 18-560, 1990; XP CEN ISO/TS 17892-4, 2005) et par voie sèche (NF P 94-056, 1996), la sédimentométrie par densimètre (NF P 94-057, 1992), la granulométrie au laser (chimique et

mécanique) (NF ISO 13320-1, 2000). Dans cette étude, les trois techniques: le tamisage par voie humide, la sédimentométrie par densimètre et la diffraction de rayon laser, seront utilisées.

➤ Tamisage par voie humide (NF P 18-560, 1990; XP CEN ISO/TS 17892-4, 2005)

Cette méthode consiste à fractionner un matériau granulaire au moyen d'une série de tamis de tailles décroissantes. Les dimensions des mailles sont choisies en fonction du but de l'essai et de la nature des échantillons. Les sédiments marins ont été passés par des tamis de 80 μ m, 0.125mm, 0.200mm, 0.315mm, 0.400mm, 0.500mm, 0.630mm, 1.0mm, 1.25mm, 1.6mm, 2.0mm et 3.15mm. Après avoir versé les sédiments dragués sur le tamis supérieur, on doit agiter les tamis manuellement ou mécaniquement ou bien mélanger les matériaux en les trempant avec de l'eau. Après tamisage, les refus sont récupérés et séchés jusqu'à atteindre leur masse sèche. La fraction inférieure à 80 μ m est alors analysée grâce au granulomètre laser (NF ISO 13320-1, 2000) ou au sédimentométrie par densimètre (NF P 94-057, 1992; XP CEN ISO/TS 17892-4, 2005).

➤ Sédimentométrie par densimètre (NF P 94-057, 1992; XP CEN ISO/TS 17892-4, 2005)

L'analyse granulométrique par sédimentométrie à l'aide d'un densimètre est utilisée pour des échantillons dont les particules sont supérieures à 1 μ m et inférieures à 80 μ m (1 μ m < particule < 80 μ m). Le principe de cet essai repose sur la sédimentation des particules en se fondant sur la loi de Stokes (Equation 2.2.4). Cette loi donne la force de frottement d'une sphère se déplaçant dans un fluide. Elle est utilisée pour calculer la vitesse de sédimentation, mesurer la viscosité d'un liquide, et analyser les particules en suspension. Il est nécessaire d'être prudent avec les résultats obtenus, car l'hypothèse selon laquelle les particules sont sphériques est incompatible avec la situation réelle.

$$v = \frac{2r^2 g \Delta(\rho)}{9\mu} \quad (2.2.4)$$

avec: v : vitesse limite de chute (en m/s)

r : rayon de la sphère (en m)

g : accélération (m/s^2)

$\Delta(\rho) = d_p - d_f$: différence de la masse volumique entre la particule et le fluide (en kg/m^3)

μ : viscosité du fluide (en Pa.s)

Après avoir séché les matériaux inférieurs à 80 μ m, on doit prélever un échantillon de celui-ci de 80g \pm 10g que l'on désagrège à l'aide d'un pilon dans le mortier. Les matériaux séparés sont alors placés dans 500ml d'eau déminéralisée contenant 60ml d'une solution à 0.5% de défloculant (hexamétophosphate de sodium). On complète la solution par de l'eau déminéralisée jusqu'à 2000ml après une imbibition pendant au moins 15 h et une agitation mécanique pendant 3 minutes minimum à 10000 tr/min à la température ambiante. On relève alors la densité de la solution à 0.0001 près aux temps suivants: 0.5, 1, 2, 5, 10, 30, 60, 120, 240, 1440 (en minutes). Ensuite, d'après la norme NF P 94-057 (1992), on peut calculer les pourcentages d'éléments inférieurs à 80 μ m à chaque diamètre équivalent à des particules.

➤ Granulométrie au laser (NF ISO 13320-1, 2000)

La granulométrie laser est une technique créée dans les années 1970. Son principe repose sur la diffraction d'un faisceau laser à la rencontre des particules en suspension dans un fluide. De plus, on considère que les particules sont sphériques, opaques et non poreuses. L'angle de diffraction de la lumière est inversement proportionnel à la taille des particules étudiées. Le granulomètre laser utilisé est un appareil marqué COULTER type LS 230, permettant de mesurer des particules de 0.04 μ m à 2000 μ m.

Généralement, on peut désagréger et séparer les petites particules des sédiments de deux façons suivantes: par une méthode chimique et par une méthode mécanique. Pour la méthode chimique, une solution d'hexamétaphosphate de sodium à 0.5% de concentration est employée. Pour la méthode mécanique, on effectue une désagrégation à l'aide d'ultrasons pendant 2 minutes. Cependant l'agitation excessive va entraîner une agrégation des particules des sédiments. Il convient donc de comparer les résultats obtenus par les deux méthodes pour avoir une bonne connaissance de la différence des résultats obtenus.

Basé sur les principes ci-dessus, on adopte quatre moyens pour déterminer les granulométries des sédiments marins. Celles-ci sont: (a) tamisage + sédimentométrie, (b) granulométrie laser + agent de désagrégation, (c) granulométrie laser + ultrasons, (d) granulométrie laser. La Figure 2.2.2 et 2.2.3 présentent respectivement les répartitions granulométriques et les répartitions granulométriques volumiques cumulées des sédiments dragués à l'aide des différentes méthodes. La granulométrie laser est réalisée sur environ 10 mesures des sédiments bruts, en utilisant le modèle Fraunhofer permettant le calcul d'une distribution de taille de particules sphériques.

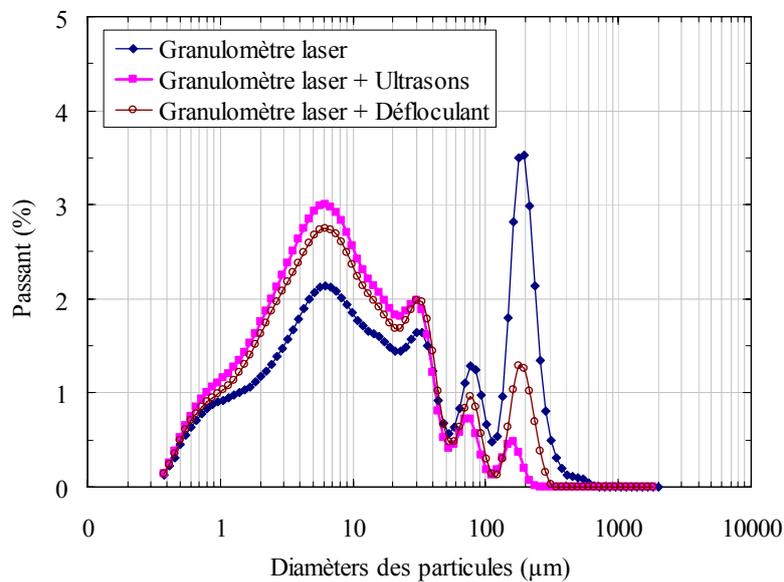


Figure 2.2.2 : Répartitions granulométriques des sédiments

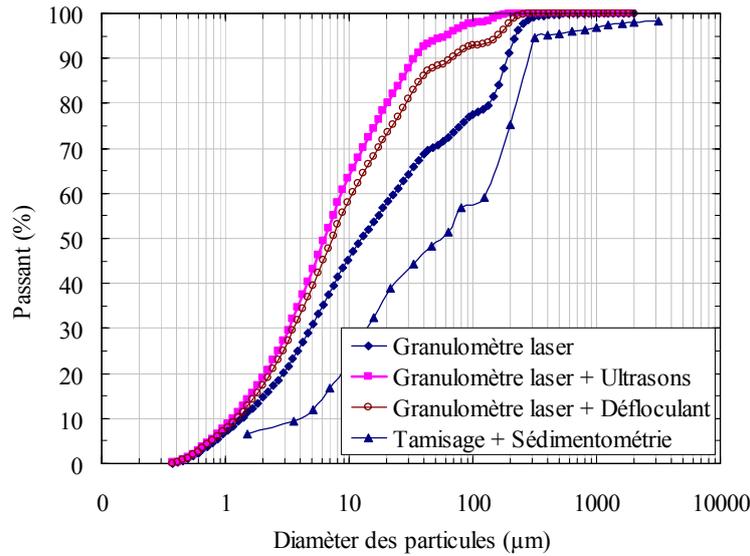


Figure 2.2.3 : Distributions granulométriques cumulées des sédiments

La répartition de la taille des particules (Figure 2.2.2) confirme que les sédiments de dragage contiennent une forte proportion de particules de taille de $1\mu\text{m}$ à $100\mu\text{m}$. Pour les sédiments marins, les résultats obtenus au moyen de différentes méthodes mettent en évidence une divergence des courbes de distribution granulométrique. Plus particulièrement, les distributions granulométriques par la technique laser diffèrent considérablement de celles obtenues par la sédimentométrie associée au tamisage.

Les résultats obtenus par la diffraction laser sous-estime la quantité de particules d'argile de 20% à 70% par rapport aux résultats obtenus par la méthode sédimentométrique (McCave et al., 1986; Lozeau et al., 1994). Dans cette étude, une tendance différente est observée. Les essais réalisés sur les sédiments de dragage diffèrent des conclusions des recherches précédentes. Konert et al. (1997) ont indiqué que l'analyse réalisée par la technique laser sur des particules de sédiments supérieures à $63\mu\text{m}$ donne des résultats légèrement plus élevés que le tamisage. Cependant pour les sédiments étudiés, une tendance inverse est observée: la pourcentage des fractions sableuses par la technique laser est remarquablement inférieure à celle obtenue par la tamisage.

A partir des résultats obtenus, il semble qu'il soit difficile de tirer une conclusion sur le degré de coïncidence des résultats obtenus par les différentes méthodes. Les différences tiennent à plusieurs facteurs, par exemple, la différence du principe des essais utilisés et l'hétérogénéité des matériaux (la matière organique, le sel, la forme des particules). Grâce à la répartition granulométrique des sédiments de dragage, leurs paramètres granulométriques caractéristiques peuvent être déterminés (Tableau 2.2.3).

Tailles des particules	Classification (GTR, 1992)	Laser	Laser + Déflocculant	Laser + Ultrasons	Tamisage + Sédimentométrie
$< 2\mu\text{m}$	Fraction argileuse (%)	11.4	14.5	16.4	2.3
$2\mu\text{m}$ à $63\mu\text{m}$	Fraction silteuse (%)	66.6	74.7	74.2	49.1
$> 63\mu\text{m}$	Fraction sableuse (%)	22.0	10.8	9.4	48.6

Tableau 2.2.3 : Récapitulatif des fractions granulométriques des sédiments de dragage

Afin de décrire le degré d'étalement et l'uniformité de la granulométrie, plusieurs indices sont employés: C_U (Equation 2.2.5), C_C (Equation 2.2.6). Ces coefficients C_U et C_C sont immédiatement calculés à partir de la courbe granulométrique (Tableau 2.2.4).

Si $C_U < 2$, la granulométrie est uniforme (ou serrée).

Si $C_U > 2$, la granulométrie est étalée (ou variée).

Si C_C est compris entre 1 et 3, la granulométrie est bien graduée.

$$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (2.2.5)$$

$$C_C = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{10}} \quad (2.2.6)$$

avec: D_y : dimension du tamis correspondant à $y\%$ de passants.

D'ailleurs, on peut améliorer les distributions granulométriques en améliorant les indices C_U et C_C . Pour avoir une granulométrie bien graduée et étalée, le coefficient de courbure (C_C) doit être compris entre 1 et 3 ($1 < C_U < 3$), et le coefficient d'uniformité (C_U) doit être supérieure à 6 ($C_C > 6$). Tous les coefficients d'uniformité sont supérieurs à 6, lorsque les coefficients de courbure obtenus par la technique laser s'approchent de 1. Le coefficient de courbure obtenu par le tamisage et par sédimentométrie pour sa part est éloigné de 1.

Paramètres	Laser (SD brut)	Laser + Défloculant	Laser + Ultrasons	Tamisage + Sédimentométrie
D_{10} (μm)	1.77	1.41	1.28	7.00
D_{30} (μm)	5.50	4.48	3.73	14.83
D_{60} (μm)	20.80	14.09	10.84	129.60
C_C	11.75	9.99	8.47	18.51
C_U	0.82	1.01	1.00	0.24

Tableau 2.2.4: Caractéristiques granulométriques des sédiments de dragage

Du point de vue granulométrique, on peut classer les sédiments de dragage en fonction de la classification triangulaire des sols fins (Figure 2.2.4). Dans cette étude, les sédiments prélevés en 2009 peuvent être classés en limon sableux d'après les résultats issus de la combinaison de la méthode par tamisage avec la sédimentométrie. Les résultats issus de la granulométrie laser permettent de classer le matériau comme un limon silteux. La méthode utilisée pour séparer les particules fines (défloculant ou ultrasons) ne change pas la classification des sédiments. La classification des sédiments à l'aide de la technique laser dans cette étude correspond à celle des sédiments étudiés par Tran (2009), mais elle n'est pas coïncidente avec la classification des sédiments considérés comme silts selon les résultats obtenus par Miraoui (2010).

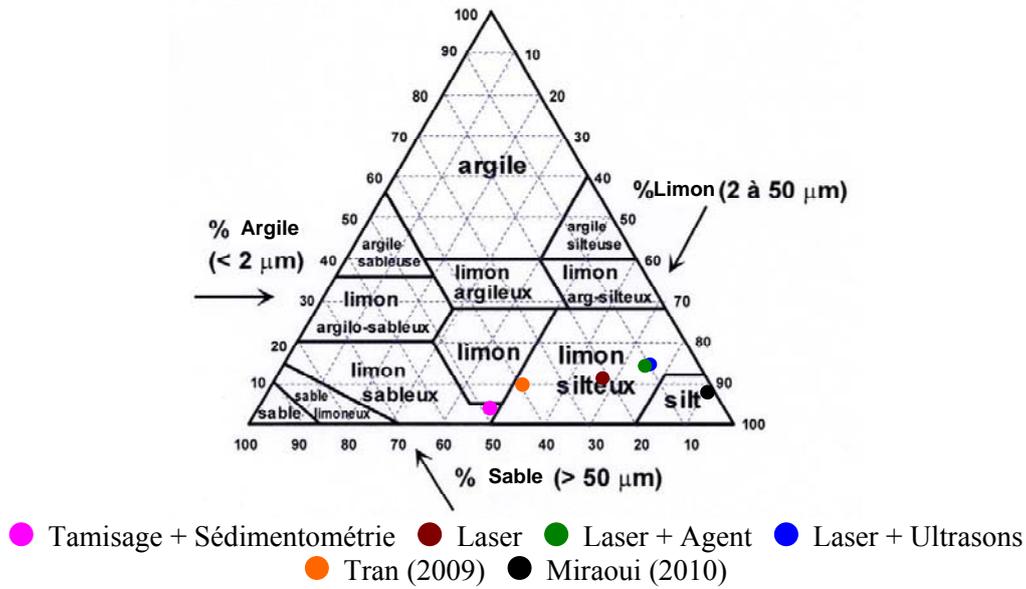


Figure 2.2.4 : Classification des sédiments marins dans la classification triangulaire des sols fins (Bonnet, 2000)

2.2.3 Masse volumique absolue et apparente

2.2.3.1 Masse volumique absolue

La masse volumique absolue est une grandeur physique, qui caractérise la masse d'un matériau par unité de volume. Les masses volumiques absolues des particules solides des matériaux étudiés ont été mesurées grâce à un pycnomètre à hélium de marque MICROMERITICS-ACCUPYC 1330. Cet appareil permet de mesurer le volume des objets solides de forme régulière ou irrégulière: poudres, pâtes et pièces.

L'échantillon séché et broyé, est introduit à l'état de poudre dans une cellule spécifique. Après avoir placé la cellule dans l'appareil, l'hélium est injecté pour chasser l'air dans cette cellule. Selon le principe que $PV=nRT$, le système d'acquisition peut retranscrire la pression à l'intérieur du système en volume. Le volume de l'échantillon est la différence entre le volume de la cellule et le volume d'hélium injecté. Donc, la masse volumique absolue peut être calculée selon l'équation 2.2.7. Pour chaque essai, 80 mesures sont réalisées à différentes pressions puis calculées la moyenne. Il faut réaliser trois essais afin de vérifier l'homogénéité de la prise d'échantillon.

$$\rho_{\text{absolue}} = \frac{M_{\text{mesure}}}{V_{\text{mesure}}} \quad (2.2.7)$$

où : ρ_{absolue} est la masse volumique absolue (g/cm^3), M_{mesure} est la masse des solides pesés (g), V_{mesure} est le volume de cellule utilisée (cm^3).

En effet, la masse volumique absolue des grains est essentiellement fixée par leur composition minéralogique. Les constituants principaux des sédiments étudiés sont la Calcite, le Quartz et l'Halite. Les masses volumiques absolues ont été mesurées sur les échantillons séchés à 105°C . Les résultats obtenus sur 80 mesures pour chaque échantillon sont présentés dans la Figure 2.2.5. Les masses volumiques de chaque échantillon sur 80 mesures et la valeur moyenne déterminée sur 3 échantillons

sont présentées dans le Tableau 2.2.5. Ils montrent que la masse volumique absolue des sédiments marins est inférieure à celle proposée pour les matériaux standards (2.65 à 2.70 g/cm³) (Tran, 2009). Cet écart s'explique par la présence de matières organiques et des sels qui sont plus légers que les particules minérales. Les masses volumiques absolues des sédiments présentées dans le Tableau 2.2.5 sont proches des unes des autres, en comparaison avec les sédiments étudiés par Tran (2009) et Miraoui (2010).

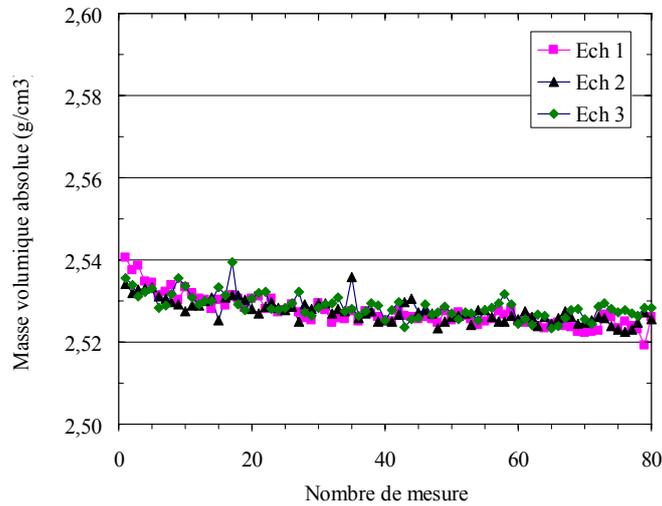
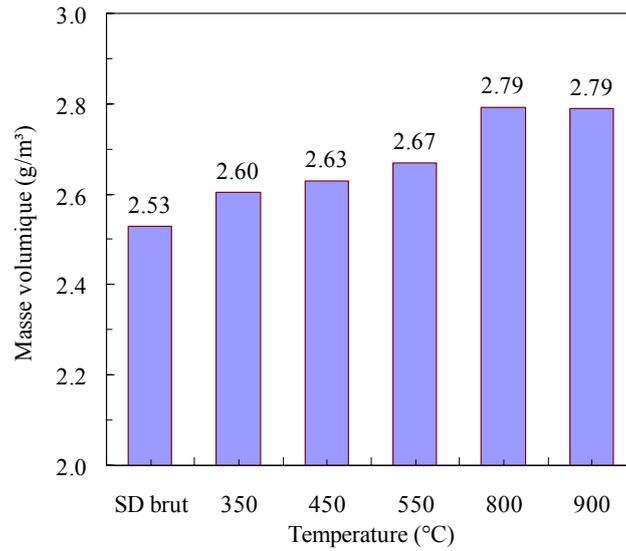


Figure 2.2.5: L'évolution de la masse volumique des sédiments bruts et des sédiments calcinés

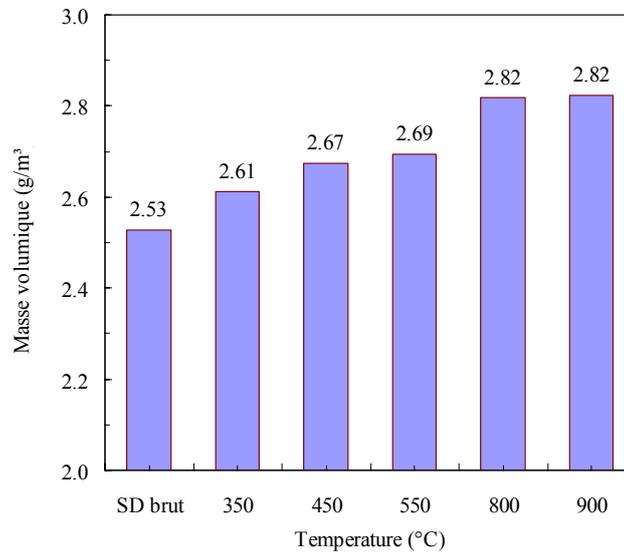
Paramètres	Tran (2009)	Miraoui (2010)	SD 2009		
N°	/	/	1	2	3
$\rho_{\text{absolue}} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	/	/	2.53	2.53	2.53
Moyenne (g/cm ³)	2.56	2.54	2.53		

Tableau 2.2.5: Masses volumiques absolues des sédiments marins de Dunkerque

Afin d'étudier l'évolution des masses volumiques des sédiments en fonction de la température de calcination et de vérifier l'effet des matières organiques sur les masses volumiques, les mesures des masses volumiques absolues sont réalisées sur les sédiments calcinés à différentes températures dans un four. Les sédiments étudiés ont été calcinés dans un four à 350°C, 450°C, 550°C, 800°C et 900°C respectivement pendant 3 heures et 6 heures. Les résultats sont reportés sur la Figure 2.2.6: (a) et (b). Evidemment, les masses volumiques diffèrent, principalement à cause de la perte des matières organiques et des décompositions des carbonates. Globalement, la masse volumique des sédiments augmente après calcination, mais il faut noter que les masses volumiques des sédiments calcinés à 800°C et à 900°C semblent constantes.



(a) : Calcination pendant 3 heures



(b) : Calcination pendant 6 heures

Figure 2.2.6: Évolution de la masse volumique des sédiments bruts et des sédiments calcinés

2.2.3.2 Masse volumique apparente

La masse volumique apparente des sédiments bruts a été mesurée en pesant un volume connu. Dans cette étude, on a choisi un volume de 132 cm³. Pour les sédiments étudiés, les résultats présentés sont calculés selon l'équation 2.2.8 dans le Tableau 2.2.6.

$$\rho_{\text{apparente}} = \frac{M_{\text{apparente}}}{V_{\text{apparente}}} = \frac{\text{Masse totale}}{\text{Volume total}} \quad (2.2.8)$$

Paramètres	SD 2009		
	1	2	3
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1.34	1.35	1.35
Moyenne (g/cm ³)	1.35		

Tableau 2.2.6: Masse volumique apparente des sédiments marins de Dunkerque

2.2.4 Valeur au bleu de méthylène

L'essai au bleu de méthylène a pour objet de caractériser l'argilosité du matériau, mais aussi d'identifier le risque de gonflement. Cet essai a l'avantage de pouvoir être réalisé dans des conditions simples et rapides. Il utilise la propriété des molécules du bleu de méthylène à être adsorbé sur la surface des particules minérales. L'essai consiste à mesurer la quantité de bleu de méthylène pouvant être adsorbée par le matériau mis en suspension dans la solution.

D'après la norme NF P 94-068 (1993), on doit introduire progressivement une solution de bleu de méthylène à (10±0.1) g/l dans la suspension de matériau en maintenant une agitation constante à une vitesse de 400±100 tr/min. On prélève ensuite à l'aide d'une baguette en verre une goutte de suspension et la dépose sur le papier filtre. La goutte prélevée doit former un dépôt central compris entre 8mm et 12mm de diamètre. Puis on procède à des injections successives par pas de 5 ou 10ml de solution jusqu'à l'apparition d'une auréole périphérique bleu claire, de largeur millimétrique, autour de la tache. A ce moment, l'adsorption du bleu de méthylène sur les particules argileuses se termine. A partir de la quantité utilisée de bleu de méthylène et de sédiment marin en masse sèche, la valeur du bleu de méthylène (VBS) peut être définie par l'équation 2.2.9.

$$VBS = \frac{B}{m_0} \times 100 \quad (2.2.9)$$

avec: m_0 : la masse sèche de la prise (g);

B: la masse de bleu introduite (solution à 10g/l) (g), $B = V \times 0.01$;

V: le volume total de la solution de bleu introduite (ml) (solution à 10g/l).

Les mesures de VBS des sédiments de dragage sont reportées sur le Tableau 2.2.7. Ces résultats sont du même ordre de grandeur que ceux mesurés dans cette étude. Les résultats de Tran (2009) et de Miraoui (2010) sont aussi présentés dans le Tableau 2.2.7. On trouve que les résultats dans le Tableau 2.2.7 sont comparables pour les sédiments du port Est de Dunkerque.

Matériaux	Cette étude		Tran (2009)	Miraoui (2010)
VBS (g/100g)	2.7	3.3	/	/
		3.1	3.4	4.08

Tableau 2.2.7: Les valeurs de VBS des sédiments marins

La valeur au bleu de méthylène d'un sol est un paramètre important permettant de classer les sols fins selon le «Guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme» (GTR. 1992). Les sédiments étudiés dans cette étude peuvent être placés dans le groupe des sols limoneux-argileux (Figure 2.2.7). Les valeurs de VBS des sédiments étudiés par Tran (2009) et Miraoui (2009), qui sont plus grandes que celle des sédiments dans cette étude, permettent aussi de classer les sédiments dans le domaine "sols limoneux-argileux".

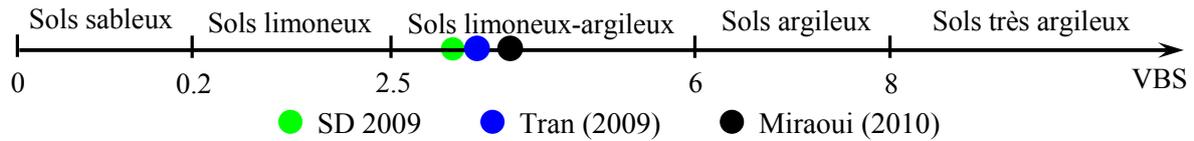


Figure 2.2.7: Classification des sols en fonction de VBS (GTR, 1992)

2.2.5 Etats de consistance - Limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg sont déterminées uniquement pour les éléments fins d'un sol (fraction passant au tamis de 0.4mm), car ce sont les seuls éléments sur lesquels l'eau agit en modifiant la consistance du sol. Généralement, l'état de consistance d'un sol est présenté sur la Figure 2.2.8, et il comprend la limite de liquidité (W_L), la limite de plasticité (W_P), et l'indice de plasticité (I_p). L'indice de plasticité (I_p) est la différence entre la limite de plasticité et la limite de liquidité: $I_p = W_L - W_P$. L'indice de plasticité caractérise la largeur de la zone du comportement plastique du sol étudié (Tableau 2.2.8).

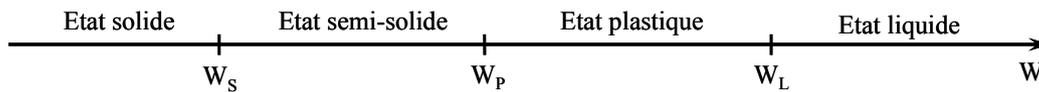


Figure 2.2.8: Etats de consistance d'un sol

Indice de plasticité I_p	Etat du sol
0-5	Non plastique
5-15	Peu plastique
15-40	Plastique
> 40	Très plastique

Tableau 2.2.8: Classification de l'argilosité d'un sol selon l'indice de plasticité I_p

2.2.5.1 Méthode de Casagrande et méthode du rouleau

Les limites d'Atterberg sont déterminées sur la fraction de sol passant au travers du tamis 400 μ m. Pour la limite de liquidité, elles sont déterminées à l'aide d'un appareil de Casagrande (Norme NF P 94-051, 1993). L'essai consiste à déterminer la relation entre le nombre de chocs imposés à une coupelle et sa teneur en eau. Chaque choc entraîne la fermeture progressive d'une rainure. Par définition, la limite de liquidité W_L est la teneur en eau qui correspond à la fermeture de la rainure sur 1 cm de longueur en 25 chocs. Les limites de liquidité sont ainsi déterminées sur les sédiments dragués d'après la Figure 2.2.9, et elles sont présentées dans le Tableau 2.11.

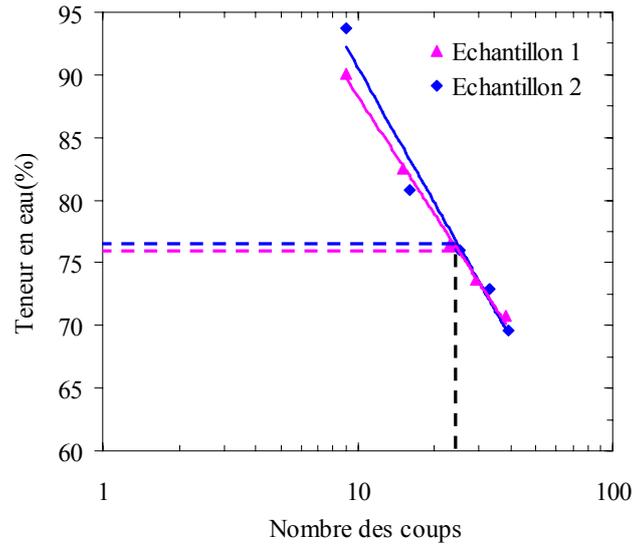


Figure 2.2.9: Détermination de la limite de liquidité

La limite de plasticité est déterminée par la méthode du rouleau (NF P 94-051, 1993). On doit rouler la boulette des sédiments sur une plaque lisse à la main, et la cadence du mouvement de la main doit être régulière. La limite de plasticité est obtenue au moment où le rouleau se fissure et à un diamètre de $3\text{mm} \pm 0.5\text{mm}$. Selon les méthodes exposées dans la norme NF P 94-051 (1993), la limite de liquidité et de plasticité peuvent être déterminées en se basant sur deux séries d'essais pour chaque échantillon (Tableau 2.2.9). On détermine à partir de deux échantillons des sédiments une moyenne des limites d'Atterberg.

N° d'analyse	1	2	Moyenne
W_L (%)	75.9	76.3	76.1
W_P (%)	34.9	35.6	35.3
I_P (%)	41.0	40.7	40.8

Tableau 2.2.9: Limites d'Atterberg des sédiments de Dunkerque

D'après la limite de liquidité et l'indice de plasticité, on peut classer les sédiments afin de connaître leur propriété générale dans le diagramme de Casagrande qui est lié à la ligne A: $I_p=0.73 \times (W_L-20)$, $W_L=30\%$ et $W_L=50\%$. Selon les résultats reportés dans la Figure 2.2.10, on observe que le sédiment étudié dans cette étude est associé dans le diagramme de Casagrande à la classe de limons très plastiques. Basé sur les résultats obtenus par Dubois (2006), Tran (2009) et Miraoui (2010), on trouve que les matériaux étudiés ont tendance à se regrouper autour de la ligne A: $I_p=0.73 \times (W_L-20)$.

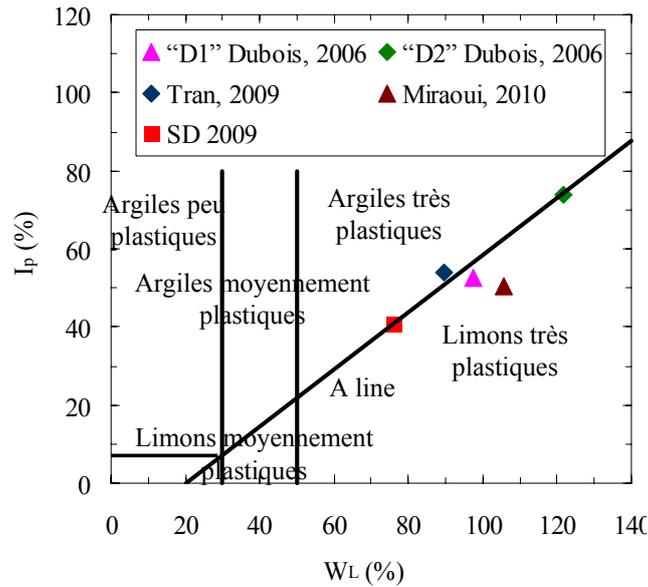


Figure 2.2.10: Classification des sédiments selon l'abaque de plasticité de Casagrande

2.2.5.2 Méthode au cône de pénétration

Il existe une méthode autre que la méthode de Casagrande et du rouleau, pour déterminer la limite de liquidité et de plasticité: la méthode du cône de pénétration. Nous avons ainsi l'occasion d'effectuer une comparaison des différents résultats.

A l'aide d'un cône de pénétration (d'un angle au sommet de 30° et d'une masse totale de 80g) muni d'une tige. On peut établir une relation entre la teneur en eau et l'enfoncement du cône de pénétration. D'après la norme NF P 94-052-1 (1995), la limite de liquidité est la teneur en eau du matériau lors d'un enfoncement du cône de 17 mm. Mais selon la norme anglaise (BSI, 1990), la limite de liquidité est la teneur en eau du matériau qui correspond conventionnellement à un enfoncement de 20 mm du cône de pénétration.

Afin de déterminer la limite de plasticité par la méthode du cône de pénétration, plusieurs auteurs (Feng, 2000; Zentar et al., 2009) ont exploré la relation entre la limite de plasticité et la pénétration du cône. On a déterminé que le ratio de la pénétration à la limite de liquidité et à la limite de plasticité était de 10 (Feng, 2000; Zentar et al., 2009). Donc, la limite de plasticité peut être déterminée selon la teneur en eau correspondant à un enfoncement de 1.7 mm et de 2.0 mm.

La limite de liquidité et de plasticité peut être obtenue grâce aux résultats expérimentaux tracés sur la Figure 2.2.11. Les résultats relatifs aux enfoncements à 20mm, 17mm, 2.0mm et 1.7mm sont reportés sur le Tableau 2.2.10, permettant d'identifier les limites d'Atterberg.

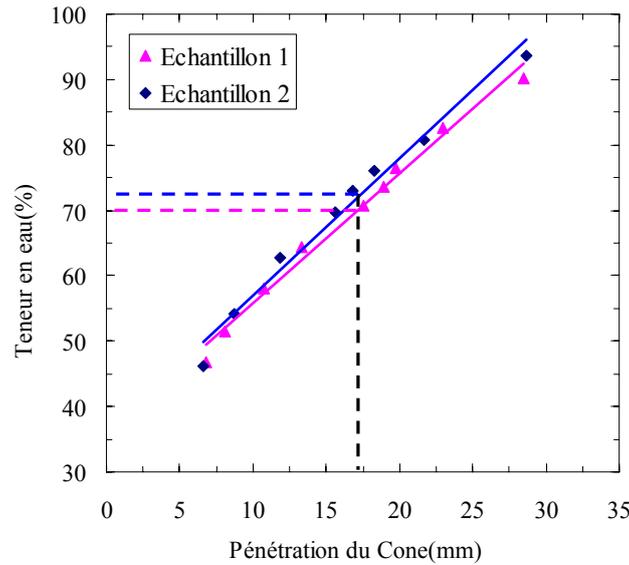


Figure 2.2.11: Relations entre la teneur en eau et la pénétration du cône

N°	W_L (d=17mm)	W_L (d=20mm)	W_P (d=1.7mm)	W_P (d=2.0mm)	I_p (d=17mm et 1.7mm)	I_p (d=20mm et 2.0mm)
1 (%)	69.7	75.7	39.2	39.8	30.5	35.9
2 (%)	71.5	77.8	39.4	40.1	32.1	37.7
Moyenne (%)	70.6	76.8	39.3	40.0	31.3	36.8

Tableau 2.2.10: Limites d'Atterberg déterminées par la méthode au cône de pénétration

Pour comparer les limites d'Atterberg déterminés à l'aide des différentes méthodes, les moyennes sont présentées dans le Tableau 2.2.11. On trouve que les résultats déterminés respectivement par la méthode au cône de pénétration à 20 mm et la méthode de Casagrande sont comparables. Cependant la limite de liquidité correspondant à un enfoncement de 17 mm est inférieure à celle déterminée par la méthode de Casagrande. On trouve que dans le Tableau 2.2.11 les limites de plasticité mesurées par les différentes méthodes ne sont pas identiques. Les limites de plasticité correspondant à un enfoncement de 1.7 mm et 2.0 mm sont supérieures à celle déterminée par la méthode du rouleau. Mais, il n'y a pas de différence majeure entre les limites de plasticité déterminées par la méthode au cône de pénétration et la méthode du rouleau.

Paramètres	W_L (d=17mm)	W_L (d=20mm)	W_P (d=1.7mm)	W_P (d=2.0mm)	W_L (Casagrande)	W_P (Rouleau)
Valeurs (%)	70.6	76.8	39.3	40.0	76.1	35.3

Tableau 2.2.11: Comparaison des limites d'Atterberg déterminées par différentes méthodes

2.2.6 Teneur en matière organique et perte au feu

2.2.6.1 Teneur en matière organique

La matière organique possède d'importantes propriétés indésirables. En effet elle retient l'eau et empêche la réaction pouzzolanique, ainsi la teneur en matière organique doit être mesurée afin de prendre en compte ces phénomènes. L'influence de la matière organique sur les caractéristiques des sédiments dépend de sa nature et de sa structure. Les matières organiques ont des caractéristiques comme une structure spongieuse, meubles et ayant peu de résistance mécanique. Deux méthodes ont été employées dans cette étude pour mesurer la teneur en matière organique: la méthode par calcination et la méthode à l'eau oxygénée.

➤ Méthode par calcination

Selon la norme XP P 94-047 (1998), la teneur en matières organiques par calcination est le rapport de la masse de matières organiques contenues, sur la masse sèche des particules solides préalablement séchées à 40°C qui sont inférieures à 2 mm. La masse perdue a été calculée en faisant la différence entre la masse initiale de l'échantillon et sa masse après calcination dans un four à 450°C pendant 3 heures. D'après la norme NF EN 12879 (2000), la perte au feu peut aussi être mesurée dans un four à 550°C pendant 3 heures. Les résultats sont donnés dans le Tableau 2.12. Il est nécessaire d'exploiter et d'interpréter ces résultats avec prudence, parce que sauf la perte des matières organiques, la perte de masse de l'échantillon contient probablement une perte d'eau liée, la décomposition des carbonates et une perte de certaines phases minérales (par exemple la Kaolinite) détruites par la température élevée.

➤ Méthode à l'eau oxygénée

La méthode à l'eau oxygénée peut mesurer la teneur conventionnelle en matières organiques des sols. On prélève environ 100g de particules solides de sédiments passant un tamis de 2 mm. Les échantillons secs doivent d'abord être placés au bain-marie à 100°C, puis ils sont traités tout en les remuant régulièrement avec 500ml de solution oxygénée. Les valeurs obtenues sont présentées dans le Tableau 2.2.12.

Paramètres	SD 2009			
	1	2	3	Moyenne
Perte au feu à 450°C (%)	6.29	6.29	6.23	6.27
Perte au feu à 550°C (%)	10.03	9.86	9.90	9.93
MO oxydation (Eau oxygénée) (%)	4.66	4.73	4.68	4.69

Tableau 2.2.12: Teneur en matière organique et perte au feu des sédiments

Les résultats déterminés par la méthode de calcination sont plus grands que ceux obtenus par la méthode à l'eau oxygénée. Cela s'explique probablement par la différence du principe entre les deux méthodes. La méthode conventionnelle à l'eau oxygénée consiste à oxyder les matières organiques oxydables à froid et en phase liquide dans les sédiments, alors que la méthode de calcination consiste en une réaction d'oxydoréduction en présence d'oxygène. La conséquence est que

soit les matières brûlent, soit elles s'évaporent. Il faut noter que la perte de l'eau liée et de l'eau de constitution et la décomposition des calcites à température élevée contribue aussi à la perte au feu des sédiments, mais l'ajout de l'eau oxygénée ne peut pas provoquer la décomposition des calcites dans le sédiment.

2.2.6.2 Perte au feu (PAF)

Afin de trouver la sensibilité à la température et à la durée de calcination de la perte au feu, on peut employer la méthode de calcination à 350, 450, 550, 800 et 900°C pendant 3 et 6 heures.

Lors d'une calcination à 350°C, la perte de masse des sédiments est principalement due à la perte d'eau liée. Pour la calcination à 450°C et 550°C, la perte au feu est due à la perte de la matière organique et la perte de l'eau de constitution dans les minéraux argileux. La décomposition des carbonates contribue partiellement à la perte de la masse d'échantillon pour la calcination des sédiments fins à la température supérieure à 800°C. Lorsqu'il y a du CaCO_3 (de la calcite), il y a perte de 44% du poids par décomposition de calcaire. S'il y a du $\text{MgCa}(\text{CO}_3)_2$ (de la dolomite), il y a perte de 47.9% selon le même mécanisme de dégagement de CO_2 .

Selon les résultats (Tableau 2.2.13), on trouve que la perte de masse est augmentée en fonction de la température, cependant la prolongation de 3 à 6 heures du temps de calcination ne permet pas d'augmentation significative.

Paramètres		3 heures			6 heures	
PAF à 350°C	3.07	3.30	3.40	3.40	3.42	3.46
Moyenne		3.25			3.43	
PAF à 450°C	6.29	6.29	6.23	6.69	6.78	6.72
Moyenne		6.27			6.73	
PAF à 550°C	10.03	9.86	9.90	10.57	10.40	10.61
Moyenne		9.93			10.53	
PAF à 800°C	15.70	15.53	15.54	16.32	16.22	16.20
Moyenne		15.55			16.25	
PAF à 900°C	16.93	16.58	16.64	16.76	16.78	17.15
Moyenne		16.72			16.90	

Tableau 2.2.13: Perte au feu des SD 2009 en fonction de la température et de la durée de calcination

2.2.7 Classification des sédiments

Les résultats obtenus ci-dessus amènent à classer les sédiments de dragage suivant plusieurs standards. Du point de vue général, on peut classer les sédiments marins en fonction des standards de la classification des sols, comme la classification AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) et la classification USCS (Unified Soil Classification System). Du point de vue du secteur de valorisation envisagé, c'est-à-dire le domaine routier, le GTR (Guide technique–Réalisation des remblais et des couches de forme, 1992) fournit un critère de la classification des matériaux utilisés pour la construction des remblais et des couches de forme.

Pour les sédiments étudiés, les caractéristiques physiques sont synthétisées dans le Tableau 2.2.14.

Paramètres		Sédiment marin de Dunkerque
	Matière organique à 450°C (%)	6.27
	Masse volumique absolue (%)	2.53
	Valeur au bleu de méthylène (VBS)	3.1
	W _L (%)	76.1
	W _P (%)	35.3
	I _P (%)	40.8
Granulométrie	Grains < 2µm	2.3
	2µm < Grains < 63µm	49.1
	Grains > 63µm	48.6

Tableau 2.2.14: Synthèse des caractéristiques physiques des sédiments étudiés

Selon la classification AASHTO, les sédiments sont considérés comme appartenant à la classe A-7, parce que les fractions argileuses et limoneuses passant à 75µm sont supérieures à 35%, et la limite de liquidité et l'indice de plasticité sont respectivement supérieures à 41% et 11%. L'indice de plasticité (I_P) dépasse 11%, les sédiments peuvent donc être catégorisés en la sous-classe A-7-5 et A-7-6 (Sols argileux).

Selon la classification USCS, les matériaux étudiés sont de classe OH (silts organiques; argiles organiques de plasticité moyenne à élevée) en fonction de leur granulométrie, leur limite de liquidité (> 50%) et leur teneur en matière organique.

D'après la classification du GTR (1992), les sédiments marins appartiennent à la sous-classe F11 (matériaux faiblement organiques), parce que la teneur en matière organique des sédiments se situe entre 3% à 10%. On peut ensuite précisément classer les sédiments en fonction de leur comportement géotechnique au travers des paramètres retenus. Du point de vue granulométrique, les sédiments se classent comme des sols fins (Classe A), car leur diamètre maximal est inférieur à 50mm et la proportion de particules fines inférieures à 80µm est supérieure à 35%. Puis la sous-classe est déterminée en fonction des VBS ou de l'IPI. Les deux paramètres conduisent à différentes classifications. Ainsi, il est possible de classer les sédiments étudiés en sous classe F11A4.

2.3 Caractérisation minéralogique

Il est très important de réaliser une analyse minéralogique contenant deux méthodes d'analyse souvent utilisée afin de mieux connaître les compositions minéralogiques et d'évaluer l'influence de minéraux et des éléments susceptibles d'engendrer des problèmes pour la valorisation. La première méthode est une analyse par diffraction des rayons X pour déterminer les phases minérales dans le sédiment. La deuxième méthode est une analyse par spectrométrie de fluorescence X pour déterminer les éléments contenus et leurs concentrations dans le sédiment.

2.3.1 Fluorescence des rayons X (FRX)

La fluorescence des rayons X est une technique d'analyse élémentaire de l'échantillon, et elle est utilisée pour l'analyse de la composition chimique des matériaux minéraux. La technique d'analyse comprend deux parties: l'une est une source d'excitation qui provoque l'émission d'un spectre de rayons X caractéristique de la composition de l'objet, l'autre est un détecteur et un analyseur de rayonnement qui identifie les raies composant le spectre. Elle permet non seulement de déterminer les éléments chimiques présents dans un matériau, mais aussi de déterminer leur quantité respective. Les

résultats des analyses des sédiments de dragage sont récapitulés dans le Tableau 2.3.1. Ils montrent que les éléments principaux qui constituent les sédiments sont le silicium, l'oxygène et le calcium, avec une présence de chlore, de sodium, de soufre, de fer et magnésium etc.

Le carbone est un élément léger (faible numéro atomique), moins de rayons X sont absorbés par l'atome du carbone par rapport aux atomes lourds. La concentration du carbone est difficile à détecter directement par la fluorescence des rayons X pour deux raisons: (a) le carbone produit peu de rayons X (faible rendement de fluorescence), (b) le carbone produit des rayons X de faible énergie qui sont vite absorbés. Par conséquent, la teneur en carbone total, qui est divisée en deux parties: carbone organique et carbone minéral, a été déterminée indirectement. La teneur en carbone organique est de 3.2%, détectée par l'Institut Pasteur de Lille sur les sédiments bruts.

Dans le même temps, la teneur en carbone minéral est estimée en se basant sur l'analyse thermogravimétrique (ATG), qui permet de mesurer la perte de masse en fonction de l'augmentation de la température de calcination, comme indiquée sur la Figure 2.3.1. Entre 600°C et 800°C, la perte de masse des sédiments marins est de l'ordre de 10.1% ce qui correspond principalement à la décomposition de la phase calcite.

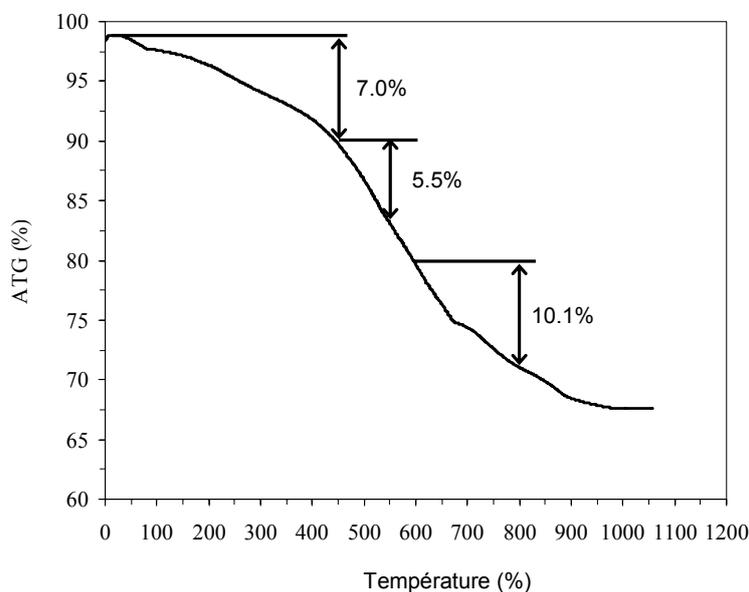
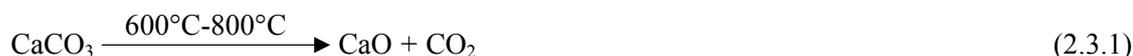


Figure 2.3.1: Analyse thermogravimétrique (ATG) en fonction de la température des sédiments

Selon l'équation 2.3.1, on peut savoir que la perte de masse des sédiments marins est due au dégagement de dioxyde de carbone CO₂.



Selon les masses molaires de l'oxygène (16 g/mol) et du carbone (12 g/mol), la quantité du carbone minéral peut être calculée d'après l'équation 2.3.2.

$$C_{\text{minéral}} (\%) = \frac{12}{44} \times \text{Mperte de masse} (\%) = \frac{12}{44} \times 10.1\% = 2.8\% \quad (2.3.2)$$

Donc, la teneur en carbone total est obtenue selon l'équation 2.3.3:

$$C_{\text{total}} (\%) = C_{\text{minéral}} (\%) + C_{\text{organique}} (\%) = 2.8\% + 3.2\% = 6.0\% \quad (2.3.3)$$

D'après l'analyse de FRX réalisée par Tran (2009), le pourcentage du carbone total est de 5.9%. Ceci est similaire à la teneur en carbone total obtenu des sédiments étudiés dans cette étude.

Symbole	Nom de l'élément	Numéro d'atome	Concentration (%)
C	Carbone	6	6.0
O	Oxygène	8	49.2
Na	Sodium	11	2.0
Mg	Magnésium	12	1.2
Al	Aluminium	13	4.4
Si	Silicium	14	16.1
P	Phosphore	15	0.1
S	Soufre	16	1.0
Cl	Chlore	17	2.3
K	Potassium	19	1.4
Ca	Calcium	20	13.0
Ti	Titane	22	0.3
Cr	Chrome	24	Traces
Mn	Manganèse	25	Traces
Fe	Fer	26	3.5
Cu	Cuivre	29	Traces
Zn	Zinc	30	0.1
Br	Brome	35	Traces
Rb	Rubidium	37	Traces
Sr	Strontium	38	Traces
Zr	Zirconium	40	Traces
Ba	Baryum	56	Traces
Pb	Plomb	82	Traces

Tableau 2.3.1: Les éléments chimiques déterminés par fluorescence X

2.3.2 Diffraction de rayons X (DRX)

La diffraction de rayons X (DRX) permet de déterminer les phases minérales des matériaux. Elle est effectuée dans cette étude à l'aide d'un diffractomètre de type D8 fabriqué par Siemens avec une source X-rayon opérée à 35 kV et 40 mA utilisant la radiation Co ($K\alpha=1.78\text{\AA}$), et un détecteur marqué Lynxeye Super Speed. La Figure 2.3.2 présente le spectre obtenu des sédiments marins par la technique de la diffraction aux rayons X. Les phases principales détectées dans les sédiments étudiés sont la calcite, le quartz et l'halite. Particulièrement, l'illite et le chlorite existent dans une moindre mesure. Cela coïncide avec les éléments principaux mis en évidence dans les résultats déterminés par la spectrométrie de fluorescence des rayons X. Selon les travaux de Tran (2009) et Miraoui (2010) sur les sédiments de Dunkerque, les mêmes phases principales comme la calcite, l'halite et le quartz ont été retrouvés.

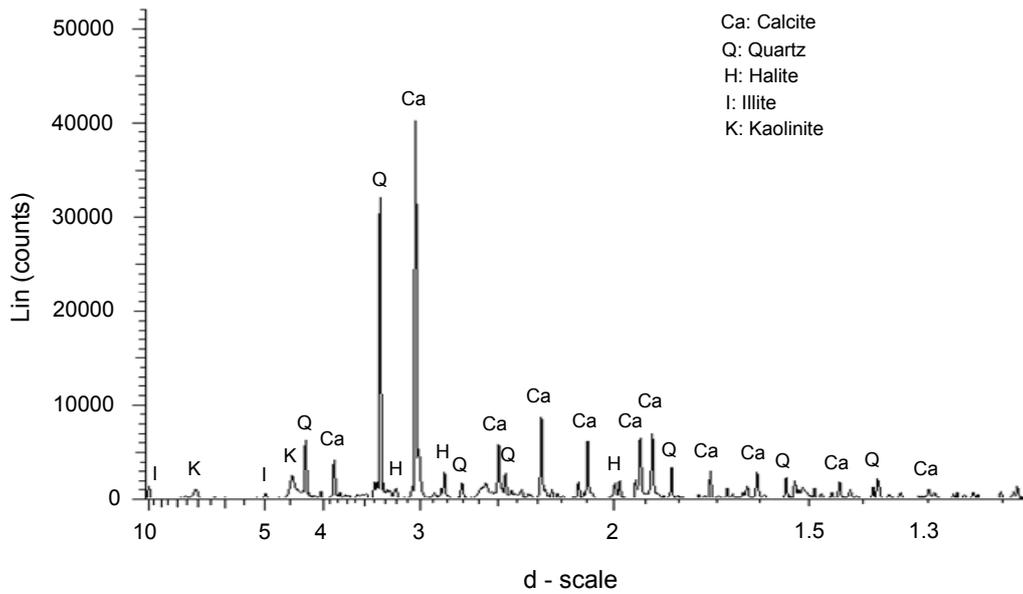


Figure 2.3.2: Phases cristallines des sédiments étudiés

2.4 Comportement à la lixiviation

L'impact environnemental des sédiments marins par l'immersion est estimé à l'aide de l'essai de lixiviation au laboratoire d'après la norme européenne XP ISO/TS 21268-2 (2007). Cet essai est réalisé sur les matériaux broyés, et consiste à appliquer un mouvement rotatif aux matériaux. Après un cycle de 24 heures, le mélange (L/S=10, 1000g d'eau déminéralisée pour 100g de matières sèches) est filtré à 0.45µm. Par la suite, la séparation résidu-lixiviat est réalisée grâce à une centrifugeuse. Les analyses des solutions récupérées sont effectuées par ICP-AES (Inductively Coupled Plasma – Atomic Emission Spectrometry) pour les métaux et par chromatographie ionique pour les chlorures, les sulfates et les nitrates. Les matières organiques, tels que le carbone organique total (COT), les benzènes, toluène, éthylène, xylène et benzène éthylique composés (BTEX), et biphényles polychlorés (PCB) sont aussi déterminés par une analyse directe réalisée à l'Institut Pasteur à Lille sur les matériaux solides.

Dans le cadre de cette étude, la législation choisie pour évaluer l'impact environnemental des sédiments bruts est celle utilisée pour la mise en décharge des déchets (JOCE, 2003). Une série de seuils des polluants dans les décharges est choisie comme référence, en accord avec l'objectif de valorisation envisagé (JOCE, 2003) (sur éluat L/S=10, valeur en mg/kg). Donc les seuils pour la mise en décharge des déchets inertes garantissent une utilisation à risques très faibles. En même temps, les seuils d'acceptation dans les centres de stockage relatifs aux solides sont présentés dans les Tableaux 2.4.1-2.4.2.

Paramètres	Classe III Stockage de déchets inertes	Valeurs seuils (en mg/kg de ms)	Classe II Stockage de déchets non dangereux	Valeurs seuils (en mg/kg de ms)	Classe I Stockage de déchets dangereux	Valeurs seuils (en mg/kg de ms)	Traitements des déchets dangereux avant stockage
pH						4-13	
Fraction soluble	<	4000	<-<	6000	<-<	100000	<
Sb	<	0.06	<-<	0.7	<-<	5	<
As	<	0.5	<-<	2	<-<	25	<
Ba	<	20	<-<	100	<-<	300	<
Cd	<	0.04	<-<	1	<-<	5	<
Cr total	<	0.5	<-<	10	<-<	70	<
Cr VI			<-<		<-<	5	<
Cu	<	2	<-<	50	<-<	100	<
Hg	<	0.01	<-<	0.2	<-<	2	<
Mo	<	0.5	<-<	10	<-<	30	<
Ni	<	0.4	<-<	10	<-<	40	<
Pb	<	0.5	<-<	10	<-<	50	<
Se	<	0.1	<-<	0.5	<-<	7	<
Zn	<	4	<-<	50	<-<	200	<
Cyanures	<		<-<		<-<	5	<
Chlorures	<	800	<-<	15000	<-<	25000	<
Sulfates	<	1000	<-<	20000	<-<	50000	<
Fluorures	<	10	<-<	150	<-<	500	<
Indice phénol	<	1	<-<	50	<-<	100	<
COT	<	500	<-<	800	<-<	1000	<

Tableau 2.4.1: Seuils des polluants dans les centres de stockage relatifs aux éluats (JOCE, 2003)

Paramètres	Classe III Stockage de déchets inertes	Valeurs seuils (en mg/kg de ms)	Classe II Stockage de déchets non dangereux	Valeurs seuils (en mg/kg de ms)	Classe I Stockage de déchets dangereux	Valeurs seuils (en mg/kg de ms)	Traitements des déchets dangereux avant stockage
COT	<	30000		-	<	60000	
BTEX	<	6					
PCB	<	1					
Hydrocarbures	<	500					
HAP	<	50					

Tableau 2.4.2: Seuils des polluants dans les centres de stockage relatifs aux solides (JOCE, 2003)

L'arrêté du 14 juin 2000, relatif aux niveaux de référence à prendre en compte lors d'une analyse de sédiments marins en milieu naturel, définit les niveaux de référence N1 et N2 à prendre en compte lors d'une analyse de sédiments marins et estuariens en milieu naturel ou portuaire. Il faut

noter que: Au-dessous du niveau 1 (N1), l'impact potentiel est probablement jugé être et l'immersion des déchets est possible; Au-dessus du niveau 2 (N2), il faut réaliser des études approfondies portant sur le niveau de contamination, la toxicité potentielle et mesurée des sédiments; Entre les niveaux 1 et 2, une investigation complémentaire peut s'avérer nécessaire en fonction de projet considéré et du degré de dépassement du niveau N1.

Dans cette étude, les essais de lixiviation sur éluat et les analyses sur solide ont été effectués sur les sédiments prélevés du port Est de Dunkerque en 2009. Le potentiel de rejet des sédiments dans l'environnement est estimé à l'aide de tests de lixiviation sur les sédiments bruts selon la norme européenne XP ISO/TS 21268-2 (2007). Les résultats de lixiviation effectués par Dubois (2006), Tran (2009) et Miraoui (2010) sont aussi présentés dans cette étude, afin de comparer les impacts environnementaux des sédiments marins provenant du même port. On trouve que pour les sédiments du port de Dunkerque, les polluants principaux qui menacent l'environnement sont les chlorures, les hydrocarbures, les sulfates et les COT.

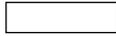
Pour une comparaison, les seuils des traces et de PCB sont introduits dans le Tableau 2.4.3. Selon les concentrations des polluants en mg/kg reportés dans le Tableau 2.4.3, on trouve que toutes les concentrations obtenues sont inférieures au niveau N1. Par conséquent, les sédiments marins peuvent probablement être immergés en mer d'un point de vue de la concentration des traces et PCB selon l'Arrêté du 14 juin 2000. Mais il faut encore prendre en compte les concentrations d'autres polluants comme les éléments solubles et organiques avant d'autoriser l'immersion des sédiments selon les critères européens 2003/33/CE (JOCE 16/01/2003).

Les sédiments issus des opérations de dragages ou de curages sont considérés comme des déchets d'après la réglementation européenne relative à la classification des déchets. Par rapport aux critères européens 2003/33/CE (JOCE 16/01/2003) d'admission permettant de définir la dangerosité des sédiments des déchets en décharge, les résultats reportés dans les Tableaux 2.4.3-2.4.4 montrent que: pour les sédiments étudiés dans cette étude, hormis le niveau des chlorures, de COT et des hydrocarbures, les valeurs mesurées sont en dessous des seuils établis pour définir les déchets inertes appartenant à classe III. On note les valeurs importantes de chlorures et COT, qui classent les sédiments étudiés parmi les déchets non dangereux, et les hydrocarbures qui les classent parmi les déchets dangereux.

Paramètre	Unité	SD 2009	Dubois (2006)	Tran (2009)	Miraoui (2010)	Arrêté du 14/06/2000	
						N1	N2
As	mg/kg	< 0.05	< 0.5	< 0.5	< 0.05	25	50
Ba	mg/kg	0.078	/	0.12	< 0.01	/	/
Cd	mg/kg	< 0.004	< 0.1	< 0.04	< 0.004	1.2	2.4
Cr	mg/kg	< 0.05	/	< 0.5	< 0.01	90	180
Cu	mg/kg	< 0.05	< 0.5	< 0.5	0.633	45	90
Hg	mg/kg	< 0.01	< 0.001	< 0.001	< 0.01	0.4	0.8
Mo	mg/kg	0.063	/	4.19	0.9	/	/
Ni	mg/kg	< 0.04	< 0.4	< 0.4	< 0.04	37	74
Pb	mg/kg	< 0.05	< 1	< 0.5	< 0.05	100	200
Sb	mg/kg	< 0.006	/	< 0.06	< 0.004	/	/
Se	mg/kg	< 0.01	/	< 0.1	< 0.01	/	/
Zn	mg/kg	< 0.05	< 0.5	0.73	< 0.01	276	552
Fluorures	mg/kg	6.2	9.1	7.1	0.061	/	/
Chlorures	mg/kg	12567	37600	27537	17193	/	/
Sulfates	mg/kg	577	3100	3718	2007	/	/
Indice de Phénol	mg/kg	< 0.1	< 0.1	< 0.1	/	/	/
COT	mg/kg	182	332	479	/	/	/
PCB	mg/kg		< 0.0007	< 0.0005	/	0.5	1

Arrêté du 14 juin 2000

Inférieur à N1



Entre N1 et N2

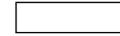


Supérieur à N2



Décision européenne (JOCE, 2003)

Classe III



Classe II



Classe I



Traitement nécessaire



Tableau 2.4.3: Études sur l'impact environnemental (sur éluat L/S=10, valeur en mg/kg)

Paramètres	Unités	SD 2009	Dubois (2006)	Tran (2009)	Miraoui (2010)
BTEX	mg/kg	< 10	< 5	< 5	< 5
COT	mg/kg	32000	48000	42000	19000
HAP	mg/kg	21.1	26.39	29.1	9.09
Hydrocarbures	mg/kg	2000	2500	820	440
PCB	mg/kg	< 0.05	1.3	0.28	/

Décision européenne (JOCE, 2003)

Classe III



Classe II



Classe I



Traitement nécessaire



Tableau 2.4.4: Résultats des dosages en polluants sur solides

Partie 2 : Cendres volantes

2.5 Caractérisation des cendres volantes

2.5.1 Introduction

Les cendres volantes de houille silico-alumineuse SILICOLINE®SECHE sont issues de la combustion de charbon pulvérisé dans les chaudières des centrales thermoélectriques de LA SNET en France. Les cendres sont entraînées dans les gaz de combustion puis captées dans des dépoussiéreurs électrostatiques en amont de la cheminée. La composition chimique des cendres volantes est reportée dans le Tableau 2.5.1. On observe que, la masse de CaO est inférieure à 10% de la masse totale des cendres volantes sèches, et la masse totale de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ est supérieure à 70%.

Elément chimique	Massique (%)
SiO_2	48 à 52 %
Fe_2O_3	7 à 9 %
Al_2O_3	27 à 31 %
TiO_2	0.5 à 1 %
CaO total	0 à 3 %
CaO libre	0 à 1 %
MgO	1 à 3 %
K_2O	2 à 5 %
Na_2O	0.5 à 1 %
SO_3	0.2 à 0.8 %
Chlore T	0.01 à 0.07 %

Tableau 2.5.1: Composition chimique moyenne

Au niveau européen, d'après le «*Décret n° 2002-540 du 18 avril 2002 relatif à la classification des déchets (JO du 20 avril 2002)*», il s'agit d'un résidu de procédé thermique qui porte le numéro de code 10. Au niveau français, la «*Circulaire n° 96-85 du 11 octobre 1996 aux centres issus de la filtration des gaz de combustion de combustibles d'origine fossile dans des installations classées pour la protection de l'environnement (BO min. Equip. n° 1109-96/93 du 10 décembre 1996)*» présente que les cendres peuvent être classées dans la catégorie des déchets inertes. Pour valoriser les cendres volantes dans le domaine routier, les caractéristiques fondamentales doivent donc être étudiées dans un premier temps.

2.5.2 Granulométrie

D'après le résultat obtenu par la technique de la diffraction de rayon laser, la distribution granulométrique des cendres volantes est reportée sur la Figure 2.5.1. Les particules inférieures à $2 \mu\text{m}$ est de l'ordre de 13.7% en volume, et la quantité des particules supérieures à $63 \mu\text{m}$ est d'environ 17.7%. La proportion des particules comprises entre $2 \mu\text{m}$ à $63 \mu\text{m}$ est de 68.6%. La taille maximale des particules est d'environ $400 \mu\text{m}$.

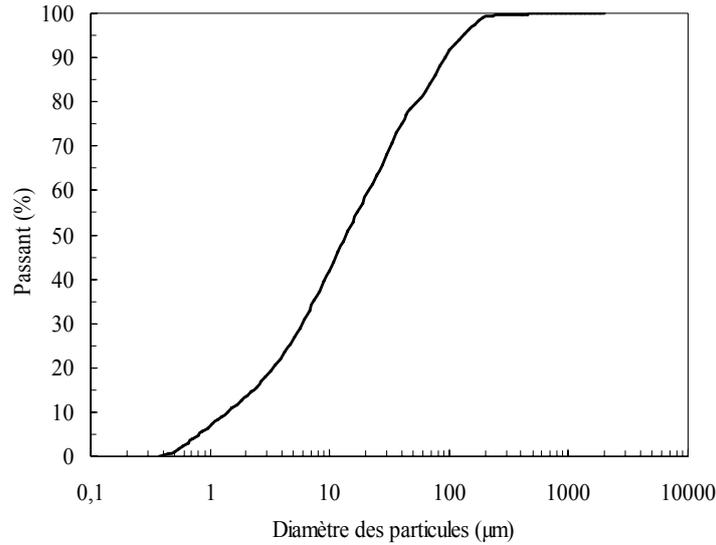


Figure 2.5.1. Granulométrie des cendres volantes de SILICOLINE®SECHE

2.5.3 Analyse minéralogique

L'analyse minéralogique est réalisée par DRX et FRX sur les cendres volantes. Les principaux minéraux observés pour les cendres sont reportés dans la Figure 2.5.2. On peut trouver que les cendres volantes étudiées se singularisent par une grande quantité des minéraux: le quartz (SiO_2), la mullite ($\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$: $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) et l'Hématite (Fe_2O_3). Les autres types de cendres volantes contiennent différentes quantités de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$. La quantité de chaux est un indicateur important dans le classement des cendres volantes.

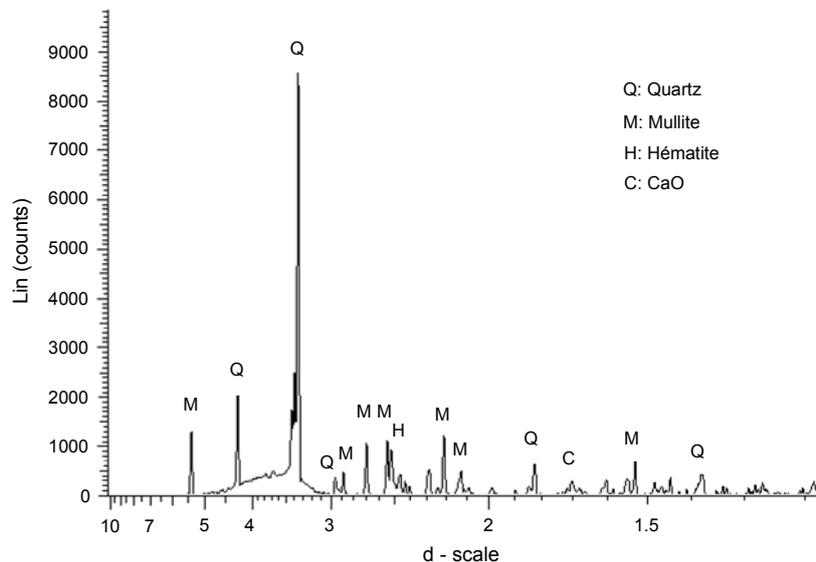


Figure 2.5.2. Principaux minéraux des cendres volantes de SILICOLINE®SECHE

Afin de déterminer la teneur en carbone totale, la teneur en carbone organique et inorganique doit être fixée respectivement. Les cendres volantes se forment quand le charbon broyé en une fine poussière est calciné dans une centrale thermique à plus de 1 200 °C. De plus, d'après l'analyse de

DRX, on peut quasiment considérer qu'il n'y a pas de carbone inorganique dans les cendres volantes. Par conséquent, la teneur en carbone totale est égale à celle en carbone organique. Détectée par l'Institut Pasteur de Lille, la concentration du carbone organique est de l'ordre de 3.8%. Donc le pourcentage du carbone total est de 3.8% pour les cendres volantes étudiées. Les éléments chimiques dans les cendres volantes sont présentés dans le Tableau 2.5.2, celui-ci montre que les éléments principaux constitutifs sont l'oxygène, le silicium et l'aluminium. Cela correspond bien aux résultats de l'analyse de DRX reportés sur la Figure 2.5.2.

Elément	Nom	Concentration (%)
C	Carbone	3,8
O	Oxygène	46,3
Na	Sodium	0,4
Mg	Magnésium	0,8
Al	Aluminium	13,4
Si	Silicium	23,6
P	Phosphore	0,2
S	Soufre	0,3
K	Potassium	3,1
Ca	Calcium	1,9
Ti	Titane	0,7
Cr	Chrome	Traces
Mn	Manganèse	Traces
Fe	Fer	5,3
Ni	Nickel	Traces
Cu	Cuivre	Traces
Zn	Zinc	Traces
Rb	Rubidium	Traces
Sr	Strontium	Traces
Zr	Zirconium	Traces
Ba	Baryum	0,1
Pb	Plomb	Traces

Tableau 2.5.2: Eléments détectés semi-quantitativement par fluorescence X

2.5.4 Perte au feu

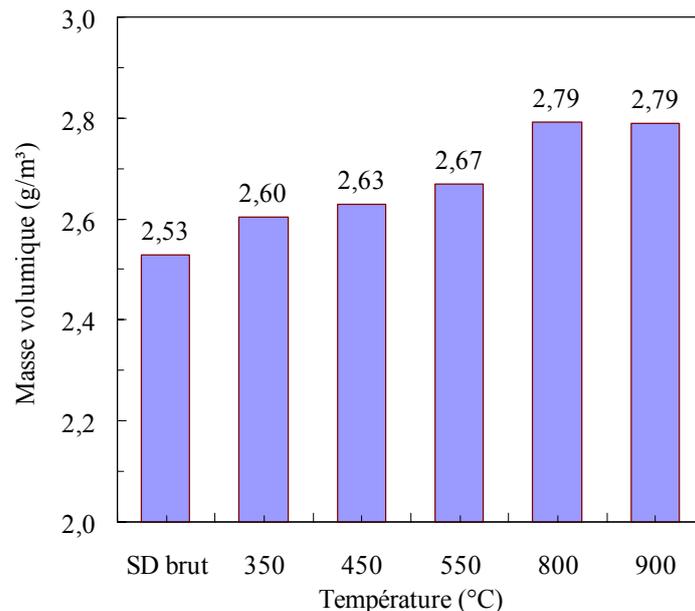
Pour les cendres volantes, la perte au feu déterminée par la méthode de calcination dans un four à température réglable peut aider à mesurer la quantité des matériaux imbrûlés. Selon la norme NF EN 14227-4 (2005), la perte au feu doit être inférieure à 10.0% en masse à une température de $975 \pm 25^\circ\text{C}$ en utilisant un temps d'allumage de 1 heure, donc les résidus de carbone non brûlés dans les cendres volantes sont limités. Selon les résultats présentés dans le Tableau 2.5.3, les pertes au feu à toutes les températures sont inférieures à la limite définie par la norme NF EN 14227-4 (2005). La perte au feu à 550°C est plus grande que celle à 450°C mais plus petite que celle à la température supérieure à 800°C . Les pertes au feu à des températures supérieures à 800°C sont quasiment invariables. Pour la calcination dans un four à 1000°C fixé par la norme européenne, la perte au feu obtenue est de 5.45%, ce qui reste inférieure à 10.0% prescrit par la norme NF EN 14227-4 (2005).

Température (°)	1	2	3	Moyenne (%)
450	1.11	1.15	1.03	1.10
550	4.20	4.26	4.10	4.19
800	5.49	5.50	5.48	5.49
900	5.50	5.43	5.36	5.43
1000	5.40	5.49	5.47	5.45

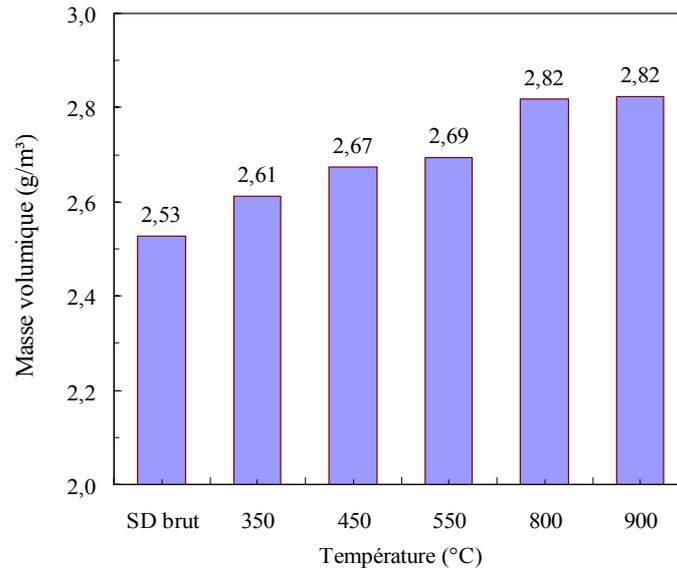
Tableau 2.5.3: Perte au feu des cendres volantes à différentes températures

2.5.5 Masse volumique absolue

Les masses volumiques absolues des grains sont mesurées à l'aide d'un pycnomètre à hélium sur des cendres volantes brutes et des cendres volantes après calcination dans la Figure 2.5.3 (a) et (b). La masse volumique des cendres volantes se situe dans un petit intervalle variant entre 2.24 et 2.30 g/cm³. On peut trouver que les durées de calcination de 3 heures et 6 heures dans un four n'influencent quasiment pas la variation des masses volumiques des cendres volantes. Les résultats obtenus concordent avec la masse volumique générale des cendres, plus légère que les matériaux standards (2.65 à 2.70 g/cm³). C'est pourquoi les cendres volantes sont préférentiellement utilisées comme des matériaux de couverture légère et d'agrégat léger.



(a): Calcination pendant 3 heures



(b): Calcination pendant 6 heures

Figure 2.5.3: Variation des masses volumiques des cendres volantes

2.5.6 Évolution du pH des mélanges sédiment-cendre volante

L'évolution du pH de la solution des cendres volantes - sédiments - eau déminéralisée est déterminée en utilisant la méthode de Eades et Grim (1966). Cette méthode consiste à mesurer le pH du mélange sédiments-eau avec un rapport liquide sur solide de 5 dans lequel on incorpore un pourcentage croissant des cendres volantes variant de 0% à 10% en masse sèche. Sur la Figure 2.5.4, il est important de signaler que la variation de pH est faible après agitation. On peut voir que la valeur du pH varie autour de 8.7, et les éléments contenus dans les cendres volantes ne peuvent pas conduire à de grands changements. Toutes les valeurs de pH sont inférieures à 9.0 à cause de la très petite teneur en chaux des cendres volantes.

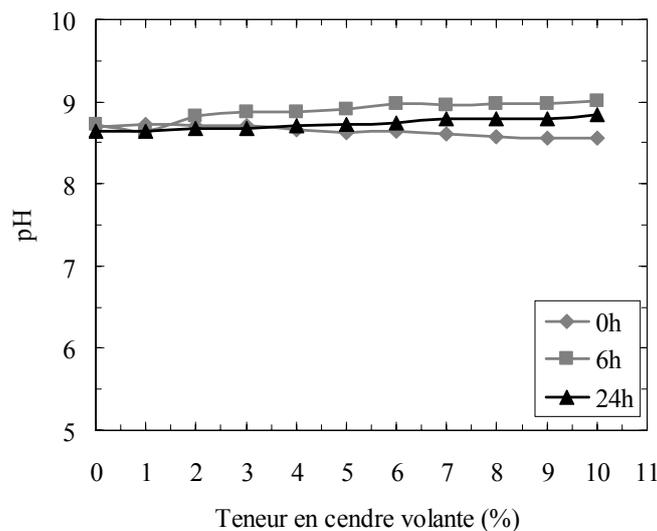


Figure 2.5.4: Evolution du pH en fonction de la teneur en cendre volante

2.5.7 Classification

Selon la norme NF P 11-300 (1992) et le GTR (1992), les cendres volantes silico-alumineuses appartiennent à la classe F2 dans la gamme des sous-produits industriels.

Selon la classification ASTM C618 (2005), les cendres volantes peuvent être classées comme la Classe F ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 70\%$ mt (la masse totale) et une faible teneur en chaux: $\text{CaO} < 10\%$) ou la Classe C ($70\% \text{ mt} > \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 50\%$ mt et une haut teneur en chaux: $\text{CaO} > 20\%$). En tenant compte de ces indices, les cendres étudiées utilisées appartiennent à la classe F.

2.5.8 Comportement à la lixiviation

Les résultats des Tableaux 2.5.4 et 2.5.5 sur la moyenne de trois essais de lixiviation, représentent l'étude environnementale des cendres volantes silico-alumineuses provenant de la centrale électrique LA SNET en France. Vis-à-vis des niveaux d'impact environnemental fixés par l'arrêté du 14 juin 2000, les valeurs présentées n'indiquent pas de présence marquée de polluants pour les matériaux étudiés.

Les mesures des polluants inorganiques, réalisées sur les éluats, n'indiquent pas de pollution particulière, par rapport à la décision européenne JOCE (2003). Toutes les valeurs des éléments se situent au-dessous du seuil relatif à la mise en décharge des déchets inertes. En se basant sur les résultats reportés dans le Tableau 2.5.5 sur les cendres volantes solides, on peut trouver que toutes les valeurs mesurées sont inférieures au seuil pour les déchets inertes sauf l'élément COT, ce qui permet de classer les cendres volantes dans la classe II – déchets non dangereux.

Paramètre	Unité	Cendre volante
As	mg/kg	< 0.05
Ba	mg/kg	0.793
Cd	mg/kg	< 0.004
Cr	mg/kg	< 0.05
Cu	mg/kg	< 0.05
Hg	mg/kg	< 0.0005
Mo	mg/kg	0.286
Ni	mg/kg	< 0.04
Pb	mg/kg	< 0.05
Sb	mg/kg	0.017
Se	mg/kg	0.056
Zn	mg/kg	0.054
Fluorures	mg/kg	9.2
Chlorures	mg/kg	< 20
Sulfates	mg/kg	304
Indice de Phénol	mg/kg	<0.1
COT	mg/kg	7

Arrêté du 14 juin 2000	Décision européenne (JOCE, 2003)
Inférieure à N1 	Classe III 
Entre N1 et N2 	Classe II 
Supérieur à N2 	Classe I 
	Traitement nécessaire 

Tableau 2.5.4: Résultats des études sur l'impact environnemental (sur éluat L/S=10, valeur en mg/kg)

Paramètres	Unités	Cendre volante
BTEX	mg/kg	< 5
COT	mg/kg	38000
HAP	mg/kg	< 0.01
Hydrocarbures	mg/kg	< 100
PCB	mg/kg	< 0.05

Décision européenne (JOCE, 2003)

Classe III		Classe II	
Classe I		Traitement nécessaire	

Tableau 2.5.5: Résultats des dosages en polluants sur solides

Partie 3 : Chaux

2.6 Caractérisation de la chaux

2.6.1 Composition

La chaux utilisée dans notre étude est de la chaux vive de marque Lhoist PROVIACAL ST fabriquée par le Groupe Lhoist en Belgique. Elle contient plus de 90% de CaO et moins de 2% de MgO. C'est la composition CaO qui réagit avec de l'eau ensuite participe à une série de réactions entre les sédiments humides et la chaux pour la solidification des sédiments.

2.6.2 Granulométrie

La distribution granulométrique de la chaux est déterminée par diffraction laser et réalisée en suspension dans l'éthylène. On observe que la fraction argileuse, limoneuse et sableuse de la chaux est de 9.3%, 67.9% et 22.8% à la Figure 2.6.1.

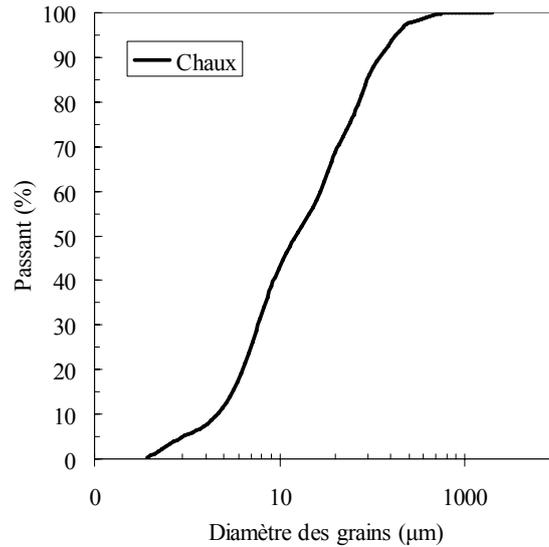


Figure 2.6.1: Granulométrie de la chaux

2.6.3 Transformation de la chaux

La chaux vive constituée principalement d'oxyde de calcium CaO , est obtenue par la calcination du calcaire pur à des températures supérieures à 900°C . La chaux aérienne ou chaux éteinte est obtenue par la réaction d'hydratation en présence de l'eau. Elle réagit avec le dioxyde de carbone CO_2 en créant le calcaire. Le processus de transformation est reporté dans la Figure 2.6.2.

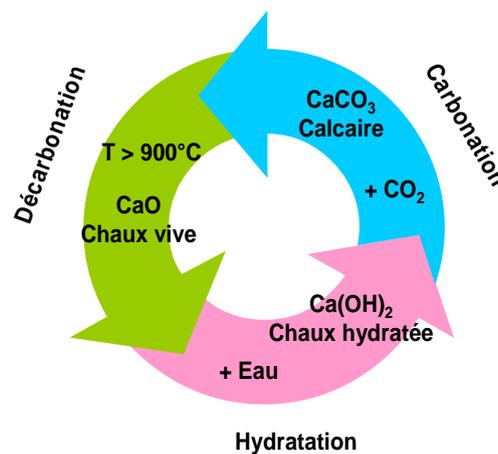


Figure 2.6.2: Processus de transformation

La chaux vive est choisie grâce à son aptitude à réagir avec les fractions argileuses contenant du SiO_2 et du Al_2O_3 dans les sédiments de dragage. Ce processus, qu'on appelle "réaction pouzzolanique" qui crée les produits C-S-H (Silicates de calcium hydratés) et C-A-H (Aluminates de calcium hydratés) et contribuent à la cimentation. La réactivité est essentiellement prise en compte dans les applications où la chaux est utilisée pour flocculer les argiles ou coaguler les impuretés (phénomène de floculation) dans les sédiments.

2.6.4 Evolution du pH des mélanges sédiment-chaux

Le pH des mélanges sédiment-chaux a été déterminé à l'aide de la méthode de Eades et Grim (1966), qui implique le mélange des matières solides avec de l'eau pure ($H_2O/solide=5:1$ en masse). On secoue périodiquement les échantillons puis on mesure le pH avec un pH-mètre après 1h. Cette procédure a été développée pour déterminer les besoins en chaux et donne une indication de la quantité de chaux nécessaire pour satisfaire les différentes réactions qui ont lieu. Si le pH du mélange est élevé à un point où il approche le pH d'un mélange eau-chaux, alors il est supposé que la chaux soit suffisante pour répondre à un échange d'ions et participer à d'autres réactions.

Les évolutions du pH sont présentées sur la Figure 2.6.3 pour les mélanges sédiment-chaux agités pendant 0h, 6h et 24h. La variation de pH est relativement faible entre la mesure après 6 heures d'agitation et celle après 24 heures d'agitation. On peut observer que la valeur du pH tout d'abord augmente en fonction de la teneur en chaux et se stabilise pour un dosage en chaux à 3%. On choisit donc dans cette étude un pourcentage de chaux à 3%. A titre de comparaison, on fixe les pourcentages de la chaux à 3%, 6% et 9% pour le traitement des sédiments marins.

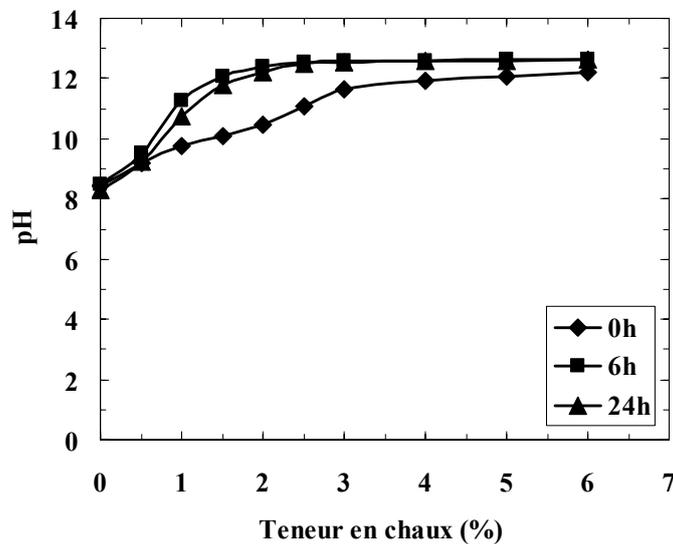


Figure 2.6.3 : Evolution du pH en fonction du dosage de chaux

Partie 4 : Ciment

2.7 Caractérisation du ciment

2.7.1 Composition

Le ciment utilisé pour traiter les sédiments étudiés dans cette étude est de type CEM I 42.5 R HSR LA, CIBELCOR. Ce ciment est obtenu par broyage simultané d'un minimum de 95% de clinker Portland et d'une faible quantité de sulfate de calcium utilisé comme régulateur de prise. Cette sorte de ciment est préférée car elle offre deux avantages: une haute résistance aux sulfates grâce à sa faible teneur en alumine et une bonne tenue au gel. Sa composition chimique et sa distribution granulométrique sont présentées dans le Tableau 2.7.1 et la Figure 2.7.1.

Composition	% Massique	Composition	% Massique
SiO ₂	21.4	Na ₂ O	0.15
Al ₂ O ₃	3.3	Cl-	0.03
Fe ₂ O ₃	4.0	%Na ₂ O eq	0.53
CaO	63.3	% C ₃ A	2.0
MgO	2.4	Perte au feu	1.0
SO ₃	2.8	Résidu insoluble	0.1
K ₂ O	0.57		

Tableau 2.7.1: Composition chimique du ciment CEM I 42.5 R HSR LA (<http://www.ccb.be>)

2.7.2 Granulométrie

La granulométrie du ciment est présentée sur la Figure 2.7.1 à l'aide de la technique laser. On note que la granulométrie du ciment est réalisée en suspension dans le fluide d'éthylène. Selon la Figure 2.7.1, on trouve que la proportion argileuse, limoneuse et sableuse est de 11.5%, 83.6% et 4.9%.

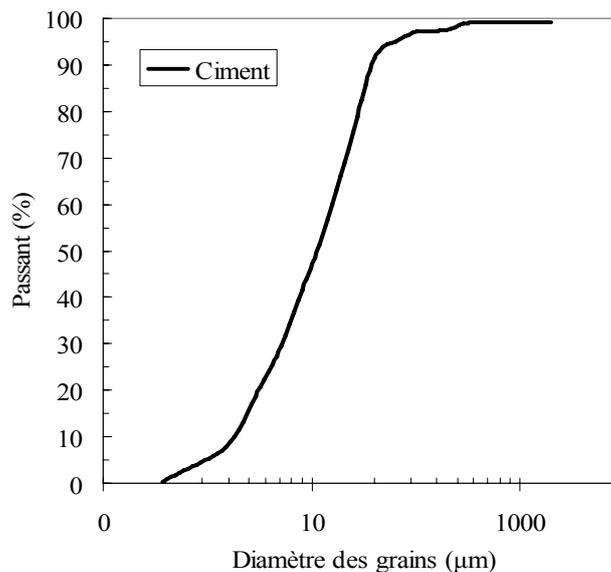


Figure 2.7.1: Granulométrie du ciment

2.7.3 Evolution du pH des mélanges sédiment-ciment

Dans les sédiments stabilisés par le ciment, la silice hydratée et l'alumine réagissent avec les ions calcium libérés lors de l'hydratation du ciment pour former des produits de liaison. Cette activité pouzzolanique peut se produire sur de longues périodes de temps. Un pH élevé est important et favorise l'activité chimique. Des essais ont été menés avec chacun des mélanges afin de déterminer si le pH tient compte des performances des systèmes sédiment-ciment.

Les évolutions du pH des mélanges sédiment-ciment sont présentées sur la Figure 2.7.2. Il est important de noter que la variation de pH est relativement faible entre la mesure après 6 heures d'agitation et celle après 24 heures d'agitation. Sur la Figure 2.7.2, la valeur du pH se stabilise pour un dosage en ciment à 6%. On choisit donc dans cette étude un pourcentage de ciment à 6%. A titre de comparaison, on fixe les pourcentages du ciment à 3%, 6% et 9% pour traiter les sédiments marins.

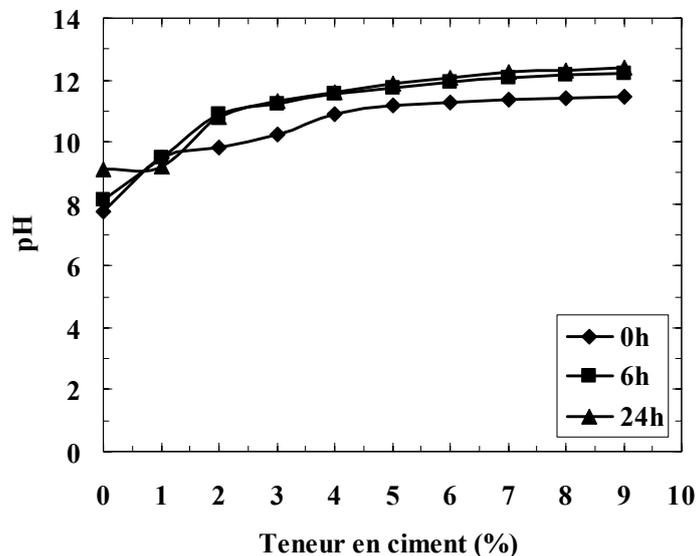


Figure 2.7.2: Evolution du pH en fonction du dosage de ciment

2.8 Conclusion

Les sédiments de dragage du port de Dunkerque sont considérés comme des déchets d'après la législation européenne «Décret n° 2002-540». Le stockage des sédiments non seulement pollue les environnements, mais aussi occupe une grande quantité de terrain. Donc la valorisation des sédiments en technique routière est un sujet attirant l'attention de nombreuses personnes.

Pour promouvoir l'utilisation des sédiments dans la construction routière, il est nécessaire de connaître leurs caractéristiques physiques, minéralogiques, chimiques et environnementales. Pour les sédiments étudiés dans cette étude, la teneur en eau initiale est d'environ 130%, et la masse volumique est 2.53g/cm^3 . La teneur en matière organique déterminée respectivement par la calcination à 450°C et par l'oxydation à l'eau oxygénée est d'environ 6.7% et 4.7%. La granulométrie permet de classer les sédiments d'un point de vue granulométrique dans le diagramme de la classification triangulaire des sols fins. La prise en compte des résultats issus de la granulométrie laser les classe comme des limons silteux, et elle ne modifie pas la classification des sédiments. Les sédiments se situent dans la zone de

matériaux dits limons très plastiques dans le diagramme de plasticité de Casagrande. Du point de vue général, les sédiments étudiés peuvent être classés en fonction de standard de classification des sols, comme la classification AASHTO et USCS. GTR fournit un bon critère de la classification des matériaux utilisés pour la construction des remblais et des couches de forme.

Les résultats de DRX montrent que les phases principales dans les sédiments sont la Calcite, le Quartz et la Halite, lorsque l'illite et la Chlorite existent dans une moindre mesure. Les éléments principaux des constitutions des sédiments sont le silicium, l'oxygène et le calcium, avec une présence de chlore, de sodium, de soufre, de fer et magnésium etc. L'évaluation des impacts environnementaux des sédiments a été approchée au travers de l'essai de lixiviation d'après la norme XP ISO/TS 21268-2. Au regard des résultats obtenus et en fonction de la législation choisie il apparaît que certains seuils pour une classification en déchet inerte peuvent être proscrits pour les sédiments marins de Dunkerque.

En terme des cendres volantes de classe F, il s'agit d'un résidu de procédé thermique qui porte le numéro de code 10 au niveau européen d'après le «*Décret n° 2002-540 du 18 avril 2002 relatif à la classification des déchets (JO du 20 avril 2002)*». Les cendres sont classées dans la catégorie des déchets inertes d'après la «*Circulaire n° 96-85 du 11 octobre 1996 aux centres issus de la filtration des gaz de combustion de combustibles d'origine fossile dans des installations classées pour la protection de l'environnement (BO min. Equip. n° 1109-96/93 du 10 décembre 1996)* » au niveau français.

Les cendres volantes utilisées dans cette étude sont sèches et la quantité des particules inférieures à 63 μm est de 82.3%. Le carbone inbrulé dont la quantité est de 5.45% est une matière indésirable pour le traitement des sédiments. La masse volumique des cendres volantes est de 2.24g/cm³, plus légère que celle des matériaux standards (2.65 à 2.70 g/cm³). L'évolution des mélanges sédiments-cendres volantes-eau varie dans une petite gamme autour de 8.7. Ceci désigne aussi une petite quantité de CaO contenue dans les cendres volantes. Une grande quantité de minéraux sont observés: le Quartz (SiO₂), la Mullite (Al₆Si₂O₁₃: 3Al₂O₃2SiO₂) et le Hématite (Fe₂O₃). Toutes les éléments se situent au-dessous du seuil relatif à la mise en décharge des déchets inertes, à l'exception de la concentration en molybdène, antimoine et sélénium.

Pour le ciment et la chaux, leurs compositions et granulométrie sont données. Les quantités de ciment et de chaux sont déterminées à 3%, 6% et 9% en utilisant l'évolution de pH pour les mélanges sédiments-ciment/chaux-eau.

Chapitre 3 Traitement des sédiments par S/S à base de ciment/chaux

Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, les sédiments possèdent une teneur en eau importante, une quantité non négligeable de fractions fines et un taux élevé de matières organiques. Pour une utilisation des sédiments en technique routière, il est nécessaire d'améliorer leur indice portant et leur performance mécanique. Dans cette partie, une méthodologie systématique sera étudiée en vue d'utiliser les sédiments en couche d'assise de chaussée. Après l'élaboration de formulations à base de sédiments, de chaux et de ciment, les caractéristiques de compactage et mécaniques sont explorées afin d'évaluer l'amélioration des capacités portantes et des performances mécaniques. Ensuite, la durabilité des mélanges élaborés est étudiée à l'aide de l'essai de gonflement, de l'essai de gel-dégel et de l'essai d'immersion. Les nouvelles phases minérales formées qui sont responsables de l'amélioration des propriétés mécaniques sont abordées en utilisant les techniques DRX et ATD/ATG.

3.1 Déshydratation

Généralement, la teneur en eau naturelle des sédiments de dragage est plus élevée que la limite de liquidité et beaucoup plus grande que la teneur en eau optimale. Il est donc nécessaire de baisser la quantité d'eau dans les sédiments dragués avant d'améliorer leurs caractéristiques mécaniques en laboratoire, pour une meilleure maniabilité et un meilleur transport. La méthode employée dans cette étude est composée de deux étapes: l'essorage et l'évaporation, afin d'abaisser le problème de la teneur en eau très élevée.

Globalement, l'eau dans les sédiments dragués est éliminée à travers les processus suivants présentés dans la Figure 3.1.1. Après la déshydratation et le séchage, les sédiments doivent être broyés par un concasseur afin d'assurer la granulométrie nécessaire des matériaux pour effectuer les essais à préciser.

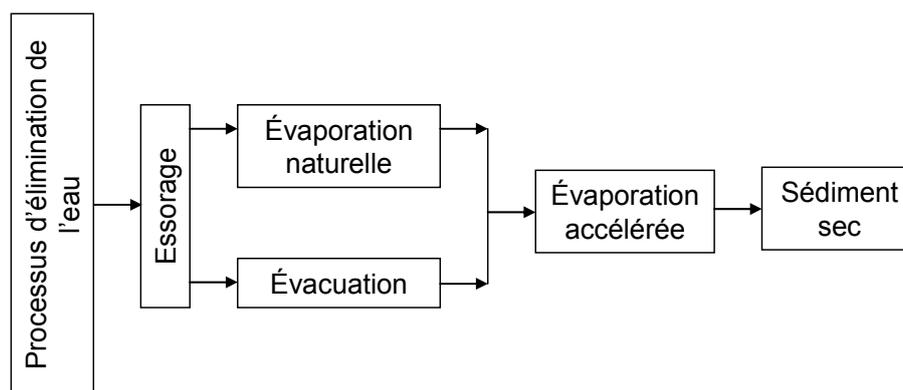


Figure 3.1.1: Processus de déshydratation des sédiments

Avant de verser les sédiments marins homogénéisés dans un bac plastique, on doit étendre une couche de géo-textile sur une couche de cailloux pour préserver les particules très fines de la fuite. Dès que les sédiments sont versés dans le bac, la quantité de l'eau contenue dans les sédiments diminue de deux façons: l'évaporation naturelle et l'évacuation à travers des trous de bac (Figure 3.1.2).

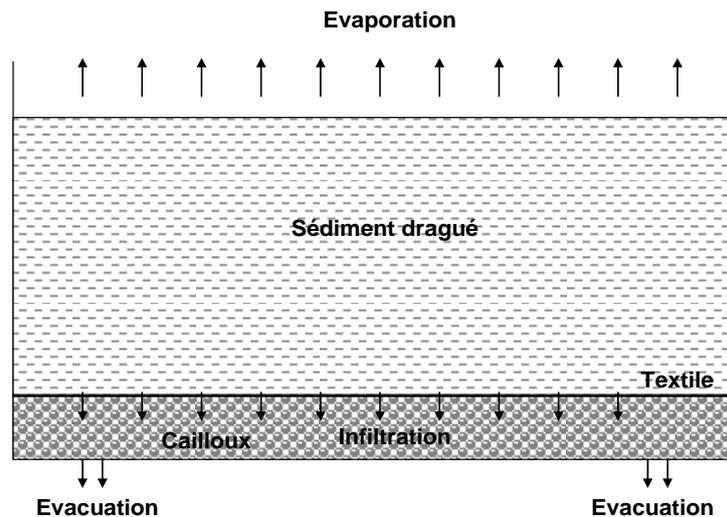


Figure 3.1.2: Schéma de déshydratation des sédiments marins

Puis, une fois la décantation terminée, on met les sédiments dans une étuve à 40°C pour accélérer le processus d'évaporation, jusqu'à un état hydrique jugé suffisamment sec pour commencer l'essai. Cette température a été choisie, d'une part afin de simuler les conditions du terrain, d'autre part afin de prévenir la dégradation des matières organiques et la volatilisation de certaines substances.

3.2 Comportements mécaniques des matériaux formulés

Pour une utilisation des matériaux en technique routière, il est nécessaire de vérifier plusieurs critères à court et long terme au moyen des principaux paramètres nécessaires pour identifier les performances mécaniques. L'objectif est de rendre les sédiments utilisables en améliorant ses caractéristiques rhéologiques, chimiques, mécaniques ainsi que leurs durabilité. Un certain nombre de paramètres complémentaires ont été évalués. Au final, 3 types d'essais ont été mis en oeuvre:

- des essais de poinçonnement permettant d'apprécier l'indice portant immédiat (IPI) (NF P94-078, 1997; NF P94-093, 1999),
- des essais de compression simple afin de déterminer l'âge autorisant la mise en circulation de la couche traitée (NF P98-232-1, 1991),
- des essais de traction brésiliens pour évaluer la résistance et le module élastiques en traction (R_t et E) (NF P98-232-3, 1993).

3.2.1 Caractéristiques de compactage

3.3.1.1 Principe

Les caractéristiques de compactage Proctor sont des paramètres très utiles pour identifier les matériaux et pour définir des spécifications de compactage qui leur sont applicables lorsqu'ils sont utilisés dans la construction des remblais et des couches de forme. Le principe de ces essais consiste à compacter les matériaux à plusieurs teneurs en eau selon une énergie donnée selon la norme NF P94-093 (1999).

Les matériaux préalablement malaxés avec une certaine quantité d'eau, sont introduits dans le moule CBR en 5 couches. Entre chaque ajout, on procède à un compactage de la couche avec une dame en respectant un protocole suivant: 56 coups par couche, appliqués par séries de 7 coups comme

indiqué Figure 3.2.1. A la fin de l'essai, la rehausse est retirée et on arase la surface du moule. Connaissant sa masse et son volume (dimension normalisée: diamètre = 152 mm, hauteur = 126.6 mm), on peut déterminer la masse volumique humide ρ_h du matériau compacté et sa masse volumique sèche ρ_d . A partir de cette relation entre la masse volumique sèche et la teneur en eau, on peut déterminer les caractéristiques des matériaux formulés: la masse volumique sèche maximale et la teneur en eau optimale.

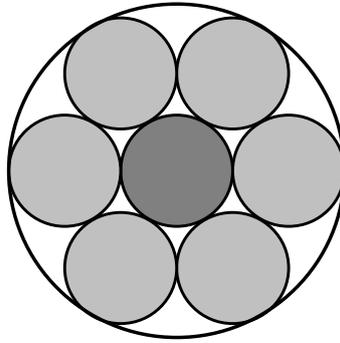


Figure 3.2.1: Protocole de compactage

En plus des essais de compactage, on peut mesurer l'indice portant immédiat (IPI). Celui-ci est défini conventionnellement pour évaluer l'aptitude d'un sol ou d'un matériau élaboré à supporter la circulation des engins de chantier. L'indice portant immédiat d'un sol compacté est déterminé par un essai de poinçonnement avec un piston de 19.3 cm^2 de section, enfoncé à la vitesse constante de 1.27 mm/min , conformément à la norme NF P94-078 (1997). Par convention, l'IPI est la plus grande des 2 valeurs suivantes:

$$(\text{Effort de pénétration à } 2.5 \text{ mm d'enfoncement (en KN)} \times 100)/13.35$$

$$(\text{Effort de pénétration à } 5.0 \text{ mm d'enfoncement (en KN)} \times 100)/20$$

3.2.1.2 Détermination des paramètres Proctor modifié des mélanges

Selon l'évolution du pH des mélanges de sédiment-chaux et sédiment-ciment, on a déterminé les pourcentages massiques de la quantité de liant (ciment et chaux) à 3%, 6% et 9% de la masse sèche totale. Les courbes des Figures 3.2.2 et 3.2.3 rassemblent les résultats de l'essai Proctor modifié ainsi que ceux de l'IPI sur les sédiments bruts et sédiments traités à 3%, 6% ou 9% de liant. On peut observer la variation de la masse volumique et de l'IPI en fonction de la teneur en eau. Les courbes du degré de saturation (80% et 100%) sont également tracées dans les Figures 3.2.2 (a) et 3.2.3 (a).

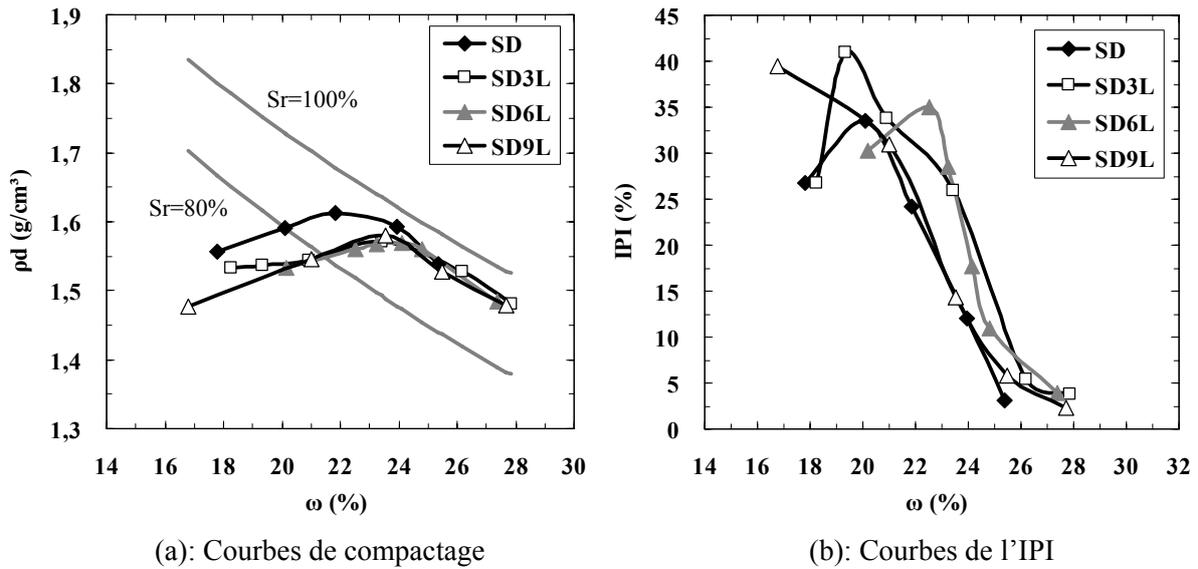


Figure 3.2.2: Courbes de compactage des sédiments traités à la chaux

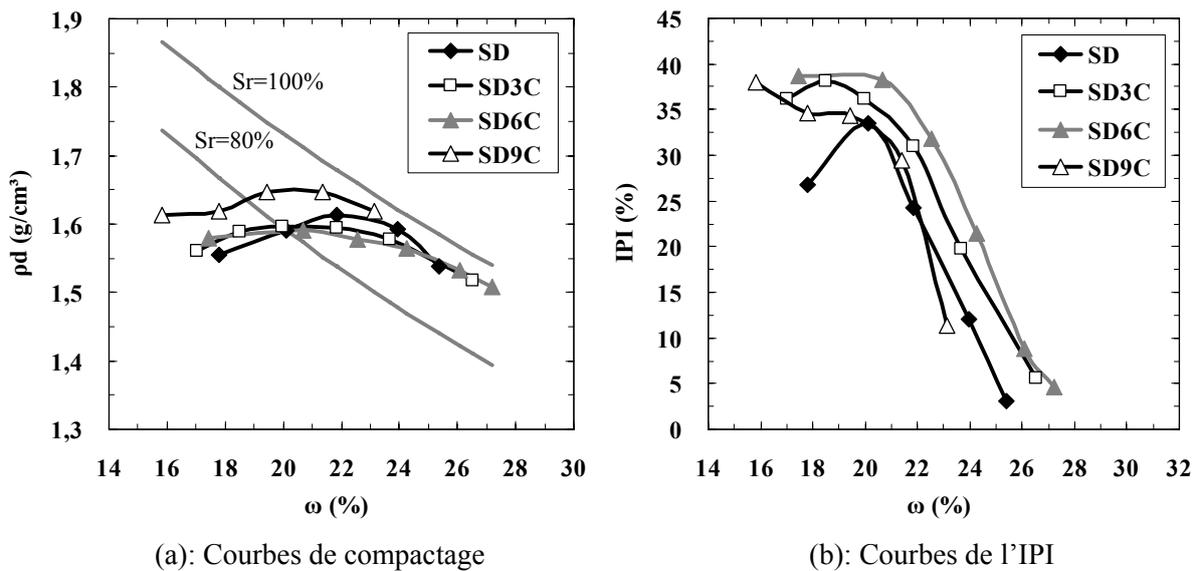


Figure 3.2.3: Courbes de compactage des sédiments traités au ciment

En se basant sur les résultats des courbes des Figures 3.2.2 et 3.2.3, on peut établir les variations de ω_{opt} et ρ_{opt} en fonction de la teneur en liant, ces résultats sont présentés sur la Figure 3.2.4. Théoriquement, les paramètres de densification optimale des sédiments bruts sont déterminés à l'aide de l'essai Proctor modifié qui avait donné les résultats suivants: $\omega_{opt} = 21.6\%$, $\rho_{opt} = 1.612\text{g/cm}^3$, $IPI = 24.9\%$.

Dans le cas où les sédiments seront traités à la chaux, la teneur en eau optimale (ω_{opt}) augmente en fonction de la teneur en chaux, la masse volumique sèche maximale diminue par rapport aux sédiments non traités et se stabilise. Pour le traitement au ciment, ω_{opt} des sédiments traités diminue en fonction de la teneur en ciment, ρ_{opt} diminue à 3% et 6% de ciment mais augmente à 9% de ciment. En comparant les deux méthodes de traitement, les teneurs en eau optimales des sédiments traités à la chaux sont plus élevées que celles des sédiments traités au ciment. Néanmoins, les masses

volumiques des sédiments traités à la chaux sont moins élevées que celles des sédiments traités au ciment.

La chaux consomme plus d'eau que le ciment à cause de l'action immédiate, parce qu'elle contient plus de CaO qui s'hydrate très rapidement. Ceci a pour conséquence d'augmenter sensiblement la demande en eau initiale du mélange. Cela provoque un abaissement de la masse volumique des sédiments traités à la chaux par rapport à celle des sédiments traités au ciment. Normalement, la chaux vive consomme l'eau grâce à trois facteurs: la consommation d'eau par hydratation, la vaporisation produite par la chaleur dégagée lors de l'hydratation et l'apport de matière sèche. La perte en eau est de l'ordre de 1% par pourcentage de chaux vive introduite et de l'ordre de 0.3-0.5% par pourcentage de ciment (Scordia, 2008).

En effet, l'incorporation de chaux et de ciment dans les sédiments contenant des fractions argileuses se traduit par un apport massif d'ions OH^- et Ca^{2+} . Ils modifient les propriétés électriques des argiles ce qui a pour conséquence de modifier la plasticité des sédiments traités (augmentation de la limite de liquidité) ainsi que sa portance (augmentation de l'IPI). L'échange cationique mène à l'agglomération des fines particules en particules grossières, des pores plus grands se forment en contribuant à la diminution des masses volumiques des sédiments traités.

Pour les sédiments traités au ciment, la masse volumique sèche maximale et la teneur en eau optimale diminuent simultanément pour les mélanges SD3C et SD6C. Ce phénomène, qui est peut-être lié à la forme des particules du ciment et à l'effet d'agglomération des fines dû à l'ajout du ciment, n'est pas inconsistant avec l'étude de Al-Amoudi et al. (2010), mais coïncide avec les résultats de Dubois (2006). La masse volumique sèche maximale du mélange SD9C augmente à la quantité du ciment de 9% dû à la diminution importante de la teneur en eau optimale.

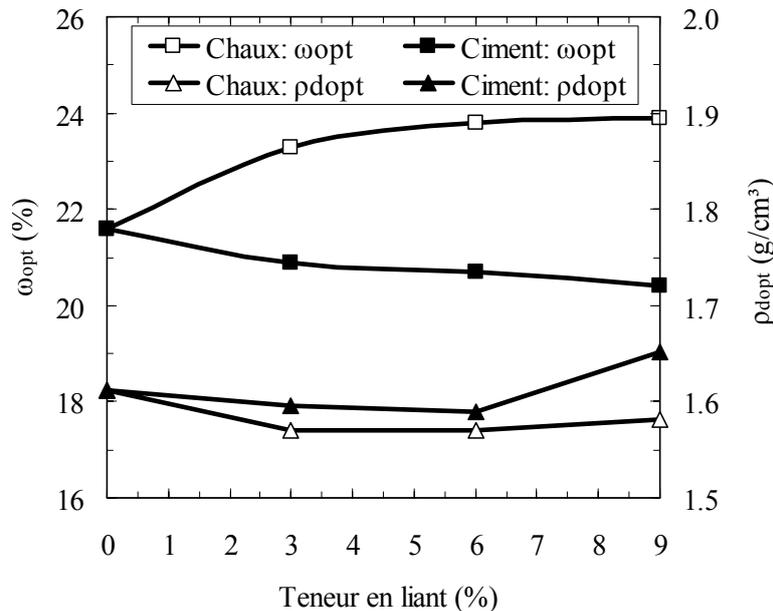


Figure 3.2.4: Variation de ω_{opt} et ρ_{opt} en fonction de la teneur en liant

L'évolution de l'IPI des sédiments traités au ciment et à la chaux est présentée sur la Figure 3.2.5. On remarque que l'IPI des sédiments traités au ciment est plus élevé que celui des sédiments traités à la chaux pour les formulations à la même teneur en liant. Cela montre qu'en comparaison au ciment, l'incorporation de chaux n'augmente pas considérablement la capacité à supporter la charge.

Pour les sédiments traités à la chaux, la valeur de l'IPI augmente à 3% de chaux, puis diminue lorsque la teneur en chaux augmente à 6% et 9%. On trouve surtout que les valeurs de l'IPI des mélanges SD6L et SD9L sont inférieures à celle des sédiments bruts, du fait de l'ajout de la chaux contribuant à l'augmentation de la quantité d'eau. Pour les sédiments traités au ciment, l'IPI

augmente avec la teneur en ciment, mais commence à diminuer lorsque la quantité du ciment dépasse 6%.

L'IPI atteint la valeur maximale de 38.3% à 6% de ciment pour les formulations sédiment-ciment et 26.5% à 3% de chaux pour les formulations sédiment-chaux. Du point de vue de la valeur de l'IPI, on trouve que l'ajout de 6% de ciment est le meilleur choix pour le traitement au ciment et 3% de chaux pour le traitement à la chaux. Cela correspond bien à l'étude de l'évolution de pH des mélanges sédiment-chaux et sédiment-ciment. Le pH se stabilise à 3% de chaux pour les mélanges sédiment-chaux et à 6% de ciment pour les mélanges sédiment-ciment.

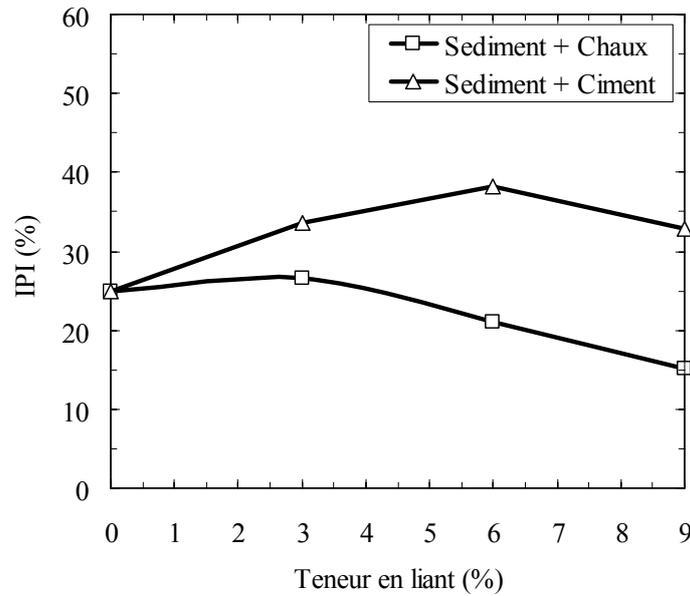


Figure 3.2.5: Variation de l'IPI en fonction de la teneur en liant

3.2.2 Performances mécaniques à court terme et à long terme

3.2.2.1 Réalisation des éprouvettes

Selon la norme NF P98-114-3 (2001), les éprouvettes dont les dimensions sont de 10 cm de longueur et de 5 cm de diamètre (le volume est donc connu, 196.35 cm³) sont utilisées pour réaliser les essais mécaniques, en considérant que la taille maximale des matériaux est inférieure 6.3 mm. Le protocole de confection par compression statique, la description des moules et les modalités de conservation normale sont précisées dans la norme NF P98-230-2 (1993).

En ce qui concerne la confection des éprouvettes, la quantité de matériau humide de chaque éprouvette est calculée basée selon l'équation 3.2.1, après avoir déterminé la masse volumique sèche et la teneur en eau souhaitée. Les éprouvettes confectionnées doivent être conservées dans une boîte en plastique hermétique à 20°C.

$$M = \frac{V \times \rho_d \times (100 + w)}{100} \quad (3.2.1)$$

avec:

M: Masse théorique de l'éprouvette à la confection (g)

ρ_d : Masse volumique sèche fixée à la confection de l'éprouvette (g/cm^3), $\rho_{de} = 98.5\% \rho_d$ pour la résistance en compression simple, $\rho_{de} = 96\% \rho_d$ pour la résistance en compression diamétrale
 V: Volume de l'éprouvette (cm^3)
 w : Teneur en eau fixée à la confection de l'éprouvette (%)

3.2.2.2 Evolution de la résistance et du module d'élasticité

(a): Essais en compression

Les essais de compression permettent de déterminer l'âge autorisant la mise en circulation des engins de chantier sur la couche de forme. La résistance en compression sera évaluée après 14, 28, 60, 90 et 360 jours de maturation normale. Le critère de traficabilité est jugé satisfaisant dès lors que la résistance en compression simple (R_c) est supérieure à 1 MPa. Il s'agit d'estimer à l'aide des courbes d'évolution le temps nécessaire pour que cette condition soit vérifiée. Les courbes d'évolution des résistances en compression permettent également d'apprécier les cinétiques de prise des différents liants. Les résultats à 14, 28, 60 et 90 jours des sédiments non traités et des sédiments traités au ciment et à la chaux sont présentés sur la Figure 3.2.6. Trois échantillons au minimum sont effectués pour chaque formulation et chaque période de cure, les résistances reportées sont les valeurs moyennes calculées sur 3 éprouvettes.

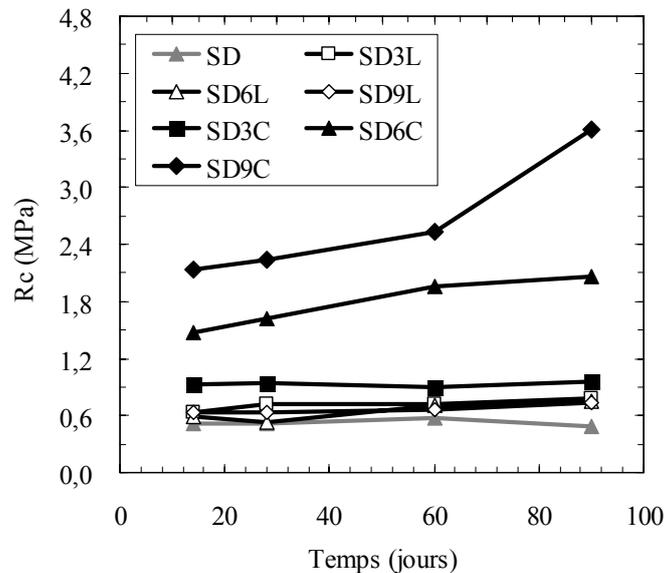


Figure 3.2.6: Evolution des résistances en compression des matériaux élaborés

La Figure 3.2.6 compare l'ensemble des données obtenues sur les sédiments non traités et traités. On observe un gain de résistance en compression des sédiments traités pour tous les taux de substitution par rapport au sédiment brut. Cependant l'incorporation de chaux ne provoque pas une amélioration remarquable de la résistance en compression en comparant avec les sédiments non traités. Le temps de cure et la quantité de la chaux ont une faible influence sur l'amélioration de la résistance en compression. Parmi les formulations sédiment-chaux, 3% de chaux est un meilleur choix du point de vue de la résistance en compression, parce que l'augmentation de la quantité de chaux influence

faiblement les résistances des sédiments. Il faut noter que les résistances en compression des sédiments traités à la chaux vive sont inférieures à 1 MPa à tous les périodes de cure.

En ce qui concerne le traitement au ciment, on trouve que la résistance en compression des formulations augmente avec l'augmentation de la quantité du ciment et de la période de cure. Pour la formulation SD3C, il semble que la résistance est quasiment constante pour la période de cure de 14 jours à 90 jours. Pour les formulations SD6C et SD9C, la résistance en compression se développe sensiblement en fonction du temps. Pour les sédiments traités au ciment, on remarque que toutes les résistances en compression (à 14, 28, 60j, 90 et 360 jours) sont supérieures à 1 MPa, excepté la formulation SD3C. On considère qu'une couche de forme est circulaire dès lors que sa résistance en compression est supérieure à 1 MPa.

(b): Essais en traction

L'objectif de l'essai en traction est de déterminer les performances mécaniques: résistance en traction R_t et module d'élasticité E à 14, 28, 60, 90 et 360 jours de maturation. Le couple (R_t , E) est évalué au moyen de l'essai en traction Brésilien décrit dans la norme NF P98-232-3 (1993) sur des éprouvettes cylindriques d'élanement 2. Le principe de l'essai en traction consiste à effectuer une compression diamétrale en appliquant une charge linéique sur 2 génératrices diamétralement opposées de l'éprouvette cylindrique (Figure 3.2.7 (a) et (b)).

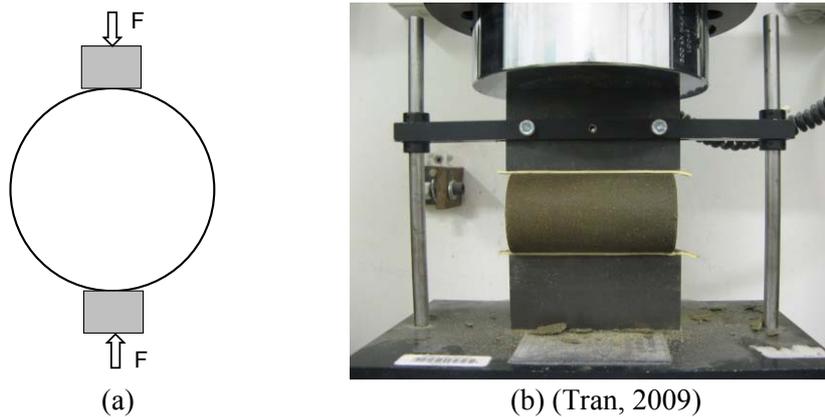


Figure 3.2.7: Principe de l'essai de traction Brésilien

La résistance en 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 l'équation suivante (Equation 3.2.2):

$$R_t = 0.8R_{tb} = 0.8 \times 2 \times 10^{-2} \times \frac{F_r}{\pi \phi h} \tag{3.2.2}$$

avec:

- R_t : Résistance à la traction estimée de R_{tb} (MPa),
- R_{tb} : Résistance en compression diamétrale (MPa),
- F_r : Force appliquée sur l'éprouvette au moment de la rupture (N),
- ϕ : Diamètre de l'éprouvette (cm),
- h : Hauteur de l'éprouvette (cm),

La Figure 3.2.8 permettent d’apprécier l’effet du ratio de substitution des sédiments par le liant sur la résistance en traction des matériaux. Pour les formulations SD3L, SD6L et SD9L, on observe un très faible effet de la quantité de chaux sur l’évolution de la résistance par rapport au sédiment brut. Par rapport au sédiment brut, on remarque une amélioration de la résistance en traction pour la formulation SD3C dû à l’ajout de ciment. Pour les formulations SD6C et SD9C, l’ajout de 6% et 9% du ciment provoque une évidente augmentation de la résistance en traction en fonction du temps et de la quantité du ciment. Cela est principalement grace à la formation du lien C-S-H produit par la réaction d’hydratation. On note que l’évolution de la résistance en traction est consistante avec celle de la résistance en compression pour les matériaux formulés.

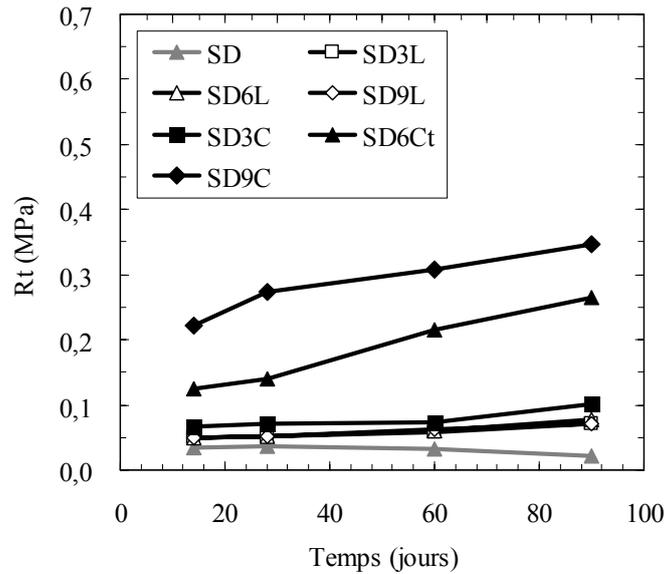


Figure 3.2.8. Résistance en traction en fonction du temps et de la quantité du liant

L’évolution du module d’élasticité est présentée sur la Figure 3.2.9 pour les matériaux formulés. Que ce soit le ciment ou la chaux, ils peuvent tous les deux, contribuer à l’amélioration du module d’élasticité par rapport à celui du sédiment brut, particulièrement pour les formulations SD6C et SD9C. Les modules d’élasticité augmentent avec le temps de cure pour les sédiments traités. En terme d’effet de la quantité du liant, les modules d’élasticité augmentent avec la quantité du ciment, mais elles proche les unes des autres pour les formulaitons concernant la chaux. Par comparaison, on observe que le module d’élasticité de la formulation SD3C est proche de celui des sédiments traités à la chaux vive à chaque période de cure, lorsque les modules d’élasticité des formulations SD6C et SD9C sont beaucoup élevés à celles d’autres formulations.

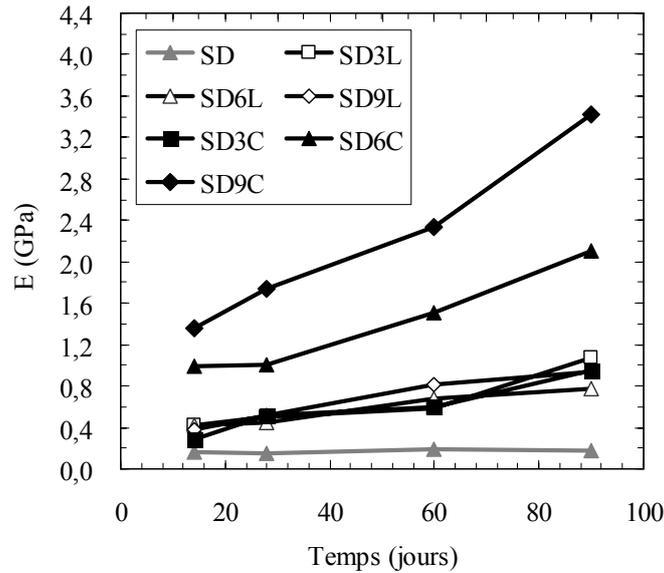


Figure 3.2.9. Module élastique en fonction du temps et de la quantité du liant

Après l'analyse des résultats obtenus, il est intéressant de remarquer que l'évolution de la résistance en compression est pratiquement identique à celle de la résistance en traction. En fonction des différents traitements, les évolutions et les performances atteintes sont sensiblement différentes. En effet, c'est le ciment qui permet d'obtenir les meilleures performances mécaniques à 90 jours, sans compter que la forme de la courbe laisse envisager des résistances encore supérieures au-delà de cette échéance. Les performances ne semblent pas totalement se stabiliser après 90 jours. Cela pourrait s'expliquer par le fait que lors de l'hydratation du ciment, il se forme progressivement de la portlandite, ce qui permet de former de nouveaux hydrates qui améliorent la résistance du matériau.

3.2.2.3 Evaluation de l'aptitude des sédiments

Afin d'évaluer la faisabilité pour l'utilisation des mélanges élaborés en couche d'assise de chaussée, il est nécessaire de positionner les résultats sur l'abaque de classification à partir des données (R_t et E). Il faut noter que les valeurs de référence pour la classification des matériaux sont définies après 360 jours de cure normale. Lorsque la période ne permet pas d'effectuer la mesure à 360 jours, on peut déterminer le module élastique et la résistance en traction à 360 jours en utilisant les formules empiriques (Formules 3.2.3 (a) et (b), 3.2.4 (a) et (b)) d'après les valeurs à 28 jours ou 90 jours en fonction du type de liants utilisés.

Basés sur la norme NF P98-113 (1994) et NF P98-114-2 (2009), les paramètres mécaniques à 360 jours sont calculés respectivement en utilisant les Formules 3.2.3 (a) et (b) pour les sédiments traités au ciment et les Formules 3.2.4 (a) et (b) pour les sédiments traités à la chaux. Les résultats présentés dans l'abaque de classification ci-après sont les valeurs moyennes de trois éprouvettes.

$$\text{A 28 jours, } \frac{R_{t28 \text{ jours}}}{R_{t360 \text{ jours}}} = 0.60 \quad 3.2.3 \text{ (a)}$$

$$\frac{E_{t28 \text{ jours}}}{E_{t360 \text{ jours}}} = 0.65 \quad 3.2.3 \text{ (b)}$$

$$\text{A 90 jours, } \frac{R_{t90 \text{ jours}}}{R_{t360 \text{ jours}}} = 0.70 \quad 3.2.4 \text{ (a)}$$

$$\frac{E_{t90 \text{ jours}}}{E_{t360 \text{ jours}}} = 0.75 \quad 3.2.4 \text{ (b)}$$

Sur la base des valeurs estimées à 360 jours en utilisant les coefficients empiriques, on peut classer les matériaux élaborés sur l'abaque de classification dans la Figure 3.2.10.

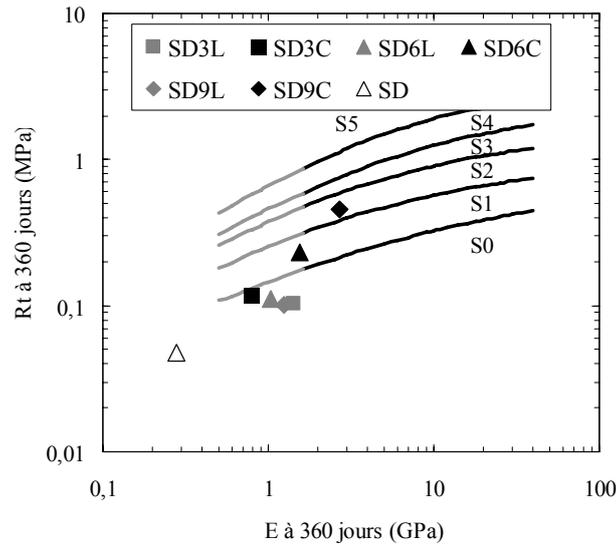


Figure 3.2.10: Positionnement des matériaux élaborés à 360 jours dans l'abaque de classement

A partir de ces résultats, on observe que la formulation SD9C appartient à la classe S2, lorsque la formulation SD6C appartient à la classe S1. Pour les autres formulations élaborées, toutes se situent dans la zone de la classe S0. La formulation SD9C révèle une performance mécanique adéquate pour une utilisation en couche d'assise de chaussée. Cependant, les autres formulations pourraient être utilisées comme matériaux d'une couche d'assise de chaussée à faible intensité du trafic.

3.3 Durabilité des matériaux formulés

3.3.1 Propriété de gonflement

3.3.1.1 Principe

L'objectif de l'essai de gonflement est d'évaluer la portance d'éprouvettes confectionnées selon le protocole de compactage Proctor Modifié, immédiatement après leur fabrication et après 4 jours d'immersion dans l'eau à 20°C. Il permet également de vérifier l'exactitude des paramètres Proctor et de mesurer le gonflement vertical du matériau compacté et la valeur d'IPI avant et après immersion à l'eau par l'essai de poinçonnement. Pour chaque formulation, une éprouvette est préparée dans des moules CBR en suivant le protocole de compactage de l'essai Proctor Modifié selon la norme NF P94-093 (1999). Lors de la préparation des mélanges, les quantités d'eau ajoutées sont calculées en fonction des valeurs obtenues par les essais de compactage.

On prépare les matériels de mise en immersion et de mesure de gonflement selon la norme. Les matériels sont constitués:

- d'un bac de hauteur suffisante pour assurer l'immersion complète des éprouvettes, en ménageant au-dessous des éprouvettes une lame d'eau d'au moins 10 mm.
- d'un disque en matière plastique d'un poids n'excédant pas 300g environ, perforé par au moins 25 trous de 3mm ± 1mm de diamètre, uniformément répartis. Ce disque comporte également une tige permettant de réaliser la mise à zéro du dispositif de mesure du gonflement.
- d'une série de surcharges dont les masses doivent être d'environ 5.0 kg (2.8 kPa).
- d'un comparateur permettant la mesure du gonflement avec une précision de 0.01mm.

3.3.1.2 Gonflement et IPI après immersion

Le déplacement vertical ΔH (mm) est relevé régulièrement jusqu'au terme des 4 jours d'immersion à l'eau dans un bac. G_{ver} (%) correspond au rapport du déplacement vertical avec la hauteur initiale de l'échantillon, soit:

$$G_{ver} = \frac{\Delta H}{H} \times 100 \quad (3.3.1)$$

ΔH (mm) est le déplacement vertical

H (mm) est la hauteur initiale d'éprouvette

Les variations des gonflements verticaux en fonction du temps sont donnés sur la Figure 3.3.1 et le Tableau 3.3.1. On peut observer que, pour les mélanges de sédiment-chaux, la déformation atteint le niveau asymptotique en 2 jours. En ce qui concerne les mélanges de sédiment-ciment, le gonflement se stabilise quasiment en 1 jour. De plus, au premier stade de la déformation, la vitesse d'augmentation du gonflement des sédiments traités à la chaux est plus rapide que celle des sédiments traités au ciment.

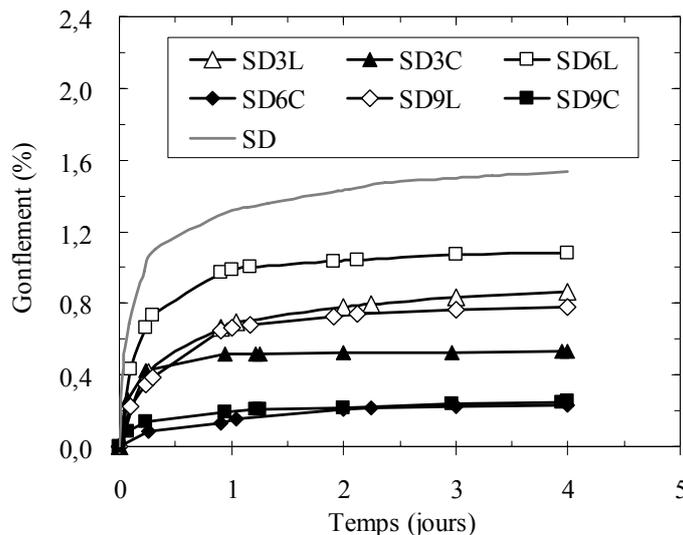


Figure 3.3.1: Gonflement vertical en fonction du temps et de la teneur en liant

Tous les échantillons après traitement montrent une réduction du gonflement par rapport au sédiment brut. Pour les sédiments traités à la chaux, le G_{ver} atteint la valeur maximale de 1.08% à 6% de chaux, puis diminue jusqu'à 0.78% à 9% de chaux. Pour les sédiments traités au ciment, le G_{ver} atteint le gonflement maximal de 0.53% à 3% de ciment, lorsque celui des sédiments bruts est d'environ 1.54%. La diminution du gonflement des sédiments traités peut être expliquée par le phénomène suivant: La diminution du gonflement est liée à la réduction de la plasticité qui est due à une altération des films d'eau autour des minéraux argileux dans le sédiment. Les cations Na^+ et K^+ sont échangés par Ca^{2+} qui sert à lier les particules des sédiments les unes aux autres.

Les résultats en terme de teneur en eau initiale, de densité sèche, d'indice d'IPI avant et après immersion et de gonflement, sont montrés dans le Tableau 3.3.1. On trouve que les gonflements de toutes les formulations sont inférieurs à 5%. C'est à dire que ce traitement au ciment ou à la chaux est considéré comme adapté et acceptable d'après la norme NF P94-100 (1999).

En terme d'indice IPI des sédiments bruts, on observe une augmentation considérable pour les sédiments traités au ciment due à la réaction d'hydratation et une diminution pour les sédiments traités à la chaux. Dans cette étude, on définit le rapport d'IPI (IPI après immersion divisé par IPI avant immersion) afin d'évaluer quantitativement le changement d'IPI après immersion à l'eau pendant 4 jours. Ainsi lorsque le rapport est supérieur à 1, c'est-à-dire que la valeur d'IPI augmente après l'essai d'immersion à l'eau. Contrairement, l'IPI diminue après immersion quand le rapport est inférieur à 1.0. Tous les rapports d'IPI des sédiments traités à la chaux sont inférieurs à 1, alors que tous les rapports d'IPI des sédiments traités au ciment sont supérieurs à 1.

Matériaux	Teneur en eau (%)	Masse volumique sèche (g/cm^3)	IPI avant immersion (%)	IPI après immersion (%)	Rapport d'IPI	Gonflement (%)
SD	22.4	1.395	26.7	10.7	0.40	1.54
SD3L	21.8	1.519	45.1	32.7	0.73	0.86
SD6L	23.9	1.551	29.4	28.2	0.96	1.08
SD9L	22.9	1.506	36.9	32.4	0.88	0.78
SD3C	21.5	1.581	30.3	53.7	1.77	0.53
SD6C	21.1	1.529	27.5	76.1	2.77	0.23
SD9C	20.7	1.469	29.8	110.6	3.71	0.25

Tableau 3.3.1: Résistances d'immersion à l'eau pendant 4 jours

3.3.2 Essai de résistance au gel - dégel

3.3.2.1 Principe

Le processus de l'essai de résistance au gel-dégel est défini d'après la norme NF P98-234-1 (1992). Pour quantifier l'effet de gel-dégel sur les sédiments, un coefficient de résistance au gel λ (%) est défini comme suit:

$$\lambda = \frac{R_{c28} - R_{cf}}{R_{c28}} \times 100 \quad (3.3.2)$$

où:

R_{ctf} : moyenne des résistances en compression simple de trois éprouvettes ayant subi des cycles de gel-dégel en MPa,

R_{c28} : moyenne des résistances en compression simple des trois éprouvettes témoins en MPa.

Cette norme ne précise cependant pas le critère adapté de traficabilité pour évaluer la faisabilité des matériaux formulés en assise de chaussée. D'après le GTS (2000), la résistance au gel est définie par rapport à une valeur minimale de résistance en traction brésilien. On considère que le matériau traité résiste au gel si sa valeur de R_{tb} à l'âge correspondant à la première apparition statistique du gel est supérieure à 0.25 MPa (GTS, 2000; NF P94-102-1, 2001; NF P94-102-2, 2001). Cependant, on préfère un critère lié à la résistance en compression simple pour des raisons pratiques. Il est généralement admis que le rapport entre la résistance en compression et celle en traction est de l'ordre de 10, quel que soit l'âge considéré. Par conséquent on peut calculer la résistance en traction selon la résistance en compression divisée par 10.

La procédure utilisée dans cette étude est présentée ci-dessous:

- (a). Préparer des échantillons et les conserver dans des étuis pendant 28 jours dans la salle climatisée
- (b). Immerger les échantillons après une cure de 28 jours dans l'eau à $20^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$ pendant 1 jour
- (c). Sortir les échantillons de l'eau et les déposer horizontalement sur un égouttoir pendant 1 heure
- (d). Etancher les échantillons avec un film de polyéthylène thermorétractable et mettre les échantillons dans une enceinte climatique programmable
- (e). Faire subir 20 cycles de gel-dégel et un cycle de gel-dégel dure 24 h et comporte:
 - une phase à une température d'enceinte dans la zone utile de $-10^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ et d'une durée égale à 4 h
 - élever la température de -10°C à $+10^{\circ}\text{C}$ en 2 h
 - une phase à une température d'enceinte dans la zone utile de $+10^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ et d'une durée égale à 14h
 - abaisser la température de $+10^{\circ}\text{C}$ à -10°C en 4 h
- (f). Sortir les échantillons de l'enceinte et les mettre à $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ pendant 24 h

3.3.2.2 Résultats

Les résistances au gel-dégel R_{ctf} , les résistances à 28 jours R_{c28} et les taux de perte en pourcentage de résistance $(R_{ctf}-R_{c28})/R_{c28}$ pour les formulations élaborées sont présentés dans le tableau 3.3.2. Les taux de perte de résistance peuvent refléter l'amplitude de la perte de résistance au cycle de gel-dégel. Pour les échantillons cylindriques des sédiments bruts, ils sont détruits à l'immersion de l'eau en 24 heures. Donc ce n'est pas possible d'évaluer l'effet du gel-dégel sur la résistance en compression pour les échantillons des sédiments bruts.

Matériaux	R _{c28} (MPa)	R _{ctf} (MPa)	λ (%)
SD	0.51	/	/
SD3L	0.72	0.61	15.7
SD6L	0.55	0.52	5.5
SD9L	0.62	0.55	10.8
SD3C	0.94	0.54	42.4
SD6C	1.62	1.15	29.1
SD9C	2.24	1.65	26.5

Tableau 3.3.2: Effet de gel-dégel sur la résistance des formulations élaborées

Pour les sédiments traités, on observe que le cycle gel-dégel engendre souvent la diminution marquée des résistances en compression. Les taux de perte de résistance des sédiments traités à la chaux sont inférieurs à ceux des sédiments traités au ciment. Cependant, de ce que nous observons, on ne peut pas déduire que la capacité des sédiments traités à la chaux est meilleure que celle des sédiments traités au ciment. Pendant le processus de destruction des échantillons, l'immersion à l'eau en 32 jours change l'humidité et la saturation dans les échantillons. Les cycles au gel-dégel conduisent à la transformation entre l'eau et la glace, provoquant des changements du volume des pores. Par conséquent, la structure globale de l'échantillon subit de destructions significatives. Cela conduit à la diminution importante des résistances en compression après le cycle au gel-dégel.

3.3.3 Essai d'immersion à l'eau pendant 32 jours

3.3.3.1 Principe

L'évaluation de la sensibilité à l'eau est réalisée par le rapport de la résistance en compression simple d'éprouvettes ayant subi 28 jours de cure normale suivis de 32 jours d'immersion totale dans de l'eau à 20°C (R_{cim}) et de la résistance en compression simple d'éprouvettes ayant subi 60 jours de cure normale à 20°C (R_{c60}). Pour la phase d'immersion des éprouvettes, nous les avons placées dans un bac en acier inoxydable, lui-même disposé dans une pièce climatisée maintenue à 20°C. Le rapport R_{cim} / R_{c60} permet d'apprécier l'insensibilité à l'eau du matériau et de classer les sols en fonction de leur résistance à l'immersion au jeune âge selon la norme NF P94-102-1 (2001) et NF P94-102-2 (2001). Les deux normes recommandent de classer les sols en trois types: Classe R_{im1}, Classe R_{im2} et Classe R_{im3}, en fonction de VBS et du rapport R_{cim} / R_{c60}. Cependant les normes n'ont pas précisé le critère de jugement considéré satisfaisant pour le traitement. Selon le GTS (2000), la résistance à l'immersion au jeune âge est jugée satisfaisante si: R_{cim} / R_{c60} > 0.80 (lorsque la VBS du sol est < 0.5) ou R_{cim} / R_{c60} > 0.60 (lorsque la VBS du sol est > 0.5).

Pour quantifier l'effet de l'immersion à l'eau sur les sédiments, un coefficient de résistance λ (%) est défini comme suit :

$$\lambda = \frac{R_{c28} - R_{cim}}{R_{c28}} \times 100 \quad (3.3.3)$$

où:

R_{cim}: moyenne des résistances en compression simple de trois éprouvettes ayant subi l'immersion à l'eau en 32 jours en MPa,

R_{c28}: moyenne des résistances en compression simple des trois éprouvettes témoins en MPa.

3.3.3.2 Résultats

Le rapport entre R_{cim} et R_{c60} est évalué en calculant le rapport de la résistance en compression d'éprouvettes conservées 28 jours en condition de cure normale puis 32 jours immergées dans de l'eau (R_{cim}) à celle obtenue sur des éprouvettes conservées 60 jours en condition de cure normale (R_{c60}). Si on compare les valeurs du rapport R_{cim} / R_{c60} entre les 6 formulations élaborées, on trouve que les rapports R_{cim} / R_{c60} pour les 5 formulations sont inférieures à 0.6, sauf que le rapport de formulation SD3L est légèrement supérieur à 0.6. Les résultats des essais sont présentés dans le Tableau 3.3.3.

Matériels	R_{c28} (MPa)	R_{c60} (MPa)	R_{cim} (MPa)	R_{cim}/R_{c60} (%)	λ (%)
SD	0.52	0.57	/	/	/
SD3L	0.72	0.73	0.46	63.6	35.5
SD6L	0.55	0.70	0.42	59.9	24.6
SD9L	0.62	0.66	0.37	55.7	40.7
SD3C	0.94	0.90	0.44	48.7	53.6
SD6C	1.62	1.95	0.96	49.3	40.6
SD9C	2.24	2.53	1.16	45.9	48.3

Tableau 3.3.3: Effet de l'immersion à l'eau sur la résistance des formulations élaborées

Pour les échantillons immergés à l'eau pendant 32 jours, l'eau pénètre dans les pores entre les particules et ramollit les liens agglomérant les particules. C'est pourquoi les résistances des formulations baissent considérablement. On trouve que l'évolution de λ est irrégulière en fonction de la quantité du liant. Mais en comparant les formulations à la même teneur en liant, on observe que le coefficient λ de la formulation avec la chaux est inférieur à celui de la formulation avec le ciment.

3.4 Propriétés pouzzolaniques

3.4.1 ATD/ATG

L'analyse thermogravimétrique (ATG) consiste à suivre la perte en masse d'un composé en fonction de la température de chauffe. L'analyse thermique différentielle (ATD) est basée sur les réactions thermiques qui se produisent lorsqu'un composé est chauffé. Les courbes obtenues mettent en évidence les pertes d'eau, les recristallisations, les recombinaisons et les phénomènes d'oxydation de matière organique.

Les essais thermogravimétriques ont été réalisés sur environ 1g des échantillons à 90 jours sous un balayage de gaz inerte (argon) durant la montée de température. L'appareil NETZSCH avec un analyseur thermique STA 409 C est utilisé avec une vitesse de montée en température de 3°C/min entre 40 et 1100°C/min.

Pour les sédiments traités à la chaux sur les Figures 3.4.1 (a) et (b), les courbes ATG et ATD correspondant à la transformation des phases sont reportées. Les 5 pics majeurs de l'échantillon au cours de l'essai sont:

- A: Évaporation de l'eau absorbée,
- B: déshydratation de CSH et/ou d'étringite,
- C: déhydroxylation de portlandite,
- D: décomposition de calcite,
- E: formation de certains nouveaux produits.

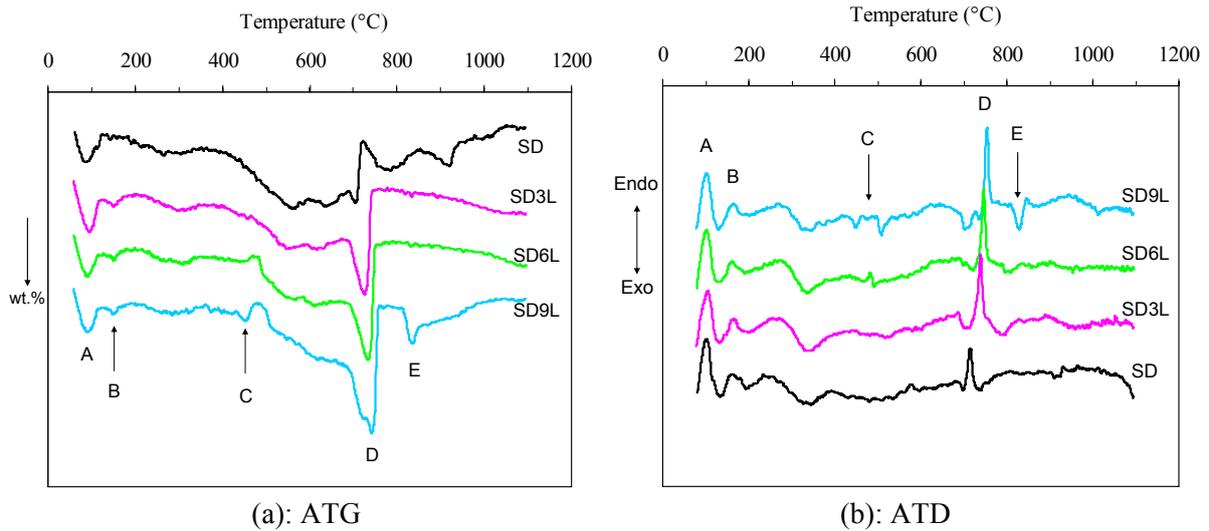


Figure 3.4.1: Analyses thermiques des sédiments traités à la chaux

Pour les sédiments traités au ciment sur la Figure 3.4.2 (a) et (b), les courbes ATG et ATD correspondant à la transformation des phases sont reportées. On distingue 5 pics majeurs au cours de l'essai:

- A: Évaporation de l'eau absorbée,
- B: déshydratation de CSH et d'ettringite,
- C: Évaporation de l'eau liée,
- D: décomposition de $\text{Ca}(\text{OH})_2$,
- E: décomposition de carbonates.

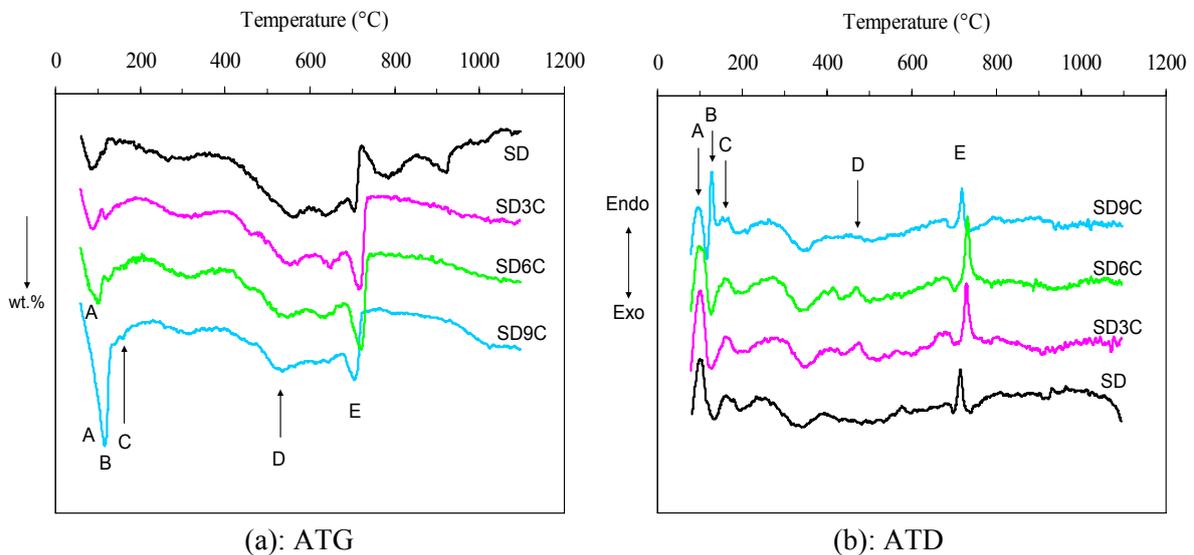


Figure 3.4.2: Analyses thermiques des sédiments traités au ciment

En comparaison avec les résultats des sédiments traités à la chaux, on observe qu'un pic marqué B dans la Figure 3.4.2 indiquant la perte de l'eau liée et la réaction endothermique est beaucoup plus grand que celui dans la Figure 3.4.1. Cela veut dire que beaucoup plus de CSH se forme avec l'ajout du ciment par rapport au traitement à la chaux. Cela peut bien expliquer le

phénomène lié à la résistance des sédiments traités au ciment qui est meilleure que celle des sédiments traités à la chaux.

3.4.2 DRX

Les essais de DRX sont réalisés à l'aide d'un diffractomètre marqué D8 Bruker horizontal, avec une X-rayon source opérée à 35 kV et 40 mA utilisant la radiation Co ($K\alpha=1.78\text{\AA}$), et un détecteur marqué Lynxeye Super Speed. Les modèles DRX ont été recueillis dans la gamme de 10-100° (2θ) avec un incrément de 0.04° et un pas de temps de 7s. Les diagrammes de rayons X des sédiments traités à 90 jours sont présentés sur les Figures 3.4.3 et 3.4.4.

Les diffractogrammes de l'échantillon brut et des mélanges avec la chaux sont présentés à la Figure 3.4.3. Les diffractogrammes montrent que l'ajout de la chaux induit la formation de la portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), de la calcite (CaCO_3) et de la tobermorite (CSH).

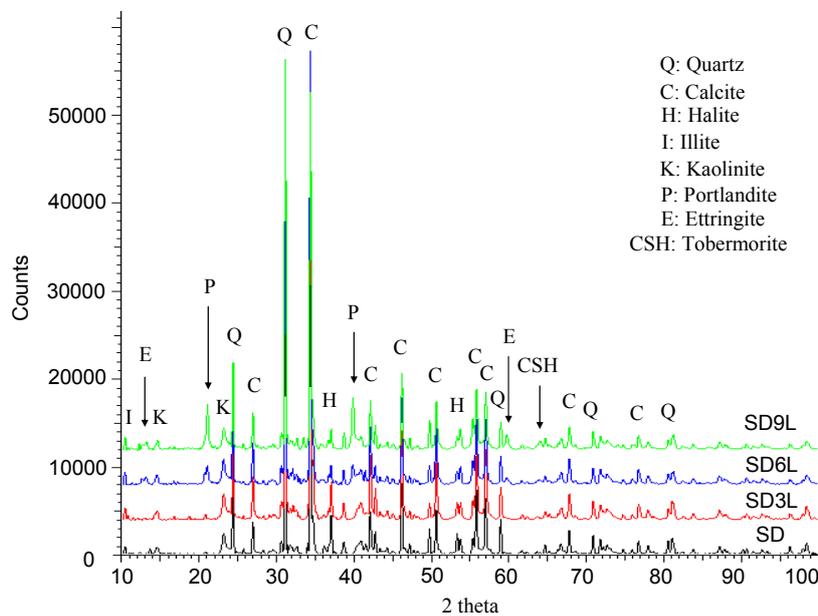


Figure 3.4.3: DRX des sédiments traités à la chaux

Pour les sédiments bruts et les sédiments traités au ciment, les résultats de DRX sont reportés sur la Figure 3.4.4. On observe que l'ajout de ciment engendre de la formation de la portlandite, de la calcite et de la tobermorite. Le pic CSH sur la Figure 3.4.4 est évidemment plus marqué que celui sur la Figure 3.4.3, parce que le ciment réagit avec l'eau dans les sédiments en formant le CSH. Plus de CSH cause l'augmentation importante de la résistance des sédiments mélangés avec le ciment.

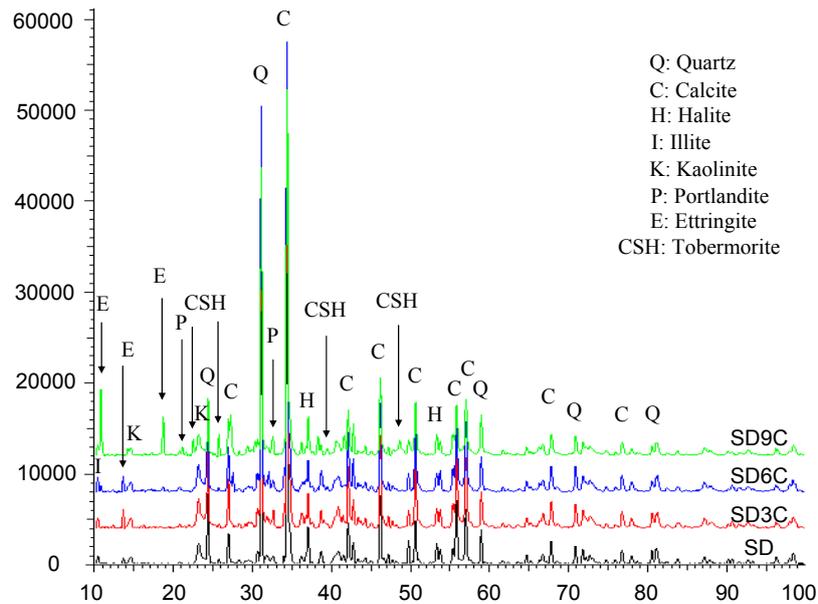


Figure 3.4.4: DRX des sédiments traités au ciment

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, d'une part, on a étudié le potentiel des sédiments bruts et des sédiments traités à la chaux ou au ciment pour une utilisation en couche de fondation et en couche de base d'une chaussée. D'autre part, on a exploré le changement minéral à cause de l'ajout de la chaux ou du ciment afin d'expliquer la performance mécanique des sédiments stabilisés.

Après la détermination de la quantité de chaux et de ciment pour stabiliser les sédiments, les caractéristiques de compaction et d'IPI ont été étudiés à l'aide de la méthode Proctor Modifié. Ensuite, l'évolution des trois paramètres, comme la teneur en eau optimale, la masse volumique sèche maximale et l'IPI, ont été déterminés. Les performances mécaniques peuvent être évaluées à travers la résistance en compression, la résistance en traction et le module d'élasticité. Pour les formulations avec le ciment, leurs résistances augmentent avec l'accroissement de la quantité du ciment. Pour les formulations avec la chaux, la quantité de chaux et le temps de cure donne un faible effet sur leurs résistances et modules d'élasticité. D'après la résistance en traction et le module d'élasticité, on a évalué le potentiel des formulations élaborées comme matériaux routiers en utilisant le diagramme de classification. Les résultats montrent que sauf les formulations SD9C, toutes les autres formulations ne peuvent pas être utilisées en couche de forme et en couche de fondation d'une chaussée.

La durabilité des matériaux élaborés a été étudiée à l'aide de l'essai de gel-dégel, de l'essai du gonflement et de l'essai d'immersion à l'eau en 32 jours. L'ajout du ciment ou de la chaux cause la diminution du gonflement et les gonflements de toutes les formulations sont inférieurs à 5%. Le traitement au ciment ou à la chaux est considéré comme adapté et acceptable d'après la norme NF P94-100 (1999). Les résistances des échantillons ayant subi 28 jours de cure normale diminuent considérablement due à l'immersion à l'eau et au cycle de gel-dégel. Les échantillons des sédiments bruts sont détruits par l'immersion dans l'eau en 24 heures.

L'ajout du ciment et de la chaux aux sédiments marins induit la formation de la tobermorite (CSH), de la portlandite et de la calcite. Ces nouvelles phases minérales formées sont responsables de l'amélioration des propriétés mécaniques. Ces impacts positifs sont essentiellement dus aux développements de cette tobermorite qui dérive essentiellement de la réaction d'hydratation du ciment et de la réaction pouzzolanique de la chaux avec de l'eau.

Chapitre 4 Traitement des sédiments marins avec chaux+cendres volantes et ciment+cendres volantes

La cendre volante est un résidu provenant des centrales au charbon et est couramment utilisée dans l'industrie des ciments et bétons. Dans le domaine de route, l'utilisation de cendres volantes préserve les ressources naturelles et économise l'énergie et contribue aussi à protéger durablement l'environnement. Etudier la faisabilité de l'utilisation des cendres volantes en assise de chaussée apporte une réponse à l'élimination de ce sous produit industriel.

Ce chapitre présente la méthodologie d'élaboration d'un matériau de couche d'assise de chaussée constituée de sédiments marins et de cendres volantes. Elle est basée sur l'analyse:

- des caractéristiques de compactage et de l'indice portant immédiat des formulations élaborées,
- des performances mécaniques des mélanges formulés, comme la résistance en compression, la résistance en traction et le module d'élasticité,
- de la durabilité à l'aide de l'essai du gonflement, de l'essai du cycle au gel-dégel et de l'essai de l'immersion à l'eau,
- et de l'exploration du changement et de la formation des phases minérales à l'aide des techniques de DRX et ATD/ATG.

4.1 Activation alcaline

Comme nous l'avons vérifié, les sédiments fins de dragage des ports présentent des caractéristiques qui, de par leur plasticité, leur finesse, leur forte teneur en matière organique et leur économie, peuvent être utilisés en traitement de sol moyennant un important dosage en chaux et en ciment. Quant aux cendres volantes, leur nature minéralogique et chimique leur confère en présence de chaux et d'eau un pouvoir pouzzolanique, qui provoque la formation de composés ayant des propriétés liantes comparables à celles d'un liant hydraulique. Cela s'explique par l'activation alcaline des cendres volantes.

L'activation alcaline est un processus chimique qui permet de transformer les structures vitreuses (partiellement ou totalement amorphe et/ou métastable) en de composites très compacts et bien cimentés (Palomo et al, 1999). Afin de créer un milieu basique favorisant la réaction d'hydratation en présence d'eau, il faut normalement ajouter de la chaux ou de ciment servant d'activateur dans les matériaux pozzolaniques, qui fournissent les silices et les alumines pour la réaction pouzzolanique. Le mécanisme de la réaction entre ciment/chaux (liants) et cendres volantes/laitiers (matériaux pouzzolaniques) est présenté sur la Figure 4.1.1.

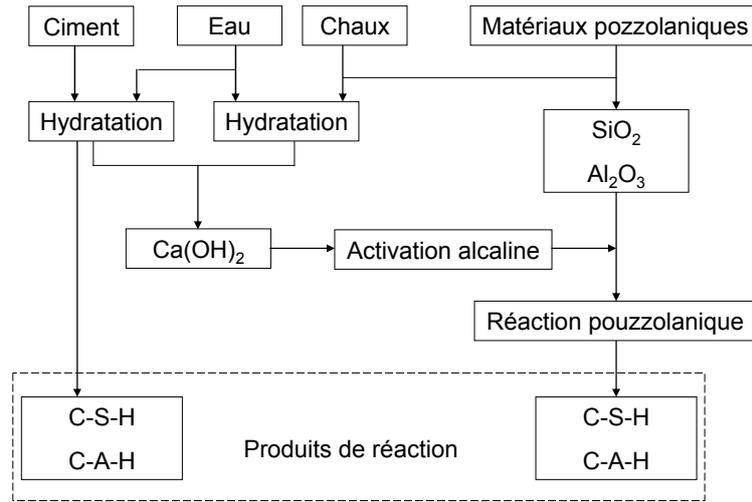


Figure 4.1.1: Mécanisme de réaction entre liants et matériaux pozzolaniques

4.2 Propriétés de compactage

4.2.1 Formulation

Selon l'étude de sensibilité au pH, le pH des mélanges cendres volantes – sédiments – eau ne varie quasiment pas en fonction de la teneur en cendres volantes. Donc pour des cendres volantes alumino-siliceuses, on ne peut pas préciser le meilleur pourcentage des cendres volantes uniquement par l'évolution de pH. Mais le pH des mélanges sédiment-cendres volantes varie dans un petit interval allant de 8.6 à 9.0 à cause de la faible teneur en CaO.

Pour comparer l'effet des cendres volantes sur les propriétés mécaniques des sédiments avec les formulations de sédiment-chaux et sédiment-ciment, on fixe le pourcentage des cendres volantes ajoutées dans le sédiment à 3% et 6% en masse sèche. En même temps, le pourcentage du ciment ou de la chaux est aussi fixé à 3% et 6% de la masse totale sèche afin de mener des études comparatives aux mêmes dosages. Les formulations élaborées sont reportées dans le Tableau 4.2.1.

Formulations	Sédiment sec (%)	Ciment (%)	Chaux (%)	Cendres volantes (%)
F0	100	0	0	0
F1	94	3	0	3
F2	91	3	0	6
F3	91	6	3	3
F4	94	0	3	3
F5	91	0	3	6
F6	91	0	6	3

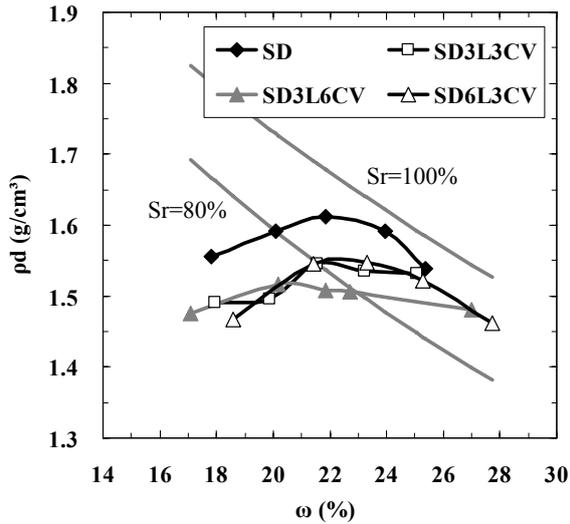
Tableau 4.2.1: Les formulations relatives aux cendres volantes

4.2.2 Compactage - IPI

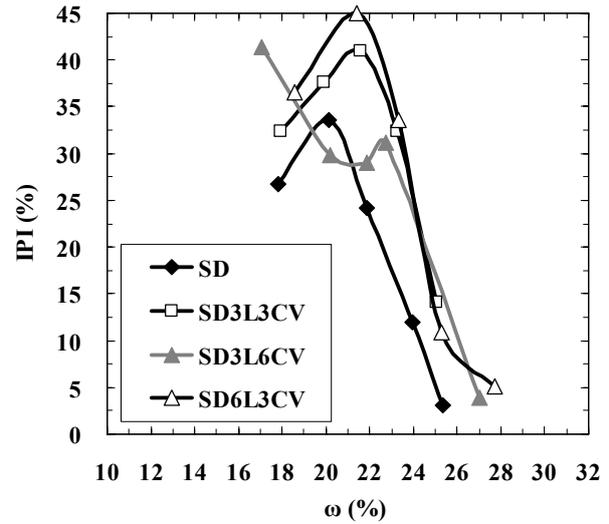
Pour les formulations proposées, les essais de compactage-IPI définis par la norme NF P94-078 (1997) et NF P94-093 (1999) ont été réalisés afin de déterminer les paramètres de compactage

pour confectionner des éprouvettes à l'état le plus compact et d'évaluer le potentiel d'utilisation des matériaux en couche d'assise de chaussée. Dans un souci d'économie des matériaux, seul un essai de compactage Proctor Modifié – IPI de cinq ou six points a été réalisé pour chaque formulation.

Les figures 4.2.1 (a) (b) et 4.2.2 (a) (b) fournissent les courbes compactage - IPI en fonction de la teneur en eau mesurée. Les courbes de saturation à 80% et 100% y sont également représentées. On peut donc en déduire les teneurs en eau optimales, les masses volumiques sèches maximales et l'IPI. On observe que la courbe de compactage des sédiments bruts se situe au-dessus des autres courbes de compactage. La valeur maximale d'IPI des sédiments bruts est inférieure à celle des autres formulations.

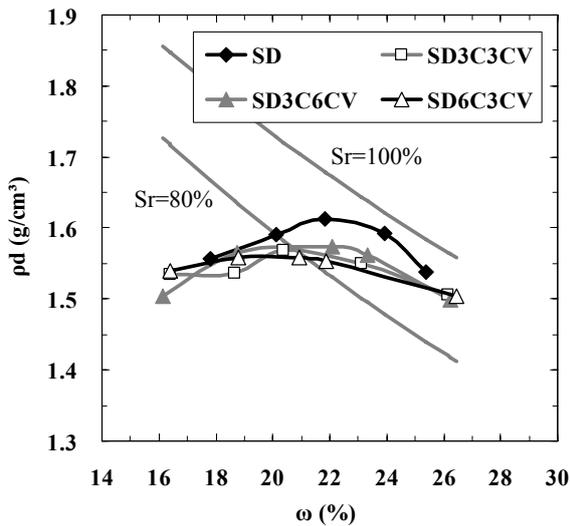


(a): Courbes de compactage

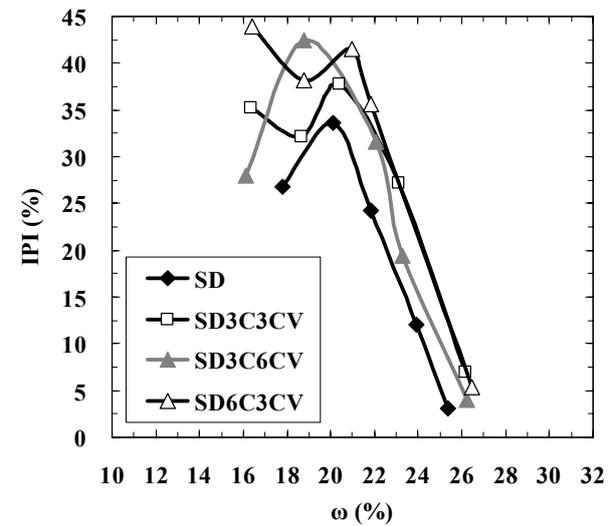


(b): Courbes de l'IPI

Figure 4.2.1: Courbes de compactage - IPI des sédiments mélangés avec chaux-cendres volantes



(a): Courbes de compactage



(b): Courbes de l'IPI

Figure 4.2.2: Courbes de compactage - IPI des sédiments mélangés avec ciment-cendres volantes

Par rapport aux sédiments bruts, la valeur d'IPI de toutes les formulations est augmentée, alors que la masse volumique sèche maximale ρ_{opt} diminue. Mais il semble que la variation de la teneur en eau optimale soit irrégulière par rapport aux sédiments bruts, comme montré dans le Tableau 4.2.2.

Pour les formulations contenant 3% de cendres volantes, l'ajout de la chaux peut augmenter légèrement la valeur de l'IPI et la teneur en eau optimale, lorsque ρ_{opt} est constante. Néanmoins, l'ajout du ciment conduit à l'augmentation de ρ_{opt} et IPI et à la diminution de ω_{opt} . L'ajout de chaux de 3% à 6% en masse sèche ne change quasiment pas ρ_{opt} , mais l'ajout de ciment de 3% à 6% le fait diminuer de 1.570 g/cm³ à 1.561 g/cm³. En ce qui concerne la teneur en eau optimale, ω_{opt} passe de 21.9% à 22.3% lors de l'ajout de chaux, par contre, ω_{opt} diminue pour les matériaux traités au ciment de 20.7% à 20.3%. L'augmentation de la teneur en ciment ou chaux de 3% à 6% augmente l'IPI de 40.7% à 42.3% pour SD3L3CV et de 37.2% à 40.4% pour SD3C3CV.

Formulations	ρ_{opt} (g/cm ³)	ω_{opt} (%)	IPI (%)
SD	1.612	21.6	24.9
SD3L3CV	1.548	21.9	40.7
SD3L6CV	1.519	20.8	28.9
SD6L3CV	1.552	22.3	42.3
SD3C3CV	1.570	20.7	37.2
SD3C6CV	1.573	20.8	37.5
SD6C3CV	1.561	20.4	40.4

Tableau 4.2.2: Paramètres de compactage des formulations étudiées

Pour la formulation SD3L3CV contenant 3% de chaux, l'augmentation de la quantité des cendres volantes de 3% à 6% engendre la diminution de ω_{opt} , de ρ_{opt} et de l'IPI. Pour la formulation SD3C3CV contenant 3% de ciment, on observe que les paramètres (ρ_{opt} , ω_{opt} et IPI) ne change quasiment pas lorsque la teneur en cendres volantes augmente de 3% à 6%. Les cendres volantes influencent les paramètres de compactage et l'IPI de la façon suivante: (a) la masse volumique des cendres volantes est moins élevée que celle des sédiments; (b) la plupart (environ 86.6%) des particules dans les cendres volantes sont des fines et inférieures à 63 μ m; (c) la forme de la plupart des particules dans les cendres volantes est sphérique, et cela peut dans une mesure diminuer la quantité de l'eau.

4.3 Propriétés mécaniques à court et à long terme

Pour les matériaux formulés à base de sédiments de dragage, la performance mécanique à long et à court terme est évaluée à l'aide du module d'élasticité (E_t), de la résistance en traction (R_t) et en compression (R_c) en fonction de la période de cure. La classification des matériaux étudiés est réalisée grâce à un abaque décrit dans la norme NF P98-113 (1994) afin d'évaluer le potentiel des sédiments pour une utilisation en assise de chaussée.

4.3.1 Performance mécanique

Les propriétés mécaniques permettent de vérifier la possibilité d'utiliser les matériaux étudiés dans le domaine routier. Les paramètres (R_t , E_t , R_c) sont pour l'instant, les paramètres les plus couramment utilisés dans ce domaine. Les résistances et les modules d'élasticité à 14, 28, 60 et 90

jours sont présentés sur les Figures 4.3.1 à 4.3.3. Ils sont mesurés sur des échantillons cylindriques en permettant de caractériser le développement des performances mécaniques en fonction du temps.

Les Figures 4.3.1 et 4.3.2 illustrent, à une période inférieure à 90 jours, l'évolution de résistance en compression et en traction pour tous les matériaux formulés. Par rapport aux sédiments bruts, on observe une amélioration évidente de la résistance en compression et en traction après un traitement avec de la chaux et des cendre volante ou du ciment et des cendre volante. Même si les résistances en compression de toutes les formulations sauf SD6C3CV sont inférieures à 1.0 MPa, c'est intéressant de observer un phénomène: sauf SD6C3CV, les résistances en compression et en traction des sédiments traités aux mélanges chaux-cendres volantes sont supérieurs à celles des sédiments traités aux mélanges ciment-cendres volantes. Le traitement avec le mélange chaux-cendres volantes est meilleur que celui des mélanges ciment-cendres volantes du point de vue économique et mécanique, lorsque la quantité du ciment est relativement faible.

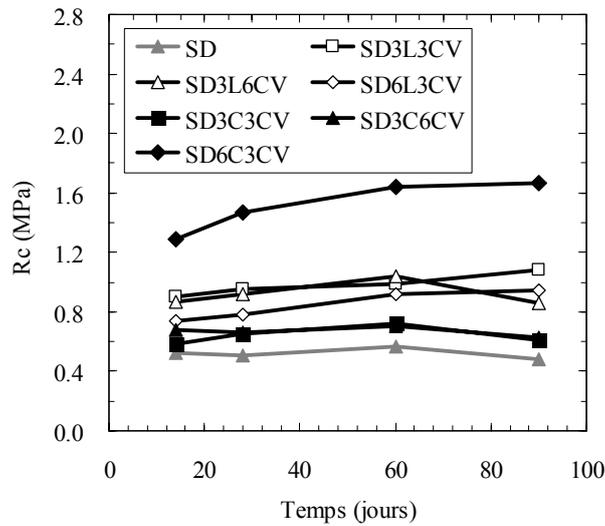


Figure 4.3.1: Résistance en compression des matériaux formulés

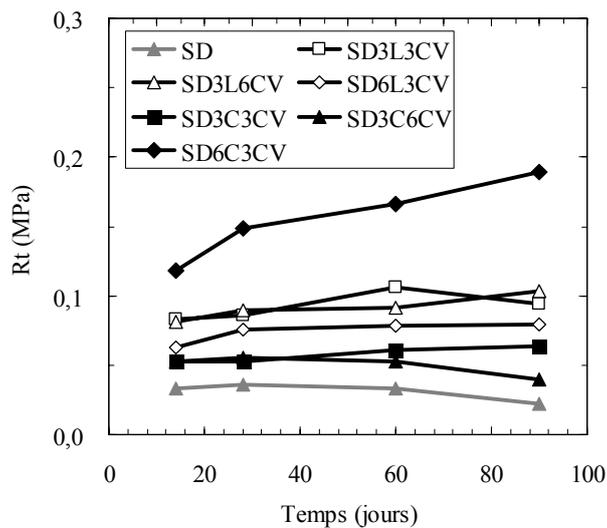


Figure 4.3.2: Résistance en traction des matériaux formulés

Pour la formulation SD6C3CV, sa résistance en compression et en traction sur les Figures 4.3.1 et 4.3.2 est remarquablement plus élevée que celle des autres formulations. Mais pour les deux autres formulations avec du ciment, leurs résistances sont comparables les unes aux autres. L'augmentation de la quantité des cendres volantes de 3% à 6% n'influence pas considérablement les résistances en compression et en traction des formulations à un âge inférieur à 90 jours. Pour les formulations concernant la chaux, on peut dire que la performance mécanique de la formulation SD3L3CV est meilleure que celle des formulations SD3L6CV et SD6L3CV d'un point de vue de la résistance en compression et en traction.

Les modules d'élasticité des matériaux formulés sont présentés sur la Figure 4.3.3. Par rapport aux sédiments bruts, les modules d'élasticité de toutes les formulations sont supérieurs à ceux des sédiments bruts. Pour deux autres formulations SD3C3CV et SD3C6CV, leurs modules d'élasticité sont évidemment moins élevés que celles des autres formulations. Le module d'élasticité de la formulation SD6C3CV est le plus élevé parmi toutes les formulations élaborées. On doit noter que la diminution des modules d'élasticité à 90 jours résulte principalement du problème d'étanchéité.

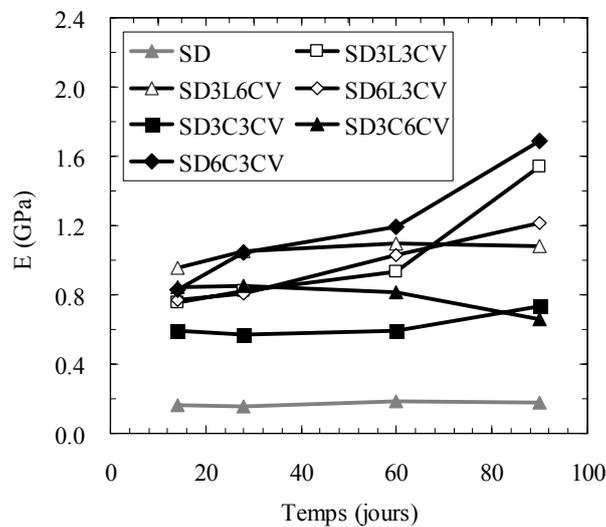


Figure 4.3.3: Modules d'élasticité des matériaux formulés

4.3.2 Evaluation du potentiel en assise de chaussée

A partir des données présentées sur les Figures 4.3.2 et 4.3.3, nous pouvons déterminer la classe mécanique de chaque formulation en les positionnant dans l'abaque des performances mécaniques des normes NF P98-113 (1994) et NF P98-114-2 (1999). Le résultat est présenté sur la Figure 4.3.4. La valorisation des sédiments traités représente un réel intérêt technico-économique si les traitements envisagés se situaient au minimum moins en S2. Toutefois, rappelons qu'il est possible d'utiliser un traitement se positionnant en S1 mais l'épaisseur de la couche et donc le coût de sa mise en œuvre est alors plus élevé.

On peut observer qu'à 360 jours, pour les sédiments bruts et les formulations à base de chaux, de ciment et de cendres volantes, aucune des formulations ne permet d'atteindre ce niveau de performance. La formulation SD6C3FA se situe à la classe S1, lorsque toutes les autres formulations se situent en zone inférieure à S0. D'un point de vue mécanique, toutes les formulations élaborées ne peuvent pas être utilisées comme les matériaux d'assise de chaussée selon NF P98-113 (1994) et NF P98-114-2 (1999).

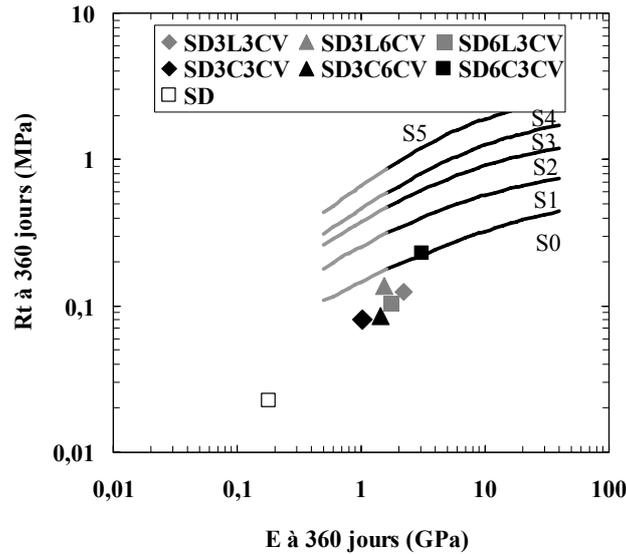


Figure 4.3.4: Classification des sédiments traités à la chaux et au ciment avec des cendres volantes

On doit comparer les formulations étudiées par Tran (2009) et Miraoui (2010) avec les formulations élaborées dans l'étude présente.

Tran (2009) a utilisé une grande quantité de sables d'un pourcentage de 60% de la masse totale pour élaborer les formulations sur les sédiments marins de Dunkerque, du ciment, de la chaux et des sables. Le pourcentage des sédiments introduits est seulement d'environ 32%, lorsque la quantité du ciment est de 5.7%. Les formulations élaborées ont été classées dans les zones S2 ou S3 pour l'utilisation des matériaux en couche d'assise de chaussée.

Miraoui (2010) a élaboré deux formulations composées de 50% de sédiments marins et de 50% de laitiers d'aciérie. Pour les laitiers utilisés, presque toutes les particules sont supérieures à 63 μ m. Cela conduit à classer les matériaux formulés dans la classe S2, permettant d'utiliser les matériaux en couche d'assise de chaussée.

Par conséquent, afin d'améliorer les propriétés mécaniques des formulations dans cette partie pour les classer dans la zone \geq S2, il faut introduire des granulats dont les tailles sont supérieures à 63 μ m, comme des sables, des laitiers d'aciérie et des bétons concassés d'un point de vue économique. Mais la recherche de cette partie est quand même intéressante comme une tentative d'utiliser les cendres volantes silico-alumineuses dans le domaine de solidification/stabilisation des sédiments marins.

4.4 Etude environnementale sur les matériaux formulés

L'analyse environnementale sur les sédiments bruts indique qu'une teneur modérée en chlorures et en hydrocarbures. Afin d'observer les variations des concentrations d'éléments comme les métaux, les chlorures, les sulfates, les nitrates et les matières organiques, des essais de lixiviation sont effectués sur les échantillons broyés d'après XP ISO/TS 21268-2 (2007) pour les sédiments avec des cendres volantes. Les résultats sont reportés dans les Tableaux 4.4.1 et 4.4.2.

Pour les formulations à base de sédiments marins, de cendres volantes, de ciment et de chaux, les valeurs des concentrations d'éléments sur les échantillons broyés et sur solides sont analysées. D'après l'Arrêté français du 14 Juin 2000, les concentrations de tous les éléments de toutes les formulations sont au-dessous de niveau 1.

Pour les formulations élaborées sur les sédiments marins et les cendres volantes, selon les seuils relatifs à la mise en décharge des déchets inertes (JOCE, 2003), on peut constater que les

concentrations des échantillons sur éluat sont inférieures aux seuils établis pour les déchets inertes, à l'exception de la concentration des chlorures, de cuivre et de COT. Les concentrations de COT dans les matériaux formulés sont anormales selon les résultats de lixiviation de sédiments bruts et de cendres volantes. Sauf les formulations SD3C3CV et SD3C6CV, les concentrations de COT permettent de classer les autres formulations dans la zone "Traitement nécessaire". Par rapport aux sédiments bruts, la concentration des chlorures des formulations diminue considérablement et se situe au dessous du seuil établi pour les déchets dangereux, lorsque la concentration de cuivre augmente. En terme de la concentration de sulfates, la valeur mesurée sur la formulation SD3L3CV est de 1150 mg/kg qui dépasse la valeur définie pour classe III: stockage de déchets inertes. L'indice de phénol des formulations SD3L6CV et SD6L3CV est proche de seuil établi pour les déchets non dangereux.

Paramètre	Unité	SD3L3CV	SD3L6CV	SD6L3CV	SD3C3CV	SD3C6CV	SD6C3CV
As	mg/kg	0.016	< 0.01	< 0.01	0.016	0.03	0.013
Ba	mg/kg	0.06	0.102	0.126	0.087	0.102	0.148
Cd	mg/kg	< 0.004	< 0.004	< 0.004	< 0.004	< 0.004	< 0.004
Cr	mg/kg	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.01	0.015	0.011
Cu	mg/kg	2.919	2.357	3.564	2.269	1.826	2.443
Hg	mg/kg	0.0014	< 0.0005	< 0.0005	0.0034	0.001	0.001
Mo	mg/kg	0.089	0.076	0.116	0.073	0.088	0.111
Ni	mg/kg	0.027	0.036	0.042	0.018	0.023	0.034
Pb	mg/kg	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Sb	mg/kg	< 0.006	< 0.006	< 0.006	< 0.006	< 0.006	< 0.006
Se	mg/kg	0.019	0.013	< 0.01	0.012	0.012	0.013
Zn	mg/kg	0.064	< 0.01	0.012	< 0.01	< 0.01	0.01
Fluorures	mg/kg	2.1	2.05	1.7	9.2	10.4	8.25
Chlorures	mg/kg	1550	1642	1278	1203	1378	1156
Sulfates	mg/kg	1152	763	611	703	605	730
Indice de Phénol	mg/kg	0.445	1.045	1.0	0.6	0.65	0.735
COT	mg/kg	1411	1237	1309	843	796	1050

Décision européenne (JOCE, 2003)

Classe III 

Classe II 

Classe I 

Traitement nécessaire 

Tableau 4.4.1: Résultats des études sur l'impact environnemental (sur éluat L/S=10, valeur en mg/kg)

Pour les analyses sur solide, on peut constater que la concentration de tous les éléments analysés est inférieure au seuil établi pour les déchets inertes définis par la décision de la commission européenne JOCE 16 01 2003, hors le niveau des COT et des hydrocarbures. Les niveaux des COT et des hydrocarbures sont supérieurs au seuil établi pour définir les déchets inertes.

Paramètre	Unité	SD3L3CV	SD3L6CV	SD6L3CV	SD3C3CV	SD3C6CV	SD6C3CV
BTEX	mg/kg	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
COT	mg/kg	25000	29000	23000	26000	28000	26000
HAP	mg/kg	10.9	10.7	9.6	11.4	9.3	11.3
Hydrocarbures	mg/kg	1600	1200	830	1100	1200	1200
PCB	mg/kg	0.16	0.28	< 0.05	0.19	0.19	0.20

Décision européenne (JOCE, 2003)

Classe III		Classe II	
Classe I		Traitement nécessaire	

Tableau 4.4.2: Résultats des dosages en polluants sur solides

4.5 Evaluation de la durabilité

La durabilité des matériaux est une propriété très importante, notamment si on envisage d'utiliser les sédiments traités dans le secteur du génie civil. Pour évaluer la sensibilité à l'eau et la durabilité des matériaux formulés, plusieurs essais doivent être effectués: essai de gonflement, essai de gel-dégel et essai d'immersion à l'eau pendant 32 jours.

4.5.1 Propriété de gonflement

Les valeurs de ces paramètres, comme la teneur en eau initiale, la masse volumique initiale, l'IPI avant immersion, l'IPI après immersion à l'eau et la valeur du gonflement, sont reportées dans le Tableau 4.5.1. La Figure 4.5.1 présente le développement du gonflement en fonction du temps pour les matériaux traités et non traités.

Pour les sédiments non-traités, la valeur du gonflement est plus grande que celle des autres formulations élaborées. La valeur du gonflement des sédiments non-traités est de 1.54% après immersion à l'eau pendant 4 jours.

L'ajout du mélange chaux-cendres volantes et du mélange ciment-cendres volantes conduit à la diminution du gonflement par rapport au sédiment brut. Le pourcentage du gonflement de la formation SD3L6CV est plus petit que celui de la formation SD3L3CV. L'augmentation de la teneur en cendres volantes permet de limiter le potentiel du gonflement des sédiments traités à la chaux. L'augmentation de la teneur en cendres volantes peut aussi diminuer le gonflement pour les matériaux formulés avec du ciment.

Il est à noter que, pour les sédiments contenant la même quantité de cendres volantes, plus on ajoute de la chaux dans les sédiments, plus grande est la valeur du gonflement. Ceci s'explique par la formation d'étringite. Pour les sédiments traités à la même teneur en ciment, plus il y a de ciment contenu dans les sédiments, plus petite est la valeur du gonflement dû à la propriété du ciment. Pour les sédiments traités aux mélanges ciment-cendres volantes, les valeurs du gonflement sont proches les unes des autres.

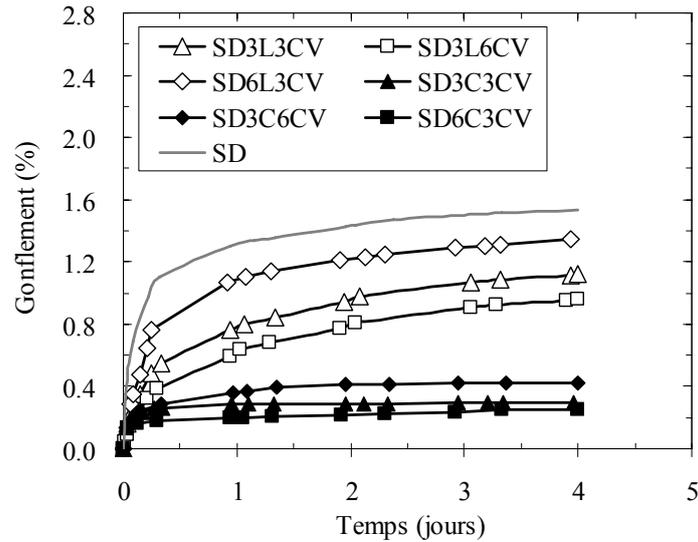


Figure 4.5.1: Développement du gonflement des matériaux traités

En ce qui concerne le changement d'IPI présenté dans le Tableau 4.5.1, l'IPI après immersion à l'eau pendant 4 jours des sédiments non-traités diminue par rapport à l'IPI avant immersion. Pour les matériaux formulés, l'immersion à l'eau pendant 4 jours cause une augmentation évidente de l'IPI, et les rapports de l'IPI varient entre 1.16 et 2.84 sont supérieurs à 1.0. Plus la quantité du ciment dans les formulations, plus l'IPI après immersion. Ceci résulte de la réaction d'hydratation du ciment avec l'eau. Pour les formulations liées à la chaux, l'agglomération des particules fines contribue à l'augmentation de l'IPI. On peut dire que l'indice portant immédiat (IPI) est amélioré après immersion à l'eau pendant 4 jours.

On observe que les valeurs du gonflement de toutes les formulations sont inférieures à 5%. Les traitements avec mélange ciment-cendres volantes et chaux-cendres volantes peuvent être considérés comme adaptés et acceptables selon la critère définie par NF P94-100 (1999).

Matériaux	Teneur en eau (%)	Masse volumique sèche (g/cm ³)	IPI avant immersion (%)	IPI après immersion (%)	Rapport d'IPI	Gonflement (%)
SD	22.4	1.395	26.7	10.7	0.40	1.54
SD3L3CV	21.0	1.332	29.0	41.3	1.42	1.12
SD3L6CV	20.5	1.400	35.5	48.3	1.36	0.96
SD6L3CV	22.1	1.336	30.6	35.4	1.16	1.34
SD3C3CV	20.8	1.398	29.1	44.9	1.54	0.30
SD3C6CV	20.7	1.414	31.5	50.6	1.61	0.42
SD6C3CV	20.0	1.422	25.8	73.3	2.84	0.25

Tableau 4.5.1: Valeurs d'IPI et de gonflement à l'immersion à l'eau pendant 4 jours des mélanges

4.5.2 Essai de résistance au gel - dégel

Il a été précisé que pour des raisons pratiques, les valeurs moyennes des mesures de R_{tb} calculées à partir de résistances en compression, pour les sédiments traités aux liants, sont rassemblées dans le Tableau 4.5.2. L'objectif est de comparer les résistances en compression diamétrale avec la valeur de 0.25MPa prescrite par les normes NF P94-102-1 (2001) et NF P94-102-2 (2001). On trouve que toutes les résistances en traction des matériaux formulés reportées dans le Tableau 4.5.2 sont inférieures à 0.25 MPa. On considère que toutes les formulations traitées presque ne peuvent pas résister au gel-dégel.

Les résistances en traction au gel-dégel sont donc insatisfaisantes pour toutes les formulations élaborées. Après avoir subi 20 cycles de gel-dégel, la réduction de la résistance des échantillons est importante, et le coefficient λ (%) = $(R_{c28}-R_{ctf}) / R_{c28}$ de la perte des échantillons de toutes les formulations varie entre 36.2% et 53.5%.

On observe que la variation du coefficient λ est irrégulière. Pour la formulation SD3L3CV, l'augmentation du pourcentage des cendres volantes de 3% à 6% induit une diminution évidente du coefficient λ de 46.5% à 36.2%. Contrairement, pour la formulation SD3C3CV, l'addition des cendres volantes de 3% à 6% induit une petite montée de λ de 43.6% à 48.4%.

Pour la formulation SD3L3CV, l'augmentation de la quantité de la chaux de 3% à 6% élève légèrement λ de 46.5% à 43.9%. Mais pour la formulation SD3C3CV, l'élévation de la quantité du ciment cause une augmentation remarquable de λ de 43.6% à 53.5%.

Formulations	R_{c28} (MPa)	R_{ctf} (MPa)	λ (%)	R_{tb} (MPa)
SD	0.51	/	/	/
SD3L3CV	0.95	0.51	46.5	0.04
SD3L6CV	0.92	0.59	36.2	0.05
SD6L3CV	0.78	0.44	43.9	0.04
SD3C3CV	0.65	0.37	43.6	0.03
SD3C6CV	0.66	0.34	48.4	0.03
SD6C3CV	1.47	0.68	53.5	0.06

Tableau 4.5.2: Aptitude au traitement - Résistance en traction et en compression au gel-dégel

4.5.3 Essai d'immersion à l'eau pendant 32 jours

Comme nous l'avons expliqué, la résistance à l'immersion aux jeunes âges est évaluée en calculant le rapport de la résistance en compression d'éprouvettes conservées 28 jours à l'air libre puis 32 jours immergées dans de l'eau (R_{cim}) à celle obtenue sur des échantillons conservés 60 jours en condition de cure normale (R_{c60}).

Si on compare les valeurs du rapport R_{ci}/R_{c60} pour les six formulations, on peut s'apercevoir qu'elles sont toutes du même ordre de grandeur. Selon la norme NF P94-102-1 (2001), pour les sols naturels dont le VBS est supérieur à 0.5, le rapport R_{cim}/R_{c60} est défini pour réaliser le classement des sols traités aux liants hydrauliques: Classe R_{im1} ($R_{cim}/R_{c60}>0.8$), Classe R_{im2} ($0.8>R_{cim}/R_{c60}>0.6$) et Classe R_{im3} ($0.6>R_{cim}/R_{c60}>0.5$). Le VBS des sédiments étudiés est supérieur à 0.5, les deux formulations SD3C3CV et SD3C6CV peuvent être considérées comme Classe R_{im2} , lorsque les quatre formulations appartiennent à la Classe R_{im3} . Selon les résultats présentés dans le Tableau 4.5.3, on trouve que les résistances de toutes les formulations sauf SD6C3CV sont comparables, et la résistance de SD6C3CV est beaucoup plus grande que celle des autres formulations.

Formulations	R _{c28} (MPa)	R _{c60} (MPa)	R _{cim} (MPa)	R _{cim} / R _{c60} (%)	λ (%)
SD	0.51	0.57	-	-	-
SD3L3CV	0.92	1.04	0.57	55.0	40.0
SD3L6CV	0.78	1.04	0.52	50.1	43.5
SD6L3CV	0.65	0.92	0.51	55.7	34.6
SD3C3CV	0.66	0.73	0.50	68.7	23.6
SD3C6CV	0.95	0.71	0.48	68.0	27.2
SD6C3CV	1.47	1.64	0.94	57.4	35.9

Tableau 4.5.3: Aptitude au traitement - Résistance en compression à l'immersion à l'eau

En terme du coefficient λ , l'évolution de λ est régulière en fonction de la quantité des cendres volantes. Pour SD3L3CV et SD3C3CV, l'augmentation de la teneur en cendres volantes de 3% à 6% cause une légère augmentation de λ . Pour tous les matériaux formulés, le coefficient λ varie entre 23.6% et 43.5%. On trouve que l'aptitude des sédiments traités avec un mélange ciment-cendres volantes est meilleure que celle des sédiments traités à la chaux et aux cendres volantes d'un point de vue de λ . La comparaison entre les formulations à 3% de ciment ou de chaux, on trouve que λ des formulations liées à 3% de chaux est plus petite que celui des formulations liées à 3% de ciment.

4.6 Analyse micro-structurale

4.6.1 ATG/ATG

Pour les sédiments traités aux cendres volantes et à la chaux sur les Figures 4.6.1 (a) et (b), les courbes ATG/ATD correspondent à la transformation des phases. Les 5 pics majeurs de l'échantillon au cours de l'essai sont:

- A: Evaporation de l'eau absorbée
- B: déshydratation de CSH et d'ettringite
- C: Evaporation de l'eau liée
- D: décomposition de portlandite
- E: décomposition de calcite
- F: formation de certain nouveau produit

Le pic endothermique E désigne la quantité de la calcite, qui vient de deux origines: la calcite des sédiments bruts et la calcite formée par l'ajout de la chaux. En terme de CSH, seule une petite quantité d'eau est produite pour les échantillons à une période inférieure à 90 jours.

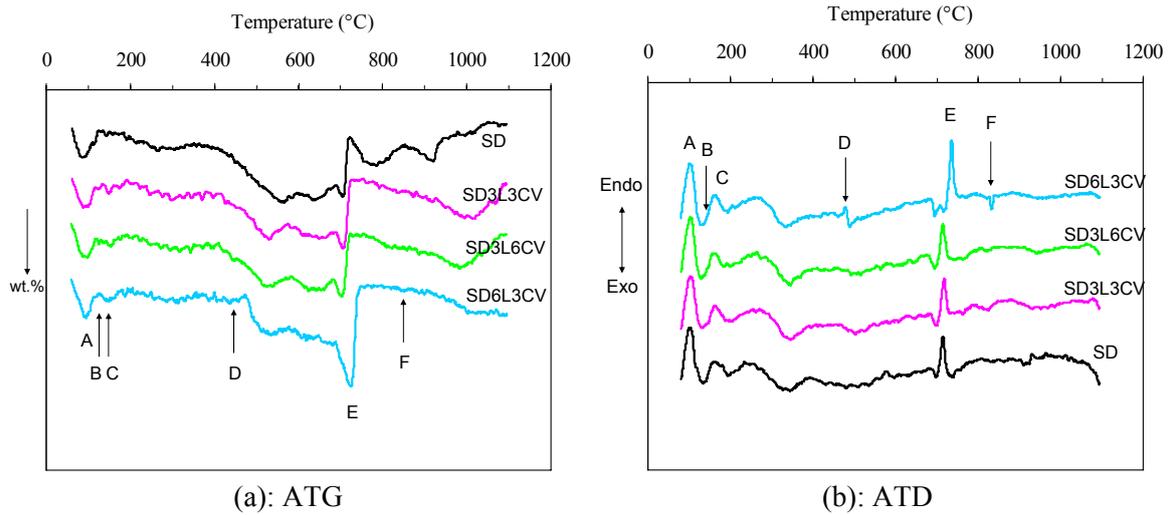


Figure 4.6.1: Analyses thermiques des sédiments traités à la chaux et aux cendres volantes

Pour les sédiments traités aux cendres volantes et au ciment sur les Figures 3.6.2 (a) et (b), les courbes ATG et ATD correspondant à la transformation des phases sont reportées. On distingue 5 pics majeurs au cours de l'essai:

- A: Evaporation de l'eau absorbée
- B: déshydratation de CSH et d'ettringite
- C: Evaporation de l'eau liée
- D: décomposition de $\text{Ca}(\text{OH})_2$
- E: décomposition de carbonates

D'après l'analyse du pic D, l'ajout du ciment n'influence pas sensiblement la quantité de la calcite. Mais il faut noter que l'ajout des cendres volantes induit une diminution de la quantité de CSH produite. Il est possible que le carbone imbrûlé dans les cendres volantes silico-alumineuse empêche la formation de CSH.

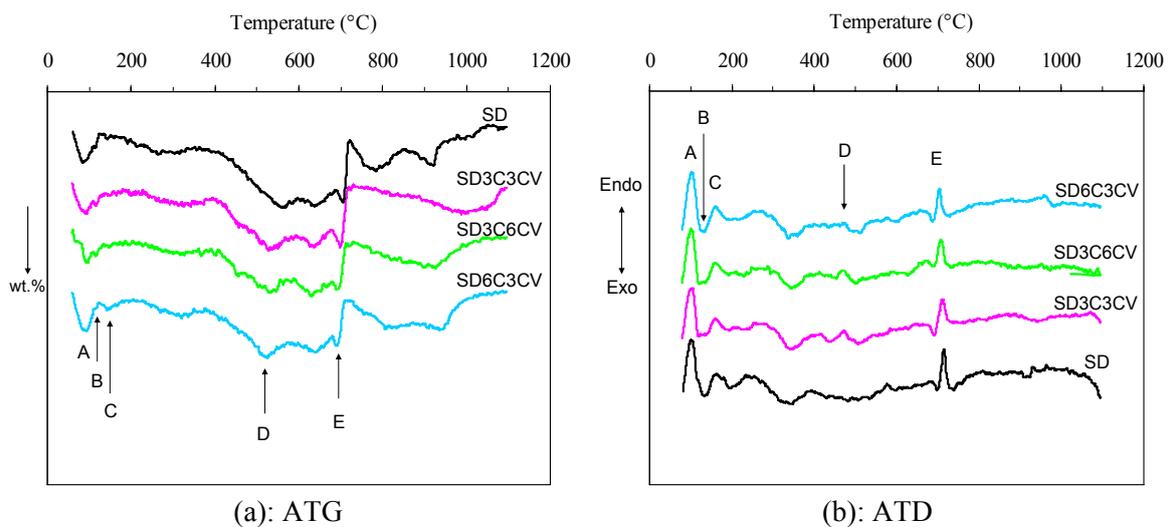


Figure 4.6.2: Analyses thermiques des sédiments traités au ciment et aux cendres volantes

4.6.2 DRX

La Figure 4.6.3 représente les diffractogrammes obtenus sur des échantillons des sédiments traités aux cendres volantes et à la chaux. Le diffractogramme des sédiments traités révèle la présence de la portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), de la calcite (CaCO_3) et de la tobermorite (CSH). Il existe une partie de la portlandite formée par la chaux avec de l'eau, et une partie de la calcite produite la réaction de carbonations. On observe la présence d'une petite quantité de CSH. En général, la quantité de CSH doit augmenter pour les échantillons conservés à long terme comme à 360 jours.

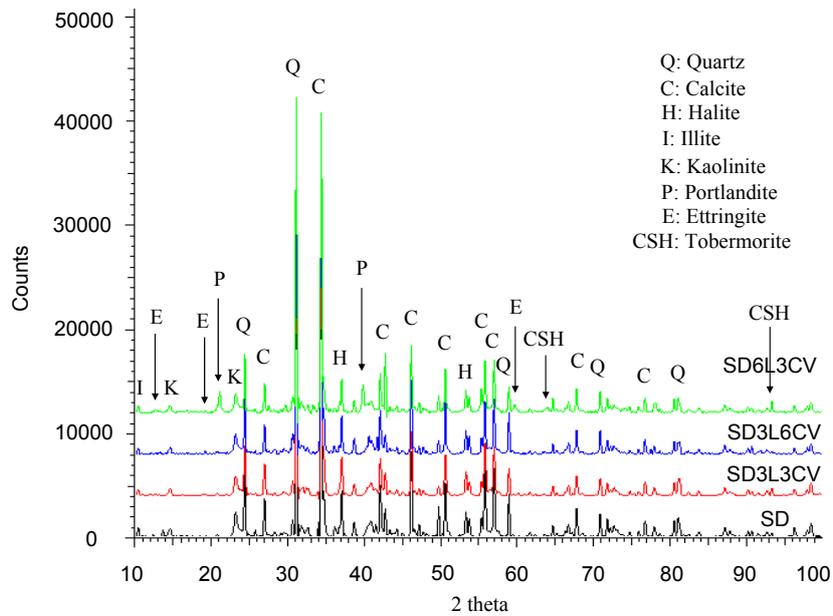


Figure 4.6.3: DRX des sédiments traités à la chaux et aux cendres volantes

Sur la Figure 4.6.4, les diffractogrammes des sédiments traités au ciment et aux cendres volantes sont reportés. On y retrouve les mêmes phases minérales que sur la Figure 4.6.3, comme la portlandite, la calcite et le CSH. En comparaison avec les pics des diffractogrammes des sédiments traités au ciment, la quantité des sédiments traités au ciment et aux cendres volantes diminue d'une façon très significative. Cela conduit à la diminution significative de la résistance des sédiments avec les cendres volantes et le ciment.

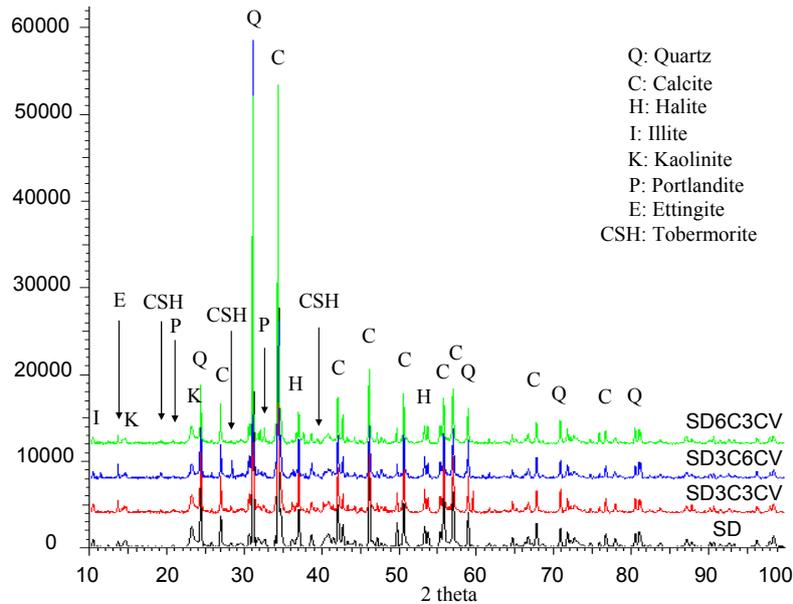


Figure 4.6.4: DRX des sédiments traités au ciment et aux cendres volantes

4.7 Conclusion

Dans ce chapitre, les cendres volantes silico-alumineuses sont introduites pour évaluer leur potentiel en vue de stabiliser des sédiments marins, afin d'utiliser les sédiments traités en technique routière. Les cendres volantes utilisées appartiennent à la classe F, qui contient peu de CaO. Si on s'intéresse à sa propriété pouzzolanique, il faut utiliser du ciment ou de la chaux comme activateur pour créer un environnement de haute alcalinité. Par conséquent, nous avons élaboré six formulations à base du ciment, de la chaux et des cendres volantes.

L'effet des cendres volantes sur les caractéristiques de compaction et sur les indices portants immédiats ont été étudiés. Pour le sédiment brut, l'IPI de tous les matériaux formulés est augmentée après traitement avec un mélange chaux-cendres volantes ou au mélange ciment-cendres volantes, lorsque leurs masses volumiques diminuent. Pour les formulations avec 3% de CV, l'ajout de la chaux ou du ciment peut augmenter la valeur d'IPI. En terme des paramètres de compactage, la variation de la masse volumique sèche maximale et la teneur en eau optimale est un peu compliquée. Pour les formulations avec 3% de chaux, l'augmentation de la quantité des cendres volantes cause la diminution de ω_{opt} , ρ_{opt} et IPI. Mais pour les formulations à base de 3% ciment, les paramètres (ρ_{opt} , ω_{opt} et IPI) ne change pas lorsque la teneur en cendres volantes varie de 3% à 6%.

Pour évaluer le potentiel des sédiments traités en technique routière, les performances mécaniques doivent être explorées. Par rapport aux sédiments bruts, une amélioration évidente de la résistance en compression et en traction après un traitement à la chaux-cendres volantes ou au ciment-cendres volantes. La résistance de SD6C3CV en compression et en traction est remarquablement plus grande que celle des autres formulations. L'augmentation de la quantité des cendres volantes de 3% à 6% n'influence pas considérablement les résistances. Sur l'abaque de classification en fonction de la résistance en traction et le module élastique à 360 jours, on trouve que toutes les formulations élaborées ne peuvent pas être utilisées comme les matériaux d'assise de chaussée.

La durabilité des formulations élaborées a été analysée à l'aide de l'essai du gonflement, de l'essai de gel-dégel et de l'essai de l'immersion à l'eau. La valeur du gonflement des sédiments non-traités est plus élevée que celle des autres formulations relatives aux cendres volantes. Le cycle au gel-dégel et l'immersion à l'eau induisent une diminution significative des résistances en compression. Les résistances de toutes les formulations ayant subi l'immersion à l'eau sont comparables sauf

SD6C3CV dont la résistance de SD6C3CV est beaucoup plus élevée que celle des autres formulations. Pour l'essai de gel-dégel, la perte de la résistance de toutes les formulations varie entre 36.2% et 53.5%.

En utilisant les techniques DRX et ATD/ATG, la variation des phases minérales dû à l'ajout des cendres volantes, du ciment et de la chaux a été étudiée. La présence de la portlandite, de la calcite et de la tobermorite a été prouvée par le DRX et ATD/ATG. Cela nous aide à expliquer le changement de la performance mécanique des sédiments traités aux cendres volantes.

Chapitre 5 Etude supplémentaire des comportements mécaniques des sédiments bruts et traités à la chaux

Ce chapitre a pour principal objectif de mieux connaître le comportement mécanique à l'aide d'essais de consolidation unidimensionnelle, de cisaillement à la boîte et triaxial. Une préconsolidation pour les échantillons est effectuée à cause de la faible consistance et de la teneur en eau élevée des sédiments. Cette étude complémentaire se réalise pour mettre l'accent sur le comportement mécanique de sédiments aux travers d'essais de cisaillement à la boîte et triaxial et la compressibilité par l'essai oedométrique. Dans le cadre d'une utilisation des sédiments pour la réalisation et d'un remblai d'une fondation, les résultats de ces essais au laboratoire seront à prendre en considération.

5.1 Préparation des échantillons par préconsolidation

5.1.1 Choix des appareils

Pour les sédiments bruts et traités à la chaux, une préconsolidation des échantillons doit être effectuée dans les consolidomètres, car la teneur en eau initiale est généralement supérieure à la limite de liquidité. L'état fluide empêche les sédiments d'être utilisé directement dans les essais au laboratoire, et le drainage par consolidation sera réalisé afin de baisser la teneur en eau initiale et de rendre les sédiments ne pas se déformer sous leur poids propre.

Afin de préparer les échantillons pour les essais mécaniques, deux types de moules (Dubois, 2006) ont été choisis:

- des consolidomètres cylindriques en plexiglas de diamètre de 35 mm ($D=35\text{mm}$) (Figure 5.1.1 (a)), utilisés pour les essais triaxiaux,
- des consolidomètres cylindriques en plexiglas de diamètre 70 mm ($D=70\text{mm}$) (Figure 5.1.1 (b)), utilisés pour les essais oedométriques et de cisaillement à la boîte.



(a): Consolidomètre à $D=70$ mm



(b): Consolidomètre à $D=35$ mm

Figure 5.1.1: Deux types de moules utilisés

5.1.2 Paramètres déterminés et procédures utilisées

Pour les deux types de moules, le drainage de l'échantillon est possible en bas et en haut de l'échantillon. Donc le temps de stabilisation du tassement peut être théoriquement calculé par le coefficient de consolidation selon la formule 5.1.1.

$$t = \alpha \times T_v \times H^2 / C_v \quad (5.1.1)$$

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 d'un seul côté,

T_v : facteur temps, le facteur temps à 90% de consolidation est donné par l'abaque de Casagrande, égal à 0.848,

H: épaisseur de l'échantillon,

C_v : coefficient de consolidation déterminé par la relation: $C_v = k \times E' / \gamma_w$ (cm^2/s), avec: k: le coefficient de perméabilité du sol, E' : le coefficient d'élasticité oedométrique et γ_w : le poids spécifique de l'eau.

Pour le calcul du temps de stabilisation de l'évolution du tassement, le plus important, c'est le choix du coefficient de consolidation. Schlosser (1988) a suggéré de fixer un coefficient de consolidation à $8 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ pour de la vase de Martrou en France. Mais Zhang (2005) a indiqué un coefficient de consolidation variant de 3.3 à $5.5 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ pour les vases marines provenant de l'estuaire de Shenzhen en Chine. Par conséquent dans cette étude, on se fixe la valeur de C_v à $4 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$.

Pour la détermination du chemin du drainage, dans notre cas, H est fixé à la moitié de la hauteur de l'échantillon grâce aux drainages en haut et en bas de l'échantillon. H est en moyenne égale à $20/2=10 \text{ cm}$ pour les échantillons dans des consolidomètres et $20/2=10 \text{ cm}$ pour les échantillons dans des cellules oedométriques.

Le temps de stabilisation du tassement est calculé à la suite de la détermination des paramètres nécessaires. On trouve que le temps de stabilisation théorique est d'environ 58.9 heures (2.45 jours), la même valeur pour les cellules oedométriques que pour les consolidomètres. Dans ce cas, on fixe le temps de stabilisation à 4 jours pour chaque palier de chargement.

La procédure de préparation des échantillons développée par Dubois (2006) consiste à:

- réaliser une bonne homogénéisation des sédiments par un malaxage mécanique pendant une heure avec un malaxeur spécifique,

- mesurer la teneur en eau des sédiments et obtenir la teneur en eau atteindre $1.5 W_L$, pour obtenir des matériaux fluides pour une bonne mise en place,

- vérifier la teneur en eau des sédiments homogénéisés au moment du remplissage,

- peser les cellules oedométriques et les consolidomètres avant et après remplissage des matériaux,

- mettre en place les matériaux en plusieurs couches afin de permettre aux bulles d'air dans le matériau de s'évacuer. Les cellules sont remplies afin d'obtenir des échantillons assez grands pour réaliser les essais. Dans des cellules oedométriques, les échantillons consolidés ont une épaisseur d'environ 11 cm. Cela permettait d'obtenir trois échantillons de 20 mm, qui correspond à l'épaisseur requise pour la réalisation d'essais oedométriques ou de cisaillement au boîte. Pour les échantillons préparés dans les consolidomètres, la hauteur était de 16 cm, largement supérieure à 76 mm, hauteur requise pour les essais triaxiaux.

- appliquer les charges formulées et suivre le tassement des échantillons à l'aide des capteurs

5.1.3 Analyse de préconsolidation

La préconsolidation a pour but de diminuer la teneur en eau des matériaux élaborés et de rendre les échantillons dans une forme cylindrique. La détermination des charges appliquées est basée sur plusieurs essais à différentes charges et s'est référée à d'autres recherches. Pour les sédiments bruts, on fixe la contrainte de préconsolidation à 56 kPa (Dubois, 2006) atteinte après 11 paliers de chargement à 5 kPa et par la masse du piston correspondant à 1 kPa. Cet ordre de grandeur de la contrainte de préconsolidation nous a semblé le mieux adapté pour éviter un manque de maintien et des déformations de l'échantillon en sortie de moule (Dubois, 2006). Le programme utilisé du chargement dans cette étude, comme la charge, le nombre de palier et la durée de chargement pour chaque palier, est présenté dans le Tableau 5.1.1.

Ordre de palier	Charge de chaque palier (kPa)	Charge cumulée (kPa)	Durée de chargement (jours)
1	1	1	2
2	5	6	4
3	5	11	4
4	5	16	4
5	5	21	4
6	5	26	4
7	5	31	4
8	5	36	4
9	5	41	4
10	5	46	4
11	5	51	4
12	5	56	4

Tableau 5.1.1: Programme de chargement

Dans cette étude, les sédiments remplis dans les consolidomètres et les cellules oedométriques se sont déformées sous leurs poids propres et piston pendant 2 jours. Puis après mesure du tassement du premier chargement, on a noté le tassement par palier de 4 jours, au bout duquel on remarque la stabilisation du tassement.

Une fois qu'on a suivi l'évolution du tassement des échantillons, l'évolution de l'indice des vides peut être calculée en fonction de la charge. Les résultats sont présentés sur les Figures 5.1.2 (a) (b) et 5.1.3 (a) (b).

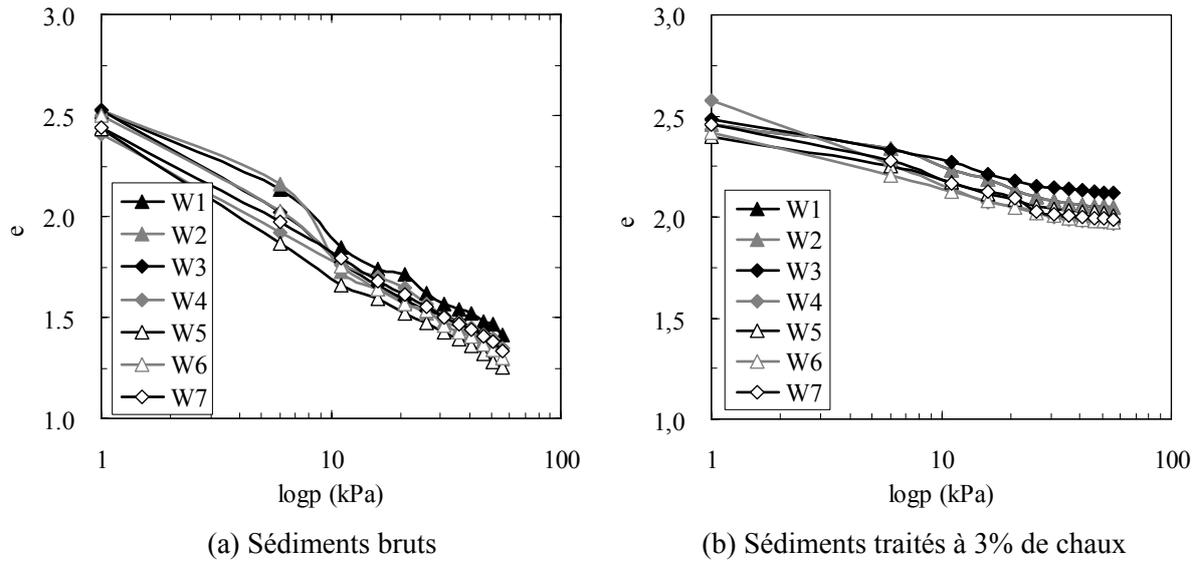


Figure 5.1.2: Evolution de l'indice des vides en fonction de la charge pour les échantillons placés en cellules oedométriques

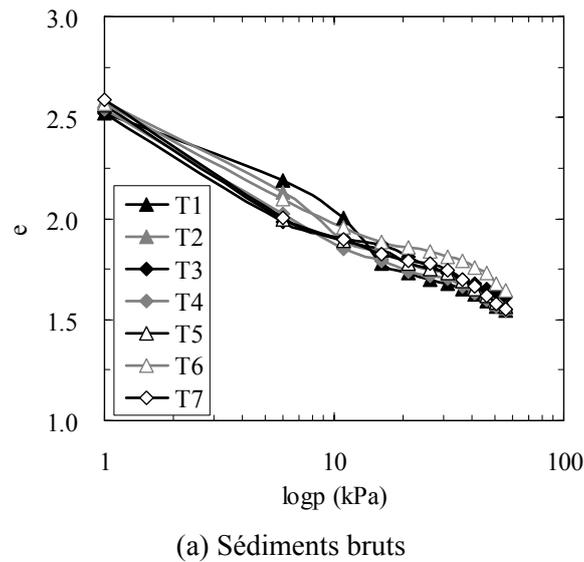


Figure 5.1.3: Evolution de l'indice des vides en fonction de la charge pour les échantillons placés en consolidomètres

Il est à noter que, pendant la période de tassement pour certains essais, les mesures pouvaient être perturbées par le blocage provoqué par les frottements entre les pistons et les sables. Cela influence dans une large mesure l'évolution du tassement en fonction du temps, mais n'influence quasiment pas l'évolution de l'indice des vides en fonction de la charge. Dans le processus de préparation des échantillons, nous devons minimiser la perturbation artificielle des échantillons.

D'après les résultats présentés dans les Figures 5.1.2 et 5.1.3, on observe que les indices des vides de tous les échantillons préparés suivent une évolution semblable avec l'augmentation du chargement. Tous les indices des vides initiaux présentés se situent autour d'une valeur de 2.5, c'est à dire, après un malaxage d'environ une heure, les teneurs en eau initiales des échantillons ont été bien gardés à la même teneur en eau. On peut voir que les disparités des échantillons en terme de l'indice

des vides ont été bien éliminées. Dans le tableau 5.1.2, il n'y a pas de différence importante des indices des vides finaux entre les échantillons. Tous les échantillons sont bien homogènes.

Sédiments bruts					
Essai de compressibilité et de cisaillement à la boîte de Casagrande			Essais triaxiaux		
N°	Indice des vides initiaux	Indice des vides finaux	N°	Indice des vides initiaux	Indice des vides finaux
W1	2.69	1.41	T1	2.69	1.55
W2	2.69	1.30	T2	2.69	1.56
W3	2.69	1.35	T3	2.69	1.61
W4	2.69	1.35	T4	2.69	1.55
W5	2.69	1.26	T5	2.69	1.57
W6	2.69	1.30	T6	2.69	1.64
W7	2.69	1.33	T7	2.69	1.55

Sédiments traités à 3% chaux					
Essai de compressibilité et de cisaillement à la boîte de Casagrande			Essais triaxiaux		
N°	Indice des vides initiaux	Indice des vides finaux	N°	Indice des vides initiaux	Indice des vides finaux
W1	2.64	2.05	T1	/	/
W2	2.64	1.99	T2	/	/
W3	2.64	2.12	T3	/	/
W4	2.64	1.97	T4	/	/
W5	2.64	2.01	T5	/	/
W6	2.64	1.97	T6	/	/
W7	2.64	1.99	T7	/	/

Tableau 5.1.2: Variations des indices des vides des sédiments bruts et traités

5.2 Etude de l'homogénéité des échantillons

Après consolidation, l'homogénéité des échantillons doit être vérifiée par le suivi de l'étude de la teneur en eau liée à l'indice de vide en fonction de la hauteur. D'après la définition de la consolidation, l'eau sort d'un échantillon à cause de la charge appliquée, en influençant l'indice des vides. Cela conduit à un phénomène: plus de particules des sédiments portent plus de charges réparties. Mais la charge appliquée sur l'échantillon par un piston, ne se transmet pas complètement dans l'échantillon jusqu'au bas de l'échantillon, dû au frottement entre le piston et la cellule, et entre l'échantillon et la cellule (Dubois, 2006). En même temps, la forme de répartition de la charge appliquée peut affecter la différence de la teneur en eau à différentes couches.

Afin de vérifier l'homogénéité de la distribution de l'eau et le degré de saturation des échantillons, c'est mieux de prendre un échantillon représentatif et le couper en plusieurs tranches en vue de mesurer la teneur en eau. Dans ce cas, un échantillon marqué W4 a été choisi et coupé en six tranches (de O1 à O6) dont la longueur est d'environ 1.9 cm. Chaque tranche a été divisée en huit fractions, quatre fractions au cœur (numéro 2, 4, 6 et 8) et quatre fractions en périphérie (numéro 1, 3, 5 et 7) de l'échantillon. Ces opérations sont présentées sur la Figure 5.2.1.

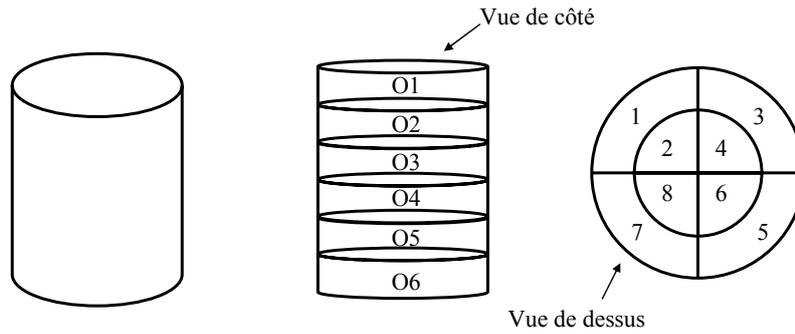


Figure 5.2.1: Coupe de l'échantillon consolidé en cellule oedométrique

Les résultats des teneurs en eau de chaque fraction de l'échantillon sont reportés dans le Tableau 5.2.1. On trouve que la plupart des fractions découpées des tranches de O2 à O6 sont saturées, sauf plusieurs fractions de la première tranche O1. Pour les échantillons préparés à l'aide de préconsolidation, les teneurs en eau sont dans l'ensemble homogènes, et la teneur en eau moyenne globale est de 54.9%. La teneur en eau globale pour chaque tranche augmente en fonction de la profondeur. Donc pour faire les essais à la boîte et les essais de compressibilité, il est convenable d'enlever une partie supérieure et une partie inférieure de l'échantillon afin d'assurer l'homogénéité des échantillons employés aux essais.

Numéro de la fraction	Teneur en eau (%)					
	O1	O2	O3	O4	O5	O6
1	52.2	52.4	53.9	54.8	56.6	58.8
2	52.3	53.1	54.3	55.6	56.2	58.1
3	Non Saturé	52.4	53.2	55.2	56.6	57.9
4	52.4	52.6	53.4	55.6	56.4	56.9
5	Non Saturé	52.3	53.4	55.1	56.5	57.5
6	Non Saturé	52.7	54.1	55.4	56.0	57.2
7	Non Saturé	52.3	54.2	55.0	56.5	58.0
8	52.7	52.6	54.0	54.4	56.9	55.8
Moyenne (%)	52.4	52.6	53.8	55.2	56.5	57.5
Moyenne globale (%)	54.9					

Tableau 5.2.1: Teneurs en eau de chaque fraction de l'échantillon découpé

L'évolution de la teneur en eau en fonction de la hauteur d'un échantillon est décrite sur la Figure 5.2.2, pour les fractions au cœur et au contour. On remarque qu'il n'y a pas de grande différence entre la teneur en eau au cœur et celle au contour, c'est-à-dire les teneurs en eau restent homogènes sur les fractions de la même tranche.

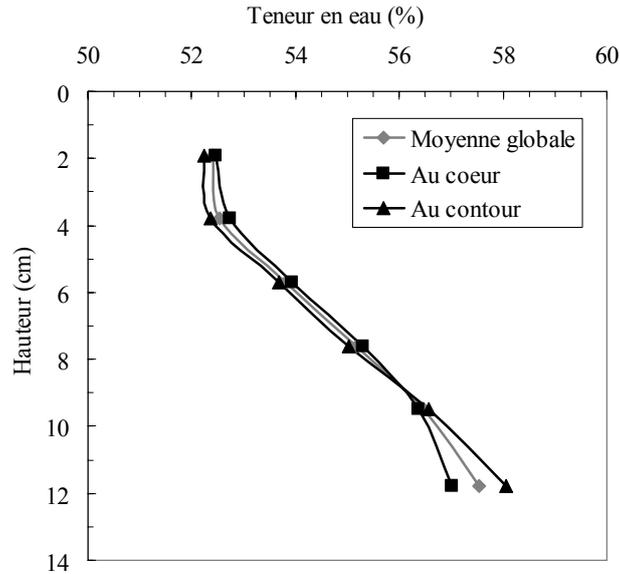


Figure 5.2.2: Evolution de la teneur en eau en fonction de la hauteur d'un échantillon

5.3 Etude du comportement de cisaillement

5.3.1 Description de l'essai

L'essai de cisaillement à la boîte de Casagrande est un essai classique, avec lequel on peut décrire et obtenir le comportement d'un sol à la rupture en déterminant l'angle de frottement (φ) et la cohésion (c). Ces caractéristiques sont utiles pour déterminer la capacité portante d'un sol et vérifier la stabilité d'une fondation ou d'un talus. Les appareils utilisés sont présentés sur la Figure 5.3.1.



Figure 5.3.1: Les appareils utilisés pour l'essai de cisaillement direct

Le système est principalement constitué de deux parties: une centrale d'acquisition et un appareillage spécifique à l'essai. Comme indiqué dans la Figure 5.3.1, on peut suivre le déplacement vertical, le déplacement horizontal et l'effort horizontal par trois capteurs différents. La centrale d'acquisition permet de récupérer toutes les données enregistrées.

L'essai s'effectue sur les éprouvettes cylindriques des sédiments consolidés dans une boîte de cisaillement constituée de deux demi-boîtes indépendantes. Le plan de séparation des deux demi-boîtes constitue un plan de cisaillement de l'éprouvette, sur lequel l'éprouvette est cisailée jusqu'à la rupture. Le principe de l'essai de cisaillement à la boîte consiste à :

- consolider les éprouvettes sous l'effort conçu jusqu'à la stabilisation de tassement,
- appliquer sur la face supérieure de l'éprouvette un effort vertical maintenu constant pendant toute la durée de l'essai,
- tirer horizontalement la demi-boîte supérieure de façon à produire un cisaillement dans l'éprouvette selon le plan horizontal de glissement des deux demi-boîtes à vitesse constante,
- mesurer l'effort horizontal de cisaillement, le déplacement horizontal et vertical,
- récupérer et dépeigner les données acquises par la centrale d'acquisition.

Dans cette étude, deux types d'essais ont été réalisés en fonction du drainage, pour analyser et déterminer les paramètres de cisaillement. Le drainage, qui influence la surpression interstitielle, peut être contrôlé par la vitesse de cisaillement, mais cette méthode n'est pas rigoureuse. L'évolution de la pression interstitielle réalisée pendant le processus de cisaillement ne peut pas être mesurée. Cela empêche la détermination des paramètres effectifs comme la cohésion effective et l'angle de frottement effectif.

- L'essai non drainé, qui donne le comportement de cisaillement des sédiments à court terme, avec une prise en considération de surpressions interstitielles, par une vitesse de déplacement horizontal élevée de 0.9 mm/min. La dimension des échantillons que l'on a utilisé est: le diamètre de 50 mm et la hauteur de 20 mm.

5.3.2 Résultats

Pour les sédiments bruts et les sédiments traités à la chaux de 3%, les essais à la boîte de Casagrande ont été réalisés dans le domaine normalement consolidé, à contraintes normales fixées à 100, 200 et 300 kPa, en conditions non drainées. Pour chaque contrainte normale, au moins deux essais par échantillon doivent être effectués. Les évolutions de la contrainte de cisaillement τ , en fonction du déplacement horizontal δ et de la contrainte normale σ , sont données aux Figures 5.3.2 et 5.3.3.

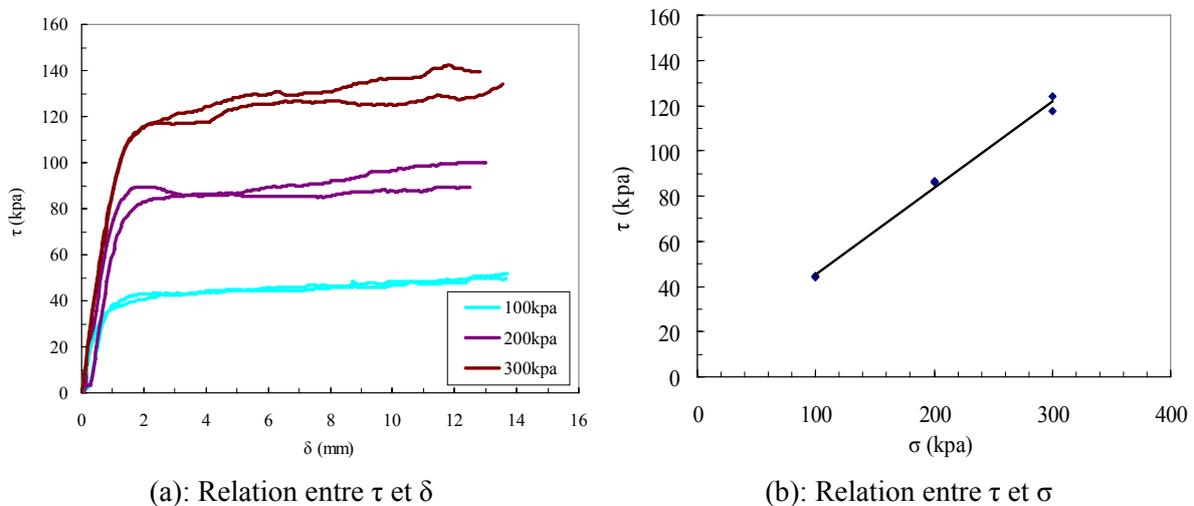


Figure 5.3.2: Essais de cisaillement rectiligne pour les sédiments bruts

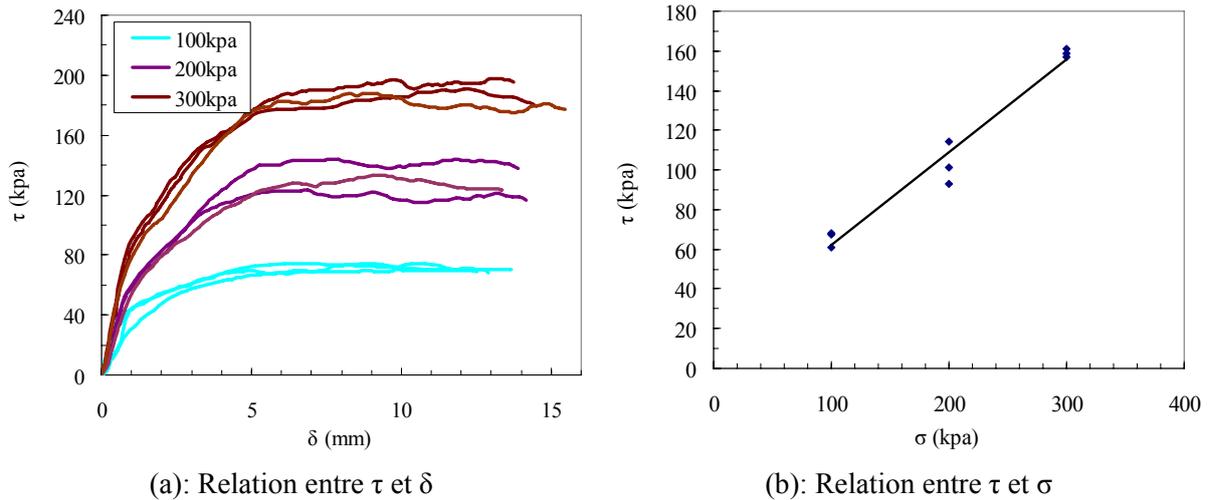


Figure 5.3.3: Essais de cisaillement rectiligne pour les sédiments traités à 3% chaux

On peut définir la relation entre la contrainte de cisaillement τ et la contrainte normale σ de d'après la formule $\tau = \sigma \cdot \tan(\varphi) + c$ pour l'essai de cisaillement. Les paramètres comme l'angle de frottement φ et la cohésion c déterminés par le modèle Mohr-Coulomb sont rassemblés dans le Tableau 5.3.1. On trouve pour les sédiments bruts l'angle de frottement φ est 21.0° et la cohésion c est de 7.1 kPa. Mais pour les sédiments traités à la chaux de 3%, l'angle de frottement φ est 25.1° et la cohésion c est de 15.5 kPa.

Essai	SD brut		Sédiment traité à 3% de chaux	
Paramètres	φ ($^\circ$)	c (kPa)	φ ($^\circ$)	c (kPa)
Valeurs	21.0	7.1	25.1	15.5

Tableau 5.3.1: Paramètres déterminés à la boîte de cisaillement pour les essais de cisaillement

Pour les essais de cisaillement, l'angle de frottement et la cohésion peuvent être influencés par la distribution granulométrique, la matière organique, la forme des grains et l'arrangement granulaire. Dans la présente étude, on trouve que l'angle de frottement des sédiments traités est légèrement plus élevé que celui des sédiments bruts, lorsque la cohésion des sédiments traités est remarquablement plus élevée que celle des sédiments bruts. L'ajout de chaux au sédiment provoque une modification de la qualité des matériaux argileux par échanges des cations alcalins. L'échange cationique développe des forces électriques conduisant à l'agglomération des fines particules argileuses conduisant à des particules grossières, qui renforce l'occlusion mutuelle entre les particules grossières. Cela contribue à l'augmentation de l'angle de frottement des sédiments traités. La réaction pozzolanique produit des agents cimentaires: C-S-H et C-A-H. Les deux agents cimentaires peuvent renforcer les liens entre particules des sédiments, et contribuent à l'amélioration des propriétés du cisaillement.

5.4 Comportement à l'essai œdométrique

5.4.1 Description de l'essai

Une fondation, un remblai, un barrage ou un mur de soutènement exercent sur le sol une charge qui produit des déplacements. L'estimation des déplacements provoqués par la charge nous

intéresse beaucoup lorsque celle-ci est inférieure à la charge limite. Il s'agit de vérifier que ces tassements de la surface du sol restent admissibles pour la fondation ou l'ouvrage envisagé. Donc c'est intéressant de pouvoir prévoir le comportement du sol par l'essai oedométrique au laboratoire.

L'essai oedométrique a pour objet de déterminer la compressibilité des sols soumis à une augmentation de charges verticales, drainés suivant la direction verticale et maintenus latéralement par une paroi rigide. Dans cette étude, on étudie le comportement des sédiments compressibles à l'aide de la même méthode appliquée aux sols. Pour le sédiment dragué, la compressibilité peut résulter de deux phénomènes: la compression du squelette solide et l'évacuation de l'eau contenue dans les vides.

Les essais oedométriques se sont déroulés selon la norme XP P94-090-1 (1997), en visant à encadrer la contrainte de 56 kPa. Le principe de l'essai oedométrique consiste à (Dubois, 2006):

- Phase 1: charger selon les paliers suivants: 0, 25, 37.5, 50 et 62.5 kPa, avec un incrément de pression fixé à 12.5 kPa, sauf pour le premier palier de 25 kPa. Sachant que la pression de préconsolidation est de 56 kPa, il est nécessaire d'atteindre une contrainte supérieure à la pression de préconsolidation.

- Phase 2: décharger jusqu'à 25 kPa en suivant le même incrément de pression, donc les paliers de déchargement sont 50, 37.5 et 25 kPa.

- Phase 3: reprendre le chargement en suivant les paliers: 37.5, 50, 62.5, 125, 250, 500 et 1000 kPa.

- Phase 4: reprendre le déchargement jusqu'à 0 kPa en suivant les paliers suivants: 500, 250, 125, 62.5, 50, 37.5, 25 et 0 kPa.

On observe facilement que, la première phase de chargement des essais oedométriques, correspond au domaine surconsolidé, sauf pour la contrainte de 62.5 kPa. La troisième phase correspond au domaine normalement consolidé, à partir du palier de 62.5 kPa.

Cet essai permet de suivre le tassement des échantillons des sédiments en fonction du chargement appliqué. Après des cycles de chargement et déchargement, la courbe de compressibilité du sol est tracée dans un système de coordonnées semi-logarithmiques sous forme $e \sim \log(\sigma)$. La courbe $e \sim \log(\sigma)$ permet de déterminer l'indice de compression C_c , l'indice de recompression C_s , le coefficient de consolidation C_v , ainsi que la contrainte de préconsolidation σ_p' .

La contrainte de préconsolidation σ_p' est l'intersection des droites du domaine surconsolidé et du domaine normalement consolidé. Le coefficient de compressibilité C_c est la pente de la courbe de chargement, et le coefficient de gonflement/recompression C_s est déterminé grâce à la courbe de déchargement ou courbe de chargement initial. Les coefficients C_c et C_s sont calculés d'après les équations 5.4.7 et 5.4.8.

L'indice initial des vides e_0 des échantillons est calculé selon la formule 5.4.1:

$$e_0 = \frac{\rho_s(1 + w_0)}{\rho_0} - 1 \quad (5.4.1)$$

où, ρ_s est la densité des particules en g/cm^3 , ρ_0 est la densité initiale en g/cm^3 , w_0 est la teneur en eau initiale en pourcentage.

L'indice final de vide e_i sous un certain chargement peut être calculé selon la formule 5.4.2:

$$e_i = e_0 - (1 + e_0) \frac{\sum \Delta h_i}{h_0} \quad (5.4.2)$$

où, h_0 est la hauteur initiale de l'échantillon en mm.

Selon les formules de 5.4.3 à 5.4.6, on peut calculer a , E_s , m_v , C_c et C_s :

$$a = \frac{e_i - e_{i+1}}{p_{i+1} - p_i} (MPa^{-1}) \quad (5.4.3)$$

$$E_s = \frac{1 + e_0}{a} (MPa) \quad (5.4.4)$$

$$C_c (C_s) = \frac{e_i - e_{i+1}}{\log p_{i+1} - \log p_i} \quad (5.4.5)$$

$$m_v = \frac{1}{E_s} \quad (5.4.6)$$

où, p_i et p_{i+1} est un rechargement en MPa.

Sur la courbe de chargement: $C_c = \frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma_v'}$ (5.4.7)

Sur la courbe de déchargement: $C_s = \frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma_v'}$ (5.4.8)

En terme de la détermination du coefficient de consolidation, la méthode de Casagrande définie par la norme XP P94-090-1 (1997) est utilisée. Le coefficient de consolidation d'une éprouvette saturée est déterminé pour un degré de consolidation de 50% à partir de la formule: $C_v = T_v \times h^2 / t$, où, $T_v = 0.197$, $t = t_{50}$, h est la distance de drainage égale à la demi-épaisseur de l'éprouvette au moment où $t = t_{50}$, lorsque le drainage se produit par les deux faces. D'ailleurs, on peut aussi déterminer la contrainte de préconsolidation σ_p à l'aide de XP P94-090-1 (1997). Par définition, la contrainte de verticale effective de préconsolidation correspond au point résultant de l'intersection des droites de la première phase et de la troisième phase.

On doit noter qu'il y a beaucoup de facteurs influant sur la compressibilité des sédiments, comme la matière organique, la quantité du sel, la durée de chargement et de déchargement, l'additif ajouté et la perméabilité des sédiments.

Les échantillons testés pour mesurer le tassement sont différents de ceux consolidés dans les cellules oedométriques. Ainsi donc il faut découper les échantillons suivant la dimension souhaitée pour les essais oedométriques: une hauteur de 20 mm et un diamètre de 50 mm. De ce fait, cela permet de confectionner deux échantillons pour les essais oedométriques avec un échantillon issu de la phase de préparation.

5.4.2 Résultats

Les tassements des échantillons testés dans les oedomètres a été suivi par des capteurs de déplacement. On peut récupérer les données d'un système d'acquisition correspondant à chaque palier du chargement et du déchargement. Les résultats de mesures sont présentés sur les Figures 5.4.1 (a) et (b) sur les trois échantillons pour chaque essai. Les indices des vides initiaux dans la Figure 5.4.1 sont les indices de vides finaux des échantillons préparés par la méthode de préconsolidation dans le Tableau 5.1.2.

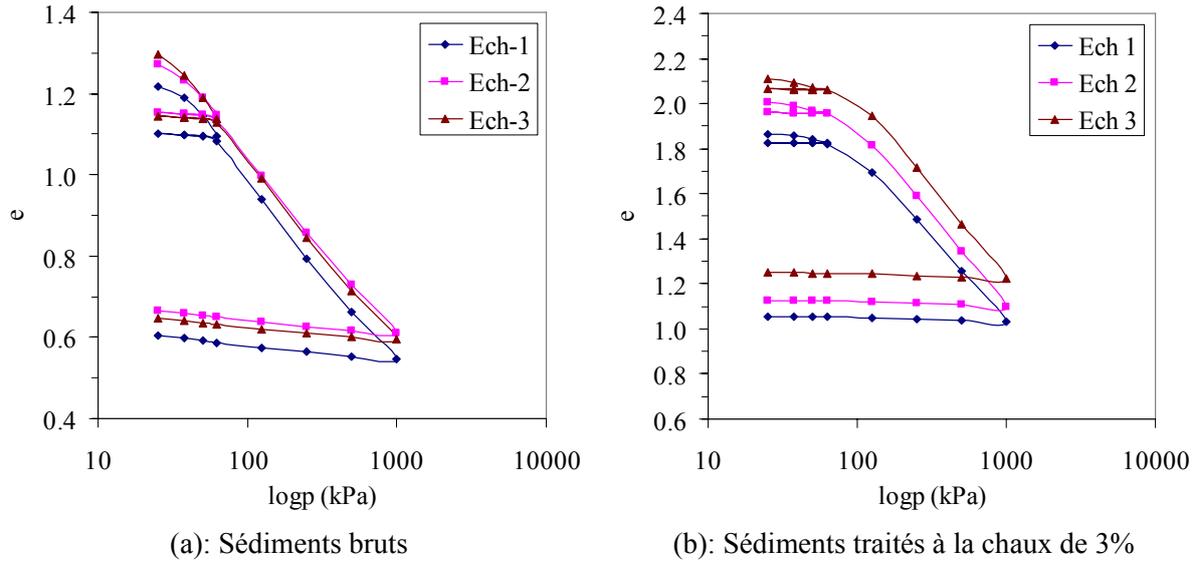


Figure 5.4.1: Courbes de compression unidimensionnelle

Selon les essais de compressibilité, on peut déterminer les paramètres des sédiments bruts et traités à la chaux dans le Tableau 5.4.1, comme la teneur en eau initiale ω , l'indice initial de vide e_0 , la contrainte de préconsolidation σ_p , le coefficient de consolidation C_v , le coefficient de compressibilité C_c et le coefficient de gonflement/de recompression C_s .

Echantillons	N°	ω initiale (%)	e_0	σ_p (kPa)	C_v ($\times 10^{-8}$ m^2/s)	C_c	C_s
SD brut	Ech 1	50.7	1.29	35.2	4.4	0.19	0.019
	Ech 2	52.8	1.35	37.1	3.5	0.19	0.021
	Ech 3	54.2	1.38	30.1	3.1	0.19	0.018
	Moyenne	52.6	1.34	34.1	3.7	0.19	0.019
SD traité à 3% de chaux	Ech 1	74.5	1.90	80.0	41.9	0.29	0.009
	Ech 2	80.1	2.04	81.7	33.1	0.31	0.007
	Ech 3	83.9	2.14	90.5	34.5	0.30	0.008
	Moyenne	79.5	2.03	84.1	36.5	0.30	0.008

Tableau 5.4.1: Résultats des essais de compressibilité

Dans le Tableau 5.4.1, on trouve que sauf le coefficient de gonflement/de recompression tous les paramètres augmentent après le traitement à 3% de chaux. Ceci est dû à la réaction d'échange cationique, les particules des argiles s'agglomèrent les unes les autres en formant les particules plus grosses. Cela engendre de l'augmentation des vides entre les grosses particules qui pourraient augmenter la capacité de résister à la pression appliquée. Donc l'indice des vides e_0 , la teneur en eau initiale ω et la contrainte de préconsolidation σ_p peuvent augmenter en raison de l'ajout de 3% de chaux.

Après l'ajout de la chaux, l'augmentation du coefficient de consolidation C_v est dû à l'augmentation de la perméabilité. Le coefficient de gonflement/de recompression C_s est déterminé lorsque la pression appliquée est inférieure à la contrainte de préconsolidation σ_p pour les sédiments traités à la chaux et la pression appliquée est supérieure à la contrainte de préconsolidation pour les

sédiments bruts. Donc la diminution de l'indice des vides des sédiments traités est inférieure à celle pour les sédiments bruts sous la même charge appliquée. Lors de la pression appliquée supérieure à σ_p , le tassement des sédiments traités augmente considérablement dû à la teneur en eau plus élevée.

5.5 Comportement à l'essai triaxial

5.5.1 Description de l'essai

L'essai triaxial permet d'étudier le comportement mécanique des échantillons cylindriques des sols soumis à une pression hydrostatique de confinement en contrôlant les contraintes principales. Par conséquent, les caractéristiques c (la cohésion) et ϕ (l'angle de frottement) peuvent être déterminées au laboratoire à l'aide de l'essai triaxial.

L'éprouvette de sédiment sous la forme d'un cylindre droit est placée dans une cellule appelée cellule triaxiale. L'éprouvette est contenue dans une membrane en caoutchouc naturel élastique et parfaitement déformable séparant l'éprouvette du liquide cellulaire (de l'eau dans cette étude). La cellule est remplie d'eau, et le dispositif d'essai permet de mettre cette eau en pression, ce qui conduit à appliquer une contrainte isotrope σ_3 à l'éprouvette ($\sigma_2 = \sigma_3$). La cellule triaxiale est placée sur une base et sous un anneau dynamométrique. Les appareils utilisés pour l'essai triaxial sont présentés sur la Figure 5.5.1.

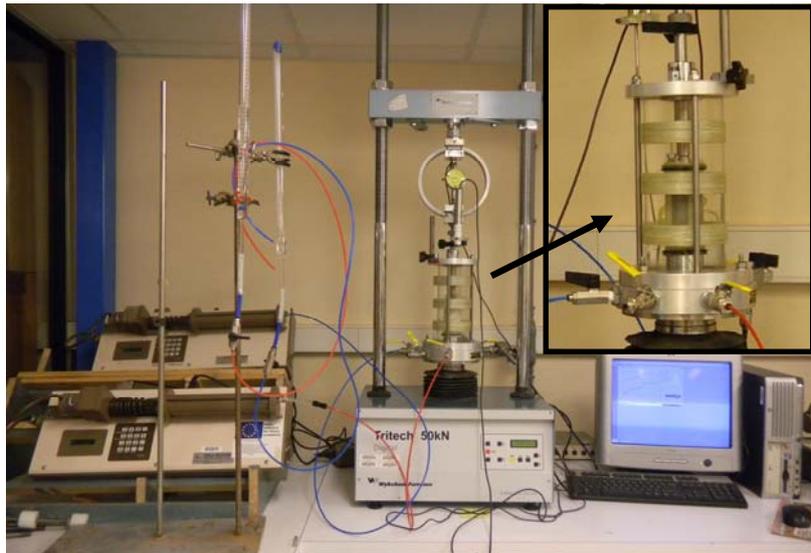


Figure 5.5.1: Presse triaxiale et vérins hydrauliques au laboratoire

Un capteur de déplacement axial est placé en haut de la cellule pour suivre le déplacement axial, et un capteur pression placé en base de la cellule afin de réaliser le suivi de l'évolution de la pression interstitielle. On doit noter que, la variation de la pression de confinement σ_3 et de la pression interstitielle u est réalisée par deux vérins hydrauliques de type GDS. Une centrale d'acquisition, permettant de récupérer les données enregistrées des vérins, du capteur de pression, du capteur de déplacement axial et du capteur de la force, est présentée aussi sur la Figure 5.5.1.

La contrainte axiale contient deux parties: une est exercée par le piston, une autre est la contrainte radiale appliquée sur une surface égale à la différence entre la section totale et la section du piston. La hauteur et le diamètre, à la mise en place dans la cellule triaxiale, sont respectivement de 76 mm et de 35 mm. Les déformations axiales et radiales sont les sommes des déformations relatives entre deux points de mesure:

$$\varepsilon_a = \sum_{i=0}^n (H_i - H_{i-1}) / H_{i-1} \quad (5.5.1)$$

$$\varepsilon_r = \sum_{i=0}^n (D_i - D_{i-1}) / D_{i-1} \quad (5.5.2)$$

où: H_i est la hauteur de l'échantillon mesurée à l'instant i , D_i est le diamètre calculé à partir de l'aire de la surface transversale de l'échantillon à l'instant i .

Les essais triaxiaux ont été réalisés selon les procédures suivantes (Dubois, 2006):

- Première saturation: Tout d'abord, on sature l'échantillon cylindrique à l'aide d'un vérin et de deux burettes en utilisant la différence de pression d'eau entre l'échantillon et la burette remplie de l'eau. Cette opération a pour but de pousser les bulles d'air vers le haut. Ensuite, on applique une pression de confinement de 20 kPa pour faire sortir les bulles d'air. Cette opération doit être répétée environ 5 fois pour s'assurer de la bonne saturation de l'échantillon.

- Deuxième saturation: On augmente la pression de confinement de 20 kPa à 220 kPa et la contre-pression à 200 kPa. La contre-pression permet d'améliorer la saturation des éprouvettes grâce à la compression et à la dissolution des bulles d'air dans le liquide interstitiel. L'application des pressions est réalisée par des vérins hydrauliques.

- Consolidation: On consolide les échantillons mis dans la cellule en utilisant la méthode du chemin de contrainte. Le chemin de contrainte passe du point (0, 0) à point (100kPa, 0), (200kPa, 0), (300kPa, 0) et (400kPa, 0) respectivement sous la pression de confinement 100, 200, 300 et 400 kPa.

- Essai de cisaillement en condition consolidé et non drainé (CU): Cisailer les échantillons jusqu'à la rupture.

5.5.2 Résultats

5.5.2.1 Relation u_c - ε_a et q - ε_a

L'essai triaxial CU+u est réalisé sans drainage et donc à volume constant et à contrainte de confinement constante (σ_0). Un changement de l'état des contraintes induit une modification de la pression interstitielle, qui en résulte ne dépend que du déviateur de contraintes appliqué ($\sigma_1 - \sigma_3$). Donc l'état de contraintes effectives à la rupture est indépendante de la valeur de la contrainte isotrope initiale σ_0 . La relation contrainte-déformation-pression interstitielle est déterminée à partir des essais à l'appareil triaxial à des sollicitations à vitesse de déformation axiale imposée. Les Figures 5.5.2 et 5.5.3 donnent la relation q - ε_a et la relation u_c - ε_a sous les différentes contraintes de confinement. Les contraintes de confinement choisies sont 100 kPa, 200 kPa, 300 kPa et 400 kPa. On trouve que la pression interstitielle augmente jusqu'à la stabilisation. On peut observer l'apparition d'un pic pour chaque courbe q - ε_a , même si le pic correspondant à la rupture n'est pas très significatif.

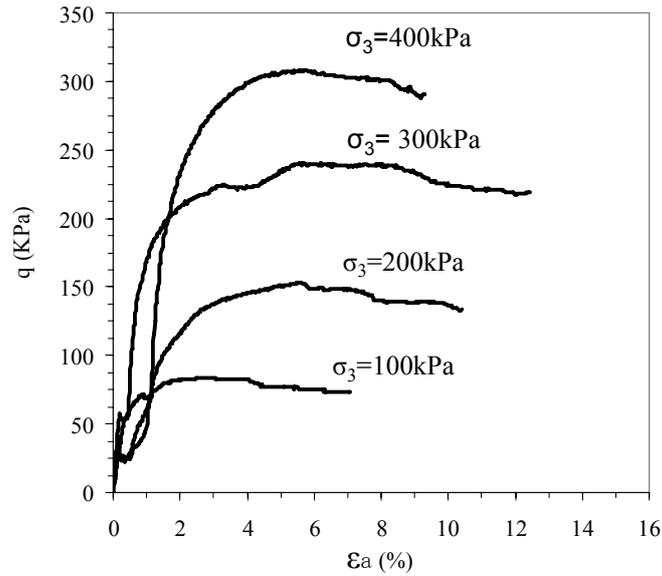


Figure 5.5.2: Relation entre le déviateur de contrainte q et la déformation axiale ϵ_a

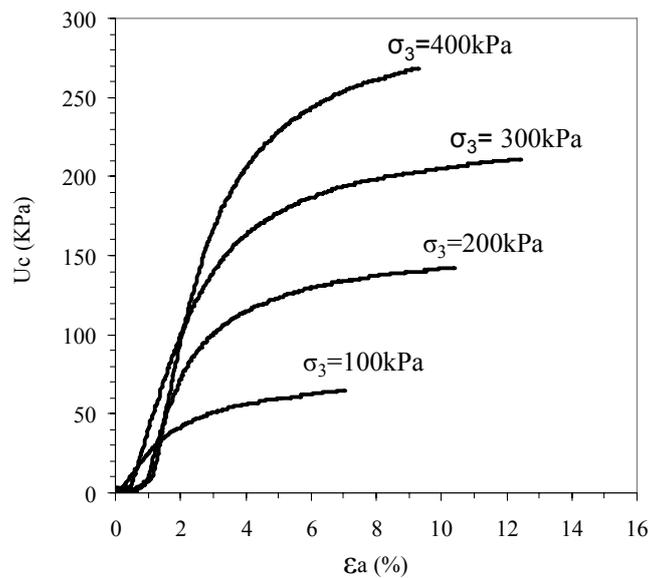


Figure 5.5.3: Relation entre le déviateur de contrainte u_c et la déformation axiale ϵ_a

5.5.2.2 Chemin de contraintes effective et totale

L'évolution du déviateur de contrainte q en fonction de la contrainte effective moyenne ou de la contrainte totale moyenne est présentée sur la Figure 5.5.4. La différence entre la contrainte totale moyenne et la contrainte effective moyenne est la pression interstitielle sur la représentation des chemins de contrainte. Pour la méthode du chemin de contrainte totale, le déviateur q augmente en fonction du contrainte totale moyenne p . Pour la méthode du chemin de contrainte effective, le déviateur q tout abord augmente avec la contrainte effective moyenne q' jusqu'au déviateur maximal, ensuite diminue dû à l'augmentation de la pression interstitielle U_c .

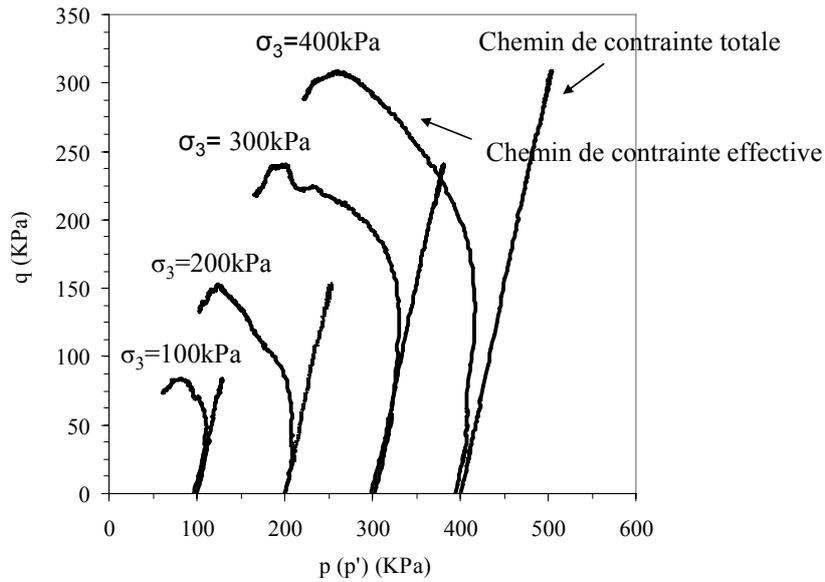


Figure 5.5.4: Chemin de contraintes effective et totale pour un essai CU+u

5.5.2.3 Relation ϵ_a - ϵ_r

Les essais consolidés non drainés (CU+u) sont réalisés à volume constant, donc on peut considérer que la déformation volumique ϵ_v égale à 0. La déformation volumique dans l'espace à trois dimensions est la somme des déformations radiales et des déformations axiales, soit $\epsilon_v = \epsilon_a + 2\epsilon_r$. La relation entre la déformation axiale ϵ_a et la déformation radiale ϵ_r est présentée à la Figure 5.5.5. On trouve $\epsilon_a = -2\epsilon_r$ d'après les données expérimentales. Cela correspond bien à la relation théorique entre ϵ_a et ϵ_r .

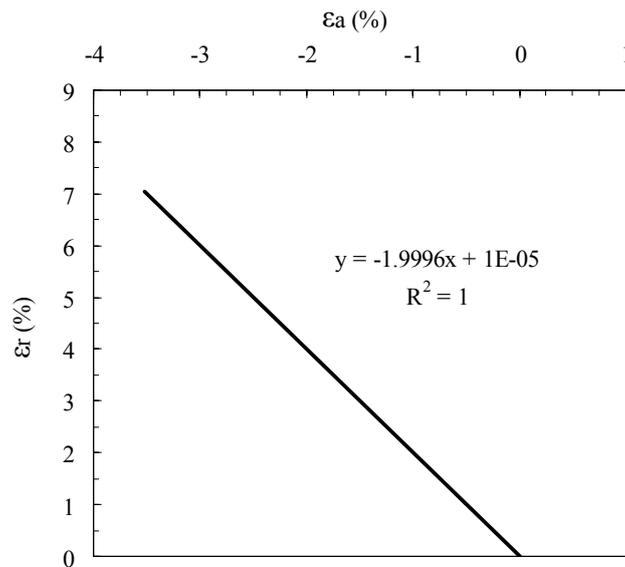


Figure 5.5.5: Relation entre la déformation axiale ϵ_a et la déformation radiale ϵ_r

5.5.2.4 Détermination des paramètres de cisaillement

L'évaluation des caractéristiques de résistance est respectivement réalisée en utilisant la contrainte totale et la contrainte effective. Les résultats sont présentés sur les Figures 5.5.6 et 5.5.7 et le Tableau 5.5.1. L'angle de frottement et la cohésion sont déterminés en utilisant le modèle Mohr-Coulomb. On note que la cohésion est proche de la valeur 0, et l'angle de frottement est remarquable.

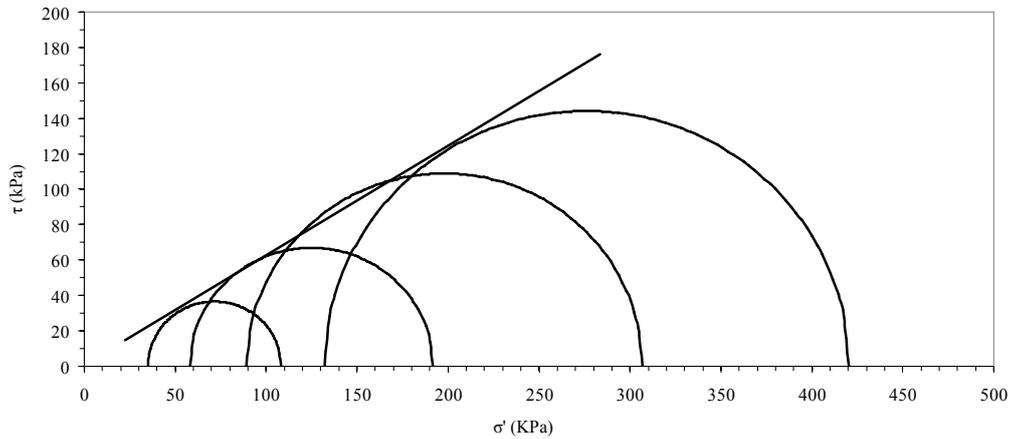


Figure 5.5.6: Détermination des paramètres de cisaillement en contraintes effectives

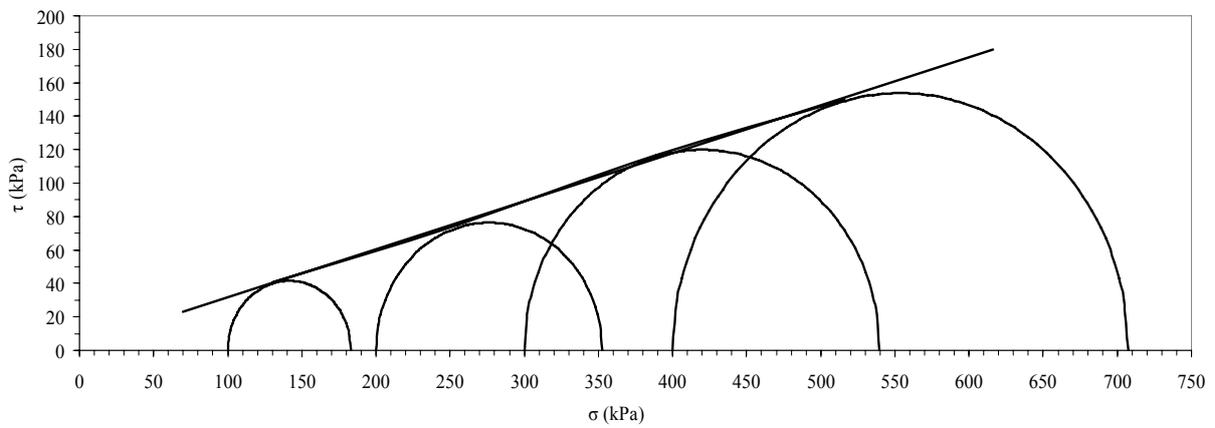


Figure 5.5.7: Détermination des paramètres de cisaillement selon en contraintes totales

SD brut	c (kPa)	ϕ (°)
Effective	1.0	31.7
Totale	3.0	16.0

Tableau 5.5.1: Les paramètres de résistance de cisaillement d'après les calculs de Mohr-Coulomb

5.5.2.5 Modalités de la rupture des échantillons

Après la réalisation des essais triaxiaux sur les sédiments bruts, on peut observer deux modalités différentes de la rupture des échantillons sur la Figure 5.5.8 (a) et (b).

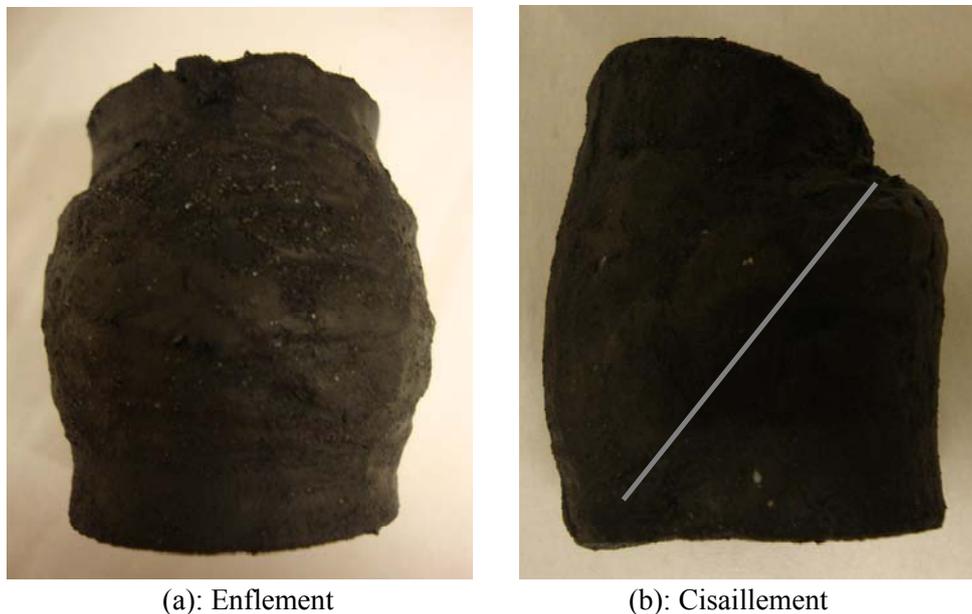


Figure 5.5.8: Modalités de la rupture des échantillons

Pour la Figure 5.5.8 (a), l'application de la force verticale sur la surface cause le gonflement de l'échantillon. Pour la Figure 5.5.8 (b), on observe une localisation des déformations pour l'essai consolidé non drainé. Si on continue à appliquer la force verticale à la surface de l'échantillon, l'échantillon sera écrasé au long de la ligne marquée. Mais c'est à noter que l'apparition de la localisation des déformations est peut-être dans une mesure à cause de la mauvaise mise de l'échantillon et de la mauvaise coupe de la surface supérieure.

5.6 Conclusion

Il serait intéressant de réaliser une étude plus approfondie sur les sédiments marins et les sédiments traités à la chaux. Dans cette partie, on a réalisé les essais complémentaires comme l'essai de cisaillement à la boîte Casagrande, l'essai de compressibilité et l'essai triaxial consolidé non drainé. Les essais se sont réalisés sur la base des échantillons des sédiments bruts et traités à la chaux préparés par la méthode de préconsolidation.

Tous les échantillons sont préparés par l'oedomètre ou le consolidomètre. Les tassements ont été suivis à l'aide des capteurs de déformation afin de déterminer les indices des vides initiaux et finaux. On a prouvé que les échantillons préparés sont en général homogènes selon la variation de la teneur en eau en fonction de la profondeur d'échantillon.

Cette étude est consacrée aux sédiments bruts et traités à la chaux, et leurs caractéristiques ont pu être déterminées:

- Selon l'essai de compressibilité, plusieurs paramètres ont été calculés. En comparant les sédiments bruts et sédiments traités, on trouve que tous les paramètres comme l'indice des vides e_0 , la

teneur en eau initiale ω , la contrainte de préconsolidation σ_p et le coefficient de préconsolidation C_v , augmentent après le traitement à 3% de chaux sauf le coefficient de gonflement/recompression.

- Selon l'essai de cisaillement à la boîte, on observe que l'angle de frottement ϕ augmente de 21.0° à 25.1° , et la cohésion c augmente de 7.1 kPa à 15.5 kPa à cause de l'ajout de 3% de chaux.

- En terme de l'essai triaxial, on a trouvé deux modalités de la rupture pour les échantillons étudiés: gonflement et cisaillement. Les relations $\varepsilon_a-\varepsilon_r$, $u_c-\varepsilon_a$ et $q-\varepsilon_a$ ont été étudiées pour explorer les performances mécaniques des sédiments bruts. La cohésion des sédiments bruts déterminée par l'essai triaxial est proche de 0, et l'angle de frottement déterminé par la contrainte totale et la contrainte effective est respectivement égale à 16.0° et 35.7° .

Chapitre 6 Conclusions générales et perspectives

6.2.1 Conclusions

La gestion des sédiments dragués dans les ports et les voies navigables, qui contiennent plus ou moins de polluants organiques et inorganiques, constitue un problème économique, social et environnemental majeur dans le domaine génie civile et environnemental. La grande quantité des sédiments bruts nécessite aujourd'hui la recherche de solutions nouvelles pour traiter les sédiments. La mise en dépôt et l'immersion en mer sont de plus en plus limitées par les législations, parce que les deux traitements polluent l'environnement aquatique, et utilisent une bande de terre ou un bassin. De nombreuses études se sont intéressées à la mise au point de procédés de traitement efficaces et peu coûteux. Le traitement de Stabilisation/Solidification (S/S) est une technique classique et couramment utilisée pour la valorisation des sédiments provenant des lacs, des rivières et de la mer.

Pour la valorisation des sédiments avec la technique S/S, plusieurs liants peuvent être choisis, comme le ciment, la chaux, les cendres volantes et les laitiers. Dans cette étude, les cendres volantes sont choisies afin de solidifier les sédiments et de réutiliser les cendres volantes. Les cendres volantes sont le sous-produit principal de déchets solides fins, qui résultent de la combustion d'une matière fossile majoritairement carbonée d'origine végétale. Cependant pour les cendres volantes silico-alumineuses, il faut utiliser des activateurs comme le ciment et la chaux afin d'activer le potentiel pouzzolanique des cendres volantes. Nos travaux de recherche s'intéressent à la valorisation de sédiments dragués et de cendres volantes dans le secteur du Bâtiment et des Travaux Publics. L'objectif consistait à améliorer les propriétés mécaniques et environnementales des sédiments et des cendres volantes pour une utilisation en couche d'assise de chaussée.

L'identification des sédiments tout d'abord a été réalisée à partir du point de vue physique, chimique, minéralogique et environnemental, comme la teneur en eau initiale, la teneur en matière organique, la granulométrie, les limites d'Atterberg, la valeur au bleu de méthylène, la masse volumique, le DRX et FX et l'étude environnementale. Pour les sédiments bruts, la teneur en eau initiale est d'environ 130%, et la matière organique déterminée par la calcination à 450°C est 6.73%. On trouve que les sédiments bruts possèdent une teneur en eau et une teneur en matière organique élevées. Les caractéristiques physiques ont permis de classer les sédiments marins en classe F11A4 qui désignent les sols fins, faiblement organiques. La valeur de l'indice portant immédiat à la teneur en eau optimale pour les sédiments bruts montre qu'une difficulté de circulation des engins sur le chantier. Par conséquent, les sédiments bruts ne peuvent pas être utilisés comme les matériaux d'une couche d'assise de la chaussée.

En fonction de l'évolution de pH de sédiment-chaux et de sédiment-ciment, on peut déterminer la teneur en ciment et en chaux ajoutée dans les sédiments. La teneur en eau optimale ω_{opt} , la masse volumique sèche maximale ρ_{opt} et l'indice portant immédiat IPI correspondant à la teneur en eau optimale sont déterminées en utilisant les essais de Proctor Modifié et d'IPI. Pour les mélanges sédiment-chaux, ω_{opt} augmente en fonction de la teneur en chaux, lorsque ρ_{opt} diminue puis se stabilise. Pour les mélanges sédiment-ciment, ω_{opt} des sédiments traités diminue en fonction de la teneur en ciment, ρ_{opt} diminue puis augmente à 9% de ciment. L'IPI des mélanges sédiment-ciment augmente avec la teneur en ciment de 0% à 6%, puis diminue. L'IPI des mélanges sédiment-chaux atteint l'IPI maximal à 3% de chaux, puis diminue avec l'augmentation de la quantité de chaux. Les performances mécaniques peuvent être évaluées à travers la résistance en compression, la résistance en traction et le

module d'élasticité. Pour les formulations avec le ciment, les résistances en compression et en traction augmentent lorsque la quantité du ciment de 0% à 9%. Pour les formulations avec la chaux, leurs résistances changent remarquablement peu. Les résultats mécaniques montrent que seule la formulation SD9C peut être utilisée en couche d'assise de chaussée. Pour évaluer la durabilité des matériaux à base de ciment et de chaux, des essais de gel-dégel, de gonflement et d'immersion à l'eau sont réalisés. D'après les valeurs du gonflement, le traitement au ciment ou à la chaux est considéré comme adapté et acceptable d'après la norme NF P94-100 (1999). Les échantillons des sédiments bruts sont détruits à l'immersion à l'eau en 24 heures, lorsque les résistances des échantillons ayant subi 28 jours de cure normale diminuent considérablement dues à l'attaque d'immersion à l'eau et au cycle de gel-dégel. A l'aide des techniques DRX et ATG/ATD, les nouvelles phases minérales sont analysées, et le CSH est responsable de l'amélioration des propriétés mécaniques.

Les cendres volantes de classe F ont été utilisées pour évaluer leur potentiel d'utilisation dans le domaine de S/S. Avant d'utiliser les cendres volantes, les caractéristiques physiques, minéralogiques et environnementales a été étudiées. Selon des formulations élaborées, la variation de ρ_{opt} , ω_{opt} et IPI ont été étudiée à l'aide de l'essai de compactage et de la mesure d'IPI. Pour les formulations avec 3% de CV, l'ajout d'activateur (ciment, chaux) augmente la valeur d'IPI, lorsque la variation de ρ_{opt} et ω_{opt} est compliquée. Pour les formulations avec 3% de chaux, l'augmentation de la quantité des cendres volantes cause de la diminution de ω_{opt} , ρ_{opt} et IPI. Cependant, les paramètres (ρ_{opt} , ω_{opt} et IPI) ne changent pas lorsque la teneur en cendres volantes varie de 3% à 6% pour les formulations à base de 3% ciment. Sauf la formulation SD6C3CV, les résistances en compression et en traction d'autres formulations changent peu en fonction du temps. Mais on trouve les résistances des formulations basées sur la chaux et les cendres volantes sont plus élevée que celles des formulations basées sur le ciment et les cendres volantes, à l'exception de SD6C3CV. Excepté les performances mécaniques des formulations élaborées, la durabilité doit être étudiée par le moyen de l'essai gel-dégel et de l'immersion à l'eau. Le cycle au gel-dégel et de l'immersion à l'eau induit la diminution significative des résistances en compression. Les résistances de toutes les formulations ayant subi l'immersion à l'eau sont comparables sauf SD6C3CV. La valeur du gonflement des sédiments non traités est plus grande que celle des autres formulations relatives aux cendres volantes, mais la valeur du gonflement de toutes les formulations est inférieure à 5%. La présence de la portlandite, de la calcite et de la tobermorite a été prouvée par le DRX et ATD/ATG. Les phases minérales aident à expliquer la performance mécanique des sédiments traités aux cendres volantes.

En comparant l'effet des cendres volantes sur les mélanges sédiment-ciment et sédiment-chaux, on trouve des conclusions intéressantes: (1) Pour les mélanges sédiments-chaux, l'ajout des cendres volantes induit la diminution de la masse volumique sèche maximale et la teneur en eau optimale, mais augmente l'indice portant immédiat; Pour les mélanges sédiment-ciment, l'ajout des cendres volantes baisse la masse volumique sèche maximale et la teneur en eau optimale, mais augmente très faiblement l'indice portant immédiat; (2) L'ajout des cendres volantes de classe F peut améliorer les performances mécaniques, comme la résistance en compression, la résistance en traction et le module d'élasticité; (3) L'ajout de cendres volantes affaiblit significativement la résistance en compression des mélanges sédiment-ciment ayant subi les cycles au gel-dégel ou l'immersion à l'eau, cependant l'ajout des cendres volantes améliore légèrement la résistance en compression des mélanges sédiment-chaux ayant subi l'immersion à l'eau mais diminue la résistance en compression des mélanges sédiment-chaux ayant subi le cycle au gel-dégel.

L'étude complémentaire est consacrée aux propriétés de compressibilité et de cisaillement des sédiments bruts et des sédiments traités à la chaux. D'après l'essai de compressibilité, on trouve que l'ajout de 3% chaux augmente les paramètres comme l'indice des vides, la teneur en eau initiale, la contrainte de préconsolidation et le coefficient de préconsolidation. En terme de résultats de cisaillement à la boîte de Casagrande, l'angle de frottement et la cohésion sont augmentés grâce à l'ajout de la chaux. Pour l'essai triaxial, les relations $\varepsilon_a-\varepsilon_r$, $u_c-\varepsilon_a$ et $q-\varepsilon_a$ ont été étudiées sur les échantillons des sédiments bruts. On observe que la cohésion des sédiments bruts est proche de 0,

lorsque l'angle de frottement est 16.0 et 35.7 respectivement déterminé par les contraintes effectives et totales.

6.2.2 Perspectives

Au terme de ce travail, les perspectives qui se dégagent peuvent être regroupées selon trois axes:

- Pour la valorisation des sédiments en technique routière, les granulats comme les sables, les fumées de silices, les laitiers d'aciéries et les laitiers de haut fourneau peuvent être utilisés pour améliorer la propriété mécanique et la capacité portante des formulations élaborées. Les granulats dont la taille est supérieure à $63\mu\text{m}$ sont considérés comme les squelettes granulaires, qui influencent de façon prépondérante les principales propriétés des formulations telles que la résistance et la durabilité. Cela peut assurer que les formulations élaborées peuvent satisfaire à l'exigence de classement de S2.

Le modèle d'empilement compressible généralement utilisé pour la formulation de bétons sera utilisé pour formuler les matériaux sur la base de sédiments marins, de granulats, de cendres volantes, du ciment ou de la chaux. Ce modèle peut être utilisé pour voir dans dans quelle mesure ce modèle peut nous aider à développer des matériaux routiers.

- Pour utiliser les matériaux en couche d'assise de chaussée, des paramètres relatifs au comportement mécanique sous chargement cyclique seront étudiés. Il apparaît donc utile dans le prolongement de ce travail d'effectuer des essais cycliques pour déterminer les propriétés de fatigue des matériaux formulés. La fatigue caractérisée par une étendue de variation de contrainte inférieure à la résistance à la traction du matériau, est un processus qui modifie les propriétés locales d'un matériau sous l'action de contraintes ou déformations variables dans le temps.

- La possibilité d'utilisation des formulations élaborées sur la base de sédiments marins et cendres volantes calciques en couche d'assise de chaussée est intéressante. Les cendres volantes contenant une grande quantité de CaO ont des propriétés hydrauliques et pouzzolaniques. Donc on peut utiliser directement les cendres volantes pour le traitement des sédiments marins, sans l'utilisation des activateurs comme chaux et ciment. Mais il faut trouver une solution pour résoudre les problèmes ramenés par les cendres volantes calciques, par exemple le gonflement.

- La perméabilité est une des qualités les plus importantes à prendre en considération pour les matériaux utilisés en couche d'assise de forme. En ce qui concerne les sédiments marins, il est intéressant d'étudier leurs changements de perméabilité produits à cause de l'ajout des liants comme le ciment, la chaux et les cendres volantes. Après l'ajout de ces liants, une série de réactions chimiques se dérouleront dans ces matériaux formulés, et cela change certainement la microstructure et les modes interactions entre des particules.

- Il serait intéressant d'approfondir les travaux concernant les formulations élaborées sur le ciment ou les cendres volantes à l'aide d'essais en laboratoire, comme l'essai triaxial, l'essai de compressibilité et l'essai de cisaillement à la boîte Casagrande. L'effet du ciment ou des cendres volantes sur la compressibilité et la propriété mécanique peut être exploré.

- La réalisation d'un pilote expérimental in situ permettra de modéliser la réalité d'utiliser les matériaux formulés en technique routière. La planche expérimentale permet de montrer la faisabilité chantier et de valider la démarche méthodologique élaborée.

Références

- [1] AADA. <http://www.adaa.asn.au/statistics.htm>.
- [2] Zri A., Abriak N.E., Zentar R. Etude comparative du comportement physico-mécanique d'un sédiment pollué et non pollué. «Déchets - Revue Francophone d'écologie industrielle», Trimestre 2009, N°53-1, p13-19.
- [3] ACI Committee 226. Use of Fly Ash in Concrete. ACI Materials Journal, ACI 226.3R-87, Title no.84-M39, p.381-409. 1987.
- [4] Agence de l'eau. Méthode de gestion et de réutilisation des sédiments pollués - Inventaire détaillé des techniques de curage, transport, traitement et usage des sédiments. 2002, p126. <http://www.eau-artois-picardie.fr/>
- [5] Ahmaruzzaman M. Role of fly ash in the removal of organic pollutants from wastewater, Energy Fuels 23 (2009), pp. 1494–1511.
- [6] Al-Amoudi B., Abduljawwad S.N. Compressibility and collapse characteristics of arid saline sabkha soils. Engineering Geology, 1995, 39: 185-202.
- [7] Al-Amoudi O.S.B., Khan K., Al-Kahtani N.S. Stabilization of a Saudi calcareous marl soil. Construction and Building Materials, 24 (2010), 1848-1854.
- [8] Alkan C., Arslan M., Cici M., Kaya M., Aksoy M. A study on the production of a new material from fly ash and polyethylene. Resources, Conservation and Recycling, 13: 147-154, 1995.
- [9] Al-Rawas A. Ali, Hago A.W., Al-Sarmi H. Effect of lime, cement and Sarooj (artificial pozzolan) on the swelling potential of an expansive soil from Oman. Building and Environment, 40 (2005) 681-687.
- [10] Al-Tabaa A. and Evans C.W. Medium term performance of stabilized/solidified contaminated soil-grout materials. Proceeding of the 14th ICSMFE, Hambourg, Allemagne, p: 1941-1946, 1997.
- [11] Alzieu C. «Dragages et environnement marin», Ifremer, Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement, Paris, ISBN 2-84433-014-2, 1999.
- [12] Alzieu C., Michel P. L'étain et les organoétains en milieu marin : Biogéochimie et écotoxicologie. Direction de l'Environnement Littoral, Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer. Ifremer, 1998.
- [13] Amer Ali Al-Rawas, A.W.Hago, Hilal Al-Sarmi. Effect of lime, cement and Sarooj (artificial pozzolan) on the swelling potential of an expansive soil from Oman. 40: 2005, 681-687.
- [14] Amiran M., Wilde C.L., Haltmeier R.L., Pauling J.D., Sontag J.G. Advanced sediment washing for decontamination of New York/New Jersey harbour dredged materials. Proceedings of Nineteenth Western Dredging Association Annual Meeting and Conference and Thirty-first Texas A & M University Dredging Sediment, Kentucky, 1999.
- [15] Arrêté du 08/01/98. Arrêté du 08/01/1998 fixant les prescriptions techniques applications aux épandages de boues sur les sols agricoles pris en application du décret n° 97-1133 du 08/12/97 relatif à l'épandage des boues issues du traitement des eaux usées. JO du 31 1998.
- [16] Arrêté du 14 juin 2000. Arrêté du 14 juin 2000 relatif aux niveaux de référence à prendre en compte lors d'une analyse de sédiments marins ou estuariens présents en milieu naturel ou portuaire. Source <http://www.ineris.fr/aida/>.
- [17] «Article L 541-1». Article L 541-1 : Livre V : Prévention des pollutions, des risques et des nuisances. Titre IV : Chapitre 1^{er} : Elimination des déchets et récupération des matériaux. Section 1 : Dispositions générales. 2003. <http://www.legifrance.gouv.fr/>
- [18] ASTM C618. ASTM standard specification for coal fly and raw calcined naturel pozzolan for use in concrete (C618-05). In: Annual book of ASTM standards, concrete and aggregates, vol: 04.02. American Society for Testing Materials, 2005.
- [19] Attoh-Okine N.O. Lime treatment of laterite soils and gravels-revisited. Construction and Building Materials, 1995, Vol.9, No.5, p283-287.

- [20] Ayrinhac F. Valorisation des cendres volantes de chaudière à lit fluidisé circulant dans la filière du génie civil. Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, juin 2005.
- [21] Bell F.G. Lime stabilization of clay minerals and soils. *Engineering Geology*, 1996, 42: 223-237.
- [22] Bennett R.H., Lehman L., Hulbert M.H., Harvey G.R., Bush S.A., Forde E.B., Crews P. and Sawyer W.B. Interrelationships of organic carbon and submarine geotechnical properties. *Marine Geotechnology*, Vol. 6, No. 1: 61-98, 1985.
- [23] Bernert T.A, Maher M.H, Jafari F, Gucunski N. 2000. Use of dredged sediments from Newark Harbor for geotechnical applications. *Geotechnics of high water content materials*, ASTM STP 1374, T.B.Edil and P.J.Fox, Edx., ASTM, West Conshohocken, p.153-164.
- [24] Bhattacharjee Ujjwal, Kandpal Tara Chandra. 2002. Potential of fly ash utilisation in India. *Energy*, 27: 151-166, 2002.
- [25] BSI. Method of test for soils for civil engineering purposes: classification test (BS1377-2). British Standard Institution (BSI), London, UK, 1990.
- [26] Bonnet C. Développement de bio-essais sur sédiments et applications de l'étude, en laboratoire, de la toxicité de sédiments dulçaquicoles contaminés. Thèse de l'université de Metz, Février 2000.
- [27] Boucard L. Valorisation de sédiments fluviaux stabilisés. Thèse de l'université de Lille, 2006.
- [28] Boutin R. Dragage et rejets en mer – les produits de type vase. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2000.
- [29] Boutouil M. Traitement des vases de dragage par solidification/stabilisation à base de ciment et additifs. Thèse de Doctorat, Université du Havre, France, 1998.
- [30] Boutouil M., Levacher D. Traitement et valorisation des vases de dragages par solidification/stabilisation : état de l'art. VIèmes Journées Nationales Génie Civil – Génie Côtier, P : 367-375, Caen, France, 17-19 mai 2000.
- [31] Brandl H. Alteration of soil parameters by stabilisation with lime. *Proc. of the 10th ICSMFE*. Stockholm, 1981, p: 587-589.
- [32] Carlsten P., Tränk R. Deep stabilization with lime and lime/cement columns-comparison of performance. *Deep Stabilisation (NGM-92)*, 1992, p:1-6.
- [33] CETMEF. Inventaire des techniques de dragage. Avril 2000, 32p.
- [34] Chandra N., Agnihotri N., Bhasin S., Khan A.F. Effect of addition of talc on the sintering characteristics of fly ash based ceramic tiles. *Journal of the European Ceramic Society*, 25: 81-88, 2005.
- [35] Chen Bo, Zhang Yamei, Guo Liping. Investigation of drying shrinkage of high volume fly ash concrete. *Journal of Southeast University*, 2007, 37 (2): 334-338. (en chinois)
- [36] Chiu C.F., Zhu W., Zhang C.L. Yielding and shear behaviour of cement-treated dredged materials. *Engineering Geology*, 2008, 103:1-12.
- [37] Cho J.S., Lee C.W., Kang S., Lee J., Lee H., Bok J., Woo J., Moon Y., Choi Y. Molecular cloning of a phytase gene (phy M) from *Pseudomonas syringae* MOK1. *Curr. Microbiol.*, 51: 11-15, 2005.
- [38] Choquette M., Bérubé M.A. and Locat J. Mineralogical and Microtextural changes Associated with lime stabilization of Marine clays from eastern Canada. *Applied Clay Science*, Vol.2, 1987, p: 215-232.
- [39] Chrysochoou Maria, Dermatas Dimitris. Evaluation of ettringite and hydrocalumite formation for heavy metal immobilization: Literature review and experimental study. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, 136: 20-33.
- [40] Clozel-Leloup B., Freyssinet Ph. Valeurs guides intervenant dans la gestion des sédiments et méthodologie d'élaboration de ces valeurs : synthèse bibliographique, Paris : BRGM, 2003.
- [41] Colin D. Valorisation de sédiments fins de dragage en technique routière. Thèse de doctorat de l'université de CAEN. 2003.
- [42] «Décret n° 2002-540». Décret n° 2002-540 du 18 avril 2002 relatif à la classification des déchets. J.O n° 93 du 20 avril 2002 page 7074 texte n°41. <http://www.legifrance.gouv.fr/>
- [43] Deschamps T., Benzaazoua M., Bussièrre B., Belem T., Mbonimpa M. Mécanismes de rétention des métaux lourds en phase solide : cas de la stabilisation des sols contaminés et des déchets industriels. *Vertigo-La revue en sciences de l'environnement*, Vol 7 No 2 : p1-6 Septembre 2006.

- [44] Derriche Z., Lazzali F. Analyse des mécanismes de stabilisation d'un sol gonflant par apport de chaux sous différentes formes. *Engineering geology and the environment: proceedings : International Symposium on Engineering Geology and the Environment : Athens, Greece, 23-27 June, 1997.*
- [45] Dermatas D, Dutko P, Balorda-Barone J, Moon D. 2003. Evaluation of engineering properties of cement treated Hudson River dredged sediments for reuse as fill material. *Journal of marine environmental engineering*, 7, p.101-123.
- [46] Deng An. The influence of different soil properties on stabilization behaviour of reinforced soils. *Soil engineering and foundation*, 2001, 12(1): 13-18. (en chinois)
- [47] Deok Hyun Moon, Wazne Mahmoud, Yoon In-Ho, Grubb Dennis G. Assessment of cement kiln dust (CKD) for stabilization/solidification (S/S) of arsenic contaminated soils. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 159: 512-518.
- [48] Ding Tianrui, Gao Mingsheng, Tang Tongzhi, Cheng Wanzhao. The test research on the strength of cement - soil under the condition of high water content. *Journal of NanTong Institute of Technology (Natural Science)*, 2004, 3(4): 65-68. (en chinois)
- [49] Douglas O.A. Osula. 1991. Lime modification of problem laterite. *Engineering Geology*, 1991, 30: 141-154.
- [50] Duan Z. Caractérisation, stabilisation et solidification de sédiments fins marins. Thèse de doctorat, Université de Caen, France, 2008.
- [51] Dubois V. Caractérisation physico-mécanique et environnementale des sédiments marins. Application en technique routière. Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Douai, France, 2006.
- [52] Dupraz J., Zohry M.. Apports de la technique de traitement de sols argileux et limoneux à la chaux. <http://www.mtpnet.gov.ma/>
- [53] Eades J.L., Grim R.E. A quick test to determine lime requirements for lime stabilization. *Highway Research Bulletin*, 139: 61-72, 1966.
- [54] Fan Zhao-ping, Zhu Wei, Zhang Chun-lei. Experimental study on influence of organic matter on solidified dredging. *Rock and Soil Mechanics*, Vol.26, No.8: 1327-1334.
- [55] Feng Tao-Wei. Fall - cone penetration and water content relationship of clay. *Géotechnique*, Vol.50, No 2: 181 – 187, 2000.
- [56] Feng Tao-Wei, Lee Jia-Yih, Lee Yi-Juan. Consolidation behavior of a soft mud treated with small cement content. *Engineering Geology*, 59: 327-335, 2001.
- [57] Fantozzi-Merle C. Etude de matériaux à base de liant hydrauliques contenant des polluants organiques modèles : Propriétés structurales et de transfert. Thèse de doctorat, L'Istitutat National des Sciences Appliquées de Lyon, 2003.
- [58] Foucher J. Valorisation des déblais sableux de dragage portuaire en France métropolitaine. ENTPE, Ifremer, 2005.
- [59] Foucault A., Raoult J.F. Dictionnaire de géologie. Editions Masson, Paris, 1980. ISBN 2-225-654661-1.
- [60] Gao Y., Zheng J. A laboratory experiment on cement-stabilized soil. *Journal of HoHai University (natural science)*, 1999, 27(5): 103-106. (en chinois)
- [61] GB18668-2002. Marine sediment quality GB18668-2002 (République Populaire de Chine) 2002.
- [62] Geffard O. Toxicité potentielle des sédiments marins et estuaires contaminés : Evaluation chimique et biologique, biodisponibilité des contaminants sédimentaires. Thèse de doctorat, Université Bordeaux I, 2001.
- [63] G.E.O.D.E. "Bilan d'activité : suivi de la qualité des matériaux de dragage".1996.
- [64] Glasser F.P. Fundamental aspects of cement solidification and stabilization. *Journal of Hazardous Materiel*, 1997, 52:151-170.
- [65] GTR. "Guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme", fascicule II, LCPC, 1992.
- [66] GTS. Guide du traitement des sols à la chaux et aux liants hydrauliques. Editions du SETRA-LCPC (Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes - Laboratoire Central des Ponts et Chaussées), 2000.
- [67] Gu H., Chen S. Engineering properties of river sludge and its stabilization. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2002, 24(1): 108-111. (en chinois)

- [68] Guray Salihoglu, Vedat Pinarli. Steel foundry electric arc furnace dust management : Stabilization by using lime and Portland cement. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 153: 1110-1116.
- [69] Hamer K., Karius V. Brick production with dredged harbour sediments. An industrial-scale experiment. *Waste Mangement*, 2002, vol.22.
- [70] Han Sujian, Li Ning, Guo Minxia, Li Yuanting. Study on physical mechanical characters of cement stabilized mud and filling loess. *Journal of northwest sci-tech university of agriculture and forestry (natural science edition)*, 2004, 32(5): 97-100. (en chinois)
- [71] Hansen J. The delicate architecture of cement. *Science* 1982, 3(10): 48-55.
- [72] Hills C.D., Pollard S.J.T. Influence of interference effect on the mechanical, microstructural and fixation characteristics of cement-solidified hazardous waste forms. *Journal of Hazardous Material*, 52: 171-191, 1997.
- [73] Hou Yongfeng, Gong Xiaonan. The permeability of cement-treated soils. *Journal of ZheJiang University (Engineering Science)*, 2000, 34(2): 189-193. (en chinois)
- [74] Hu Mingyu, Zhu Xiaomin, Lei Bin, Ding Chengping, Li Xibao. Study of high-volume fly ash cement and its application in civil engineering, *Journal of Nanchang University (Engineering & Technology)*, 2004, 26(3): 34-39. (en chinois)
- [75] Huang Zhencheng, Ji Chaochou, Guo Fengqi. Fly ash dam in Thermal power plant. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1988, 10(5): 118-123. (en chinois)
- [76] Husein Malkawi A.I., Alawneh A.S., Abu-Safaqah O.T. Effects of organic matter on the physical and the physicochemical properties of an illitic soil. *Applied Clay Science*, 1999, 14: 257-278.
- [77] Indraratna B., Chowdhury R.N. Improvement of a residual soil with industrial by-products. Proc. of the 2nd International Congress on Environmental Geotechnics. Osaka, Japon. Vol.2, p: 733-738, 1996.
- [78] Jarrige A. «Les cendres volantes : Propriétés - Applications industrielles». Editions Eyrolles, Paris, France, 1971.
- [79] Ji Fengling, Zhu Wei, Li Mingdong. Solidification technique for disposal of scrap foam plastics and dredged silt. *Environmental Science & Technology*, 2004, 27(5): 69-70, 77. (en chinois)
- [80] Jia Jian. Research on comprehensive water content of cement treated soil. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2006, 2(1): 132-136,140. (en chinois)
- [81] JOCE 16 janvier 2003. « Journal officiel des Communautés européennes – Décision du conseil du 19 décembre 2002 établissant des critères et des procédures d'admission des déchets dans les décharges, conformément à l'article 16 et à l'annexe II de la directive 1999/31/CE ». *J.O des Communautés Européennes* du 16 janvier 2003, L 11, p27-49. <http://www.legifrance.gouv.fr/>
- [82] Karouite A. Utilisation des cendres volantes pour la prévention des désordres dus à l'alcali-réaction. Ecole HASSANIA des Travaux publics, 2003. http://www.memoireonline.com/09/08/1539/m_utilisation-cendres-volantesprevention-desordres-alkali-reaction0.html.
- [83] Kim B., Prezzi M. Evaluation of the mechanical properties of class-F fly ash. *Waste Management*, 28: 649-659, 2008.
- [84] Klein C. Etude bibliographique internationale sur la valorisation des cendres de LFC en trois volumes : Asie, Europe, Amérique du Nord. Rapport interne EDF. 1998.
- [85] Konert M., Vandenberghe J. Comparison of laser grain size analysis with pipette and sieve analysis: a solution for the underestimation of the clay fraction. *Sedimentology* 1997, 44: 523-535.
- [86] Kumpiene Jurate, Lagerkvist Anders, Maurice Christian. Stabilisation of As, Cr, Cu, Pb and Zn in soil using amendments-A review. *Waste Management*, 2008, 28: 215-225.
- [87] Lafhaj Z., Saliceto A, Cohen Solal L., Coudray Y., Huynh Trung T., Le Guen B., Anguoni F. The use of the Novosol process for the treatment of polluted marine sediment. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, vol. 148, p 606-612.
- [88] Lee S.B., Lee Y.B., Lee C.H., Hong C.O., Kim P.J., Yu C. Characteristics of boron accumulation by fly ash application in paddy soil. *Bioresource Technology*, 99: 5928-5932, 2008.
- [89] Li Y., Lu B., Zhang J., Zhang Y. The treatment of solidifying river bed silt and correlative examination. *Journal of Harbin University of C.E. & Architecture*, 1999, 32(6): 66-69. (en chinois)

- [90] Li X.D., Poon C.S., Sun H., Lo I.M.C., Kirk D.W. Heavy metal speciation and leaching behaviors in cement based solidified/stabilized waste materials. *Journal of Hazardous Materials*, 2001, A82:215-230.
- [91] Lin D.F., Lin K.L., Hung M.J., Luo H.L. Sludge ash/hydrated lime on the geotechnical properties of soft soil. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 145: 58-64.
- [92] Liu H. Experimental study of the strength characteristics of compacted cement soil. *Geotechnical and Engineering Technique*, 1996, (3): 16-25. (en chinois)
- [93] Lozeau J. L., Arbouille D., Santiago S., Vernet J. P. Evaluation of a wide range laser diffraction grain size analyser for use with sediments. *Sedimentology*, 1994, 41: 353-361.
- [94] Locat J., Tremblay H., Lerouell S. Mechanical and hydraulic behaviour of a soft inorganic clay treated with lime. *Can. Geotech. J.*, Vol 33: 654-669, 1996.
- [95] Malviya R., Chaudhary R. Factors affecting hazardous waste solidification / stabilization : A review. *Journal of Hazardous Materials*, B137: 267-276, 2006.
- [96] Manceau A., Marcus M.A., Tamura N. 2002. Quantitative speciation of heavy metals in soils and sediments by synchrotron X-ray techniques. In *Applications of Synchrotron Radiation in Low-Temperature Geochemistry and Environmental Science. Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, Mineralogical Society of America, 49, 341-428.
- [97] Mahmood A., Merrill K.S. and Le K.M. Testing of Admixtures for seabed strengthening. *Cold Régions Engineerng, Proc. Of the 4th international Conference*, Anchorage, Alaska, USA, p: 225-263, 1986.
- [98] McCallister L.D., Petry T.M. 1992-a. Leach tests on lime treated clays. *Geotech. Test. J.* 1992, 15(2): 106-114.
- [99] McCallister L.D., Petry T.M. 1992-b. Techniques for estimating the longevity of lime-treated expansive clays. *Geotech. Test. J.* 1992, 15(3): 231-237.
- [100] McCave I. N., Bryant R. J., Cook H. F., Coughanowr C. Q. Evaluation of a laser diffraction size analyser for use with natural sediments. *J. Sedim Petrol.*, 1986, 56: 561-564.
- [101] Michel F. «Les granulats», Union nationale des producteurs de granulats. 1997.
- [102] Minocha A.K., Neeraj Jain, Verma C.L. Effect of inorganic materials on the solidification of heavy metal sludge. *Cement and Concrete Research*, 33: 1695-1701, 2003.
- [103] Minoux M.A. Cendres volantes et microcendres: Procédés d'obtention, conséquences physiques et chimiques sur le système microcendres – ciments – eau. Doctoral dissertation. France: INSA Toulouse, 1994.
- [104] Miraoui M. Mise en œuvre d'une démarche de prétraitement et de traitement des sédiments de dragage en vue d'une valorisation dans le génie civil. Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Douai, France, 2010.
- [105] Moufti A., Mountadar M. Lessivage des fluorures et des métaux à partir d'une cendre à charbon. *Water Qual.Res.J., Canada*, 2004, 9(2): 113-118.
- [106] Mulligan Catherine N., Yong Raymond N., Gibbs Bernard F. An evaluation of technologies for the heavy metal remediation of dredged sediments. *Journal of Hazardous Materials*, 2001, 85: 145-163.
- [107] Nalbantoglu Z., Tuncer E.R. Compressibility and hydraulic conductivity of a chemically treated expansive clay. *Can. Geotech. J.*, 2001, 38: 154-160.
- [108] Narasimbha Rao S., Rajasekaran G., Prasad C.V. Sea-bed stabilization by chemical grouting. *Offshore Technology*, 1992, 1-B: 621-628.
- [109] NF EN 12879. Caractérisation des boues – Détermination de la perte au feu de la matière sèche. 2000.
- [110] NF EN 14227-4. Mélanges traités aux liants hydrauliques. Spécifications: cendres volantes pour mélanges traités aux liants hydrauliques. Février 2005.
- [111] NF ISO 13320-1. Analyse granulométrique. Méthodes par diffraction laser. Partie 1 : principes généraux. Septembre 2000.
- [112] NF P 11-300. Septembre 1992. Exécution des terrassements – Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières. Septembre 1992.

- [113] NF P 15-301. Juin 1994. Liants hydrauliques : Ciments courants - Composition, spécifications et critères de conformité.
- [114] NF P 18-560. Granulat – Analyse granulométrique par tamisage, AFNOR, 1990.
- [115] NF P 94-050. Sols : reconnaissance et essais. Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux - méthode des matériaux. 1995.
- [116] NF P 94-051. Sols : reconnaissance et essais – détermination des limites d’Atterberg – limite de liquidité à la coupelle – limite de plasticité au rouleau. 1993.
- [117] NF P 94-052-1. Sols : reconnaissance et essais – détermination des limites d’Atterberg – Partie 1 : limite de liquidité – Méthode du cône de pénétration. 1995.
- [118] NF P 94-056. Sols : reconnaissance et essais. Analyse granulométrique -Méthode par tamisage à sec après lavage. 1996.
- [119] NF P 94-057. Sols : reconnaissance et essais. Analyse granulométrique des sols - Méthode par sédimentation. 1992.
- [120] NF P 94-068. Sols : reconnaissance et essais – mesure de la quantité et de l’activité de la fraction argileuse – détermination de la valeur au bleu de méthylène d’un sol par l’essai à la tâche. 1993.
- [121] NF P 94-078. Sols: Reconnaissance et essais. Indice CBR après immersion, Indice CBR immédiat, Indice Portant Immédiat, Mesure sur échantillon compacté dans le moule CBR. Décembre 1997.
- [122] NF P 94-093. Détermination des caractéristiques de compactage d’un sol: essai Proctor normal, essai Proctor modifié. Décembre 1999.
- [123] 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. Août 1999.
- [124] NF P 94-102-1. Sols: Reconnaissance et essais. Sol traité au liant hydraulique, éventuellement associé à la chaux, pour utilisation en couche de forme. Partie 1: Définition – Composition - Classification. Juillet 2001.
- [125] NF P 94-102-2. Sols: Reconnaissance et essais. Sol traité au liant hydraulique, éventuellement associé à la chaux, pour utilisation en couche de forme. Partie 2: Méthodologie des études de formulation en laboratoire. Juillet 2001.
- [126] NF P 98-110. Assises de chaussées – Cendres volantes silico-alumineuses – Spécifications. 1991.
- [127] NF P 98-113. Novembre 1994. Assises de chaussée. Sables traités aux liants hydrauliques et pouzzolaniques. Définition-Composition-Classification.
- [128] NF P 98-114-2. Assises de chaussées. Méthodologie d’étude en laboratoire des matériaux traités aux liants hydrauliques. Partie 2: Sables traités aux liants hydrauliques. Mais 2009.
- [129] 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.
- [130] NF P 98-115. Janvier 1992. Exécution des corps de chaussées – Constituants - Composition des mélanges et formulation-Exécution et contrôle.
- [131] NF P 98-230-2. Préparation des matériaux traités aux liants hydrauliques ou non traités. Fabrication des éprouvettes de sable ou de sols fins par compression statique. Août 1993.
- [132] NF P 98-232-1. Détermination des caractéristiques mécaniques des matériaux traités aux liants hydrauliques. Essai de compression simple sur graves. Novembre 1991.
- [133] NF P98-232-3. Détermination des caractéristiques mécaniques des matériaux traités aux liant hydrauliques. Essai de compression diamétrale sur sables et sols fins. Décembre 1993.
- [134] NF P 98-234-1. Essais relatifs aux chaussées - Comportement au gel des matériaux traités aux liants hydrauliques - Partie 1: essai de résistance au gel-dégel des graves et sables traités. Avril 1992.
- [135] Nie Y. Engineering technical manual for treatment of three wastes: Solid waste. Chemical Industry Press, Beijing, 2000.
- [136] Osula D.O.A. A comparative evaluation of cement and lime modification of laterite. Engineering Geology, 42: 71-81, 1996.
- [137] OSPAR, 1998. Décision 98/249/CE du conseil. JO L 104 du 03/04/1998.

- [138] OSPAR Commission. Dumping of waste at sea in 2000. 2003. <http://www.ospar.org>
- [139] OSPAR Commission. Dumping of waste at sea in 2001 and 2002. 2004. <http://www.ospar.org>
- [140] OSPAR Commission. Dumping of waste at sea in 2003. 2005. <http://www.ospar.org>
- [141] OSPAR Commission. 2007. Dumping of waste at sea in 2005 and Assessment of the Annual Reports 2003-2005. <http://www.ospar.org>
- [142] Park C.K. Hydration and solidification of hazardous wastes containing heavy metals using modified cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, 2000, 20: 429-435.
- [143] Paria S., Pak K.Y. Solidification-stabilization of organic and inorganic contaminants using Portland cement: a literature review. *Environ. Rev.* 2006, Vol.14 : 217-255.
- [144] Palomo A., Grutzeck M.W., Blanco M.T. Alkali-activated fly ashes - A cement for the future. *Cement and Concrete Research*, 29: 1323-1329, 1999.
- [145] Peng J.F., Song Y.H., Yuan P., Cui X.Y., Qiu G.L. The remediation of heavy metals contaminated sediment. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 161: 633-640.
- [146] PREDIS. Démarche PREDIS - Nord Pas de Calais "Améliorer la valorisation des déchets industriels en BTP", Groupe de travail n°5, Guide technique régional relatif à la méthodologie de gestion des sédiments de dragage portuaire. Ecole des Mines de Douai, Université Sherbrooke, Université D'artois.
- [147] «PREDIS-CV». PREDIS. Améliorer la valorisation des déchets industriels en BTP - Guide technique régional relatif à la valorisation des cendres volantes de charbon. <http://www.cd2e.com/CD2EStatic/contenu/predis/CV.pdf>.
- [148] "Protocole immersions". Adopté le 16 1976 et modifié le 10 juin 1995. "Protocole relatif à la prévention et à l'élimination de la pollution de la mer Méditerranée par les opérations d'immersion effectuées par les navires et aéronefs ou d'incinération en mer". <http://www.pap-medclearinghouse.org/fra/pdf/Dumping%20Protocol.pdf>.
- [149] «Produits». Composition des rubriques «Produits». http://ofrir.lcpc.fr/article_produi/45/0/196/article_redige.doc.
- [150] Rahman M.A. Effects of cement-lime mixes on Lateritic soils for use in highway construction. *Building and Engineering*, 1987, Vol.22, No.2, p141-145.
- [151] Rajasekaran G. Physico-chemical behaviour of lime treated marine clay. PhD Thesis, Ocean Engineering Centre, Indian Institute of Technology, Madras, India, 1993.
- [152] Rajasekaran G., Narasimha Rao S. 2002-a. Compressibility behaviour of lime-treated marine clay. *Ocean Engineering*, 2002, 29: 545-559.
- [153] Rajasekaran G., Narasimha Rao S. 2002-b. Permeability characteristics of lime treated marine clay. *Ocean Engineering*, 2002, 29: 113-127.
- [154] Rekik B., Boutouil M. Etude de la compressibilité et de la microstructure d'un sédiment de dragage traité au liant hydraulique. IXèmes Journées Nationales Génie Civil-Génie Côtier, 12-14 septembre, 2006, Brest.
- [155] Saitoh S., Suzuki Y. and Shirai K. Hardening of soil improved by deep mixing method. Takenaka Research Report, No.36, p141-146, 1986.
- [156] Samuel Akinlabi Ola. The potential of lime stabilization of lateritic soils. *Engineering Geology*, 1977, 11: 305-317.
- [157] Sariosseiri F., Muhunthan B. Effect of cement treatment on geotechnical properties of Washington State soils. *Engineering Geology*, 2009, 104: 199-125.
- [158] Scheetz B.E., Earle R. Utilization of fly ash. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 1998, pp.3.
- [159] Schneider G. Le curage des sédiments des cours d'eau. *Le courrier de l'environnement de l'INRA*, 2001, vol.43, p146-147.
- [160] Schlosser F.. *Eléments de mécanique des sols*, Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, ISBN 2-85978-104-8, 1988, p.276.
- [161] Scordia Pierre-Yves. Caractérisation et valorisation de sédiments fluviaux pollués et traités dans les matériaux routiers. Thèse de doctorant, Ecole centrale de Lille, 2008.
- [162] Sezer A., Gözde İ., Recep Y.H., Ramyar K. Utilization of a very high lime fly ash for improvement of Izmir clay. *Building and Environment*, 2006, 41: 150-155.

- [163] Shen Weiguo, Hu Jinqiang, Li Ruilin, Zhou Mingkai, Wang Jin, Wang Yiheng. Properties of the high volume Fly ash special purpose cement for road base stabilization. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2009, 31(12): 15-19. (en chinois)
- [164] Stellacci P., Liberti L., Notarnicola M., Bishop P.L. Valorisation of coal fly ash mechano-chemical activation Part I. Enhancing adsorption capacity. *Chemical Engineering Journal*, 149: 11-18, 2009.
- [165] Sora I.N, Pelosato R., Batto D., et Dotelli G. Chemistry and microstructure of cement pastes admixed with organic liquids. *J. Eur. Ceram. Soc.* 2002, 22: 1463-1473.
- [166] Tang Yixin, Liu Hanlong, Zhu Wei. Study on engineering properties of cement-stabilized soil. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2000, 22(5): 549-554. (en chinois)
- [167] Tang Yi-Xin, Miyazaki Y., Tsuchida T. Practices of reused dredgings by cement treatment. *Soils and Foundations*, 2001, 41(5): 129-143.
- [168] Tang C., Shi B., Gao W., Chen F., Cai Y. Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil. *Geotextiles and Geomembranes*, 2007, 25: 194-202.
- [169] Tashiro C., Takahashi M., Kanaya M., Hirakadi I., and Yoshida R. Hardening property of cement mortar adding heavy metal compounds and solubility of heavy metals from hardened mortar. *Cem.Concr.Res.*, 1977, 7:283-290.
- [170] Tran N.T. Valorisation de sédiments marins et fluviaux en technique routière. Thèse de doctorat, Ecole des mines de Douai, France, 2009.
- [171] Tremblay H. Amélioration mécanique et prédiction de la compressibilité des sols fins du Québec. Thèse de doctorat, Université Laval, Québec, Décembre 1998.
- [172] Türkel S. Strength properties of fly ash based controlled low strength materials. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 147: 1015-1019.
- [173] Ueno K., Yokoyama Y., Imaizumi S., Yagi H. Fundamental study on development of valuable reuses of ohya stone dust. *Proc.of the 2nd International Congress on Environmental Geotechnics*, Osaka, Japon, Vol. 2: 939-944, 1996.
- [174] Ulbricht J.P. Contaminated sediments: raw material for bricks. *Proceeding of the European conference on dredged sludge remediation, Stichting Klasse 4, Rotterdam*, 2002.
- [175] UNICEM. L'exploitation des granulats marins. N. Vuillier-UNICEM, novembre 2005.
- [176] UNPG. Union Nationale des Producteurs de Granulats- Le marché des granulats en 2004, 2005.
- [177] Uppal H.L., Chadda L.R. Physico-chemical changes in the lime stabilization of black cotton soils (India). *Engineering Geology*, 2(3), 1967, 179-189.
- [178] Vivian W.Y.Tam, C.M. Tam. A review on the viable technology for construction waste recycling. *Resources, Conservation and Recycling*, 2006, 47: 209-221.
- [179] Wang S., Vipulanandan C. Solidification/stabilisation of Cr (VI) with cement leachability and XRD analyses. *Cement and Concrete Research*, 2000, 30:385-389.
- [180] Wang Xuancang, Li Zhenxia, Xue hui. Study of sub-base performance of low liquid limit silt stabilized by lime and fly ash. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2007, 40(2): 88-91. (en chinois)
- [181] Windal T., Shahrour I. Oedomètre flexible pour l'étude du gonflement des sols. *XVème Congrès Français de Mécanique*, Nancy, 2001.
- [182] Wu Jianhua, Pu Xincheng, Liu Fang. Technology of mixing high property concrete with large dosage fly ash, *Journal of Chongqing University (Natural Science Edition)*, 2005, 28(5), 54-58. (en chinois)
- [183] Wu Qing. Evaluation on work performs and durability of high-blending fly ash concrete. *West-China Exploration Engineering*, 2005, 110(7), 182-184. (en chinois)
- [184] XP CEN ISO/TS 17892-1. Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols - Partie 1 : détermination de la teneur en eau. Août 2005.
- [185] XP CEN ISO/TS 17892-4. Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols - Partie 4 : détermination de la distribution granulométrique des particules. Août, 2005.
- [186] XP ISO/TS 21268-2. Qualité du sol: Modes opératoires de lixiviation en vue d'essais chimiques et éco toxicologiques ultérieurs des sols et matériaux du sol, partie 2: essai en bûchée avec un rapport liquide/solide de 10 l/kg de matière sèche. 2007.

- [187] XP P 94-090-1. Essai oedométrique: Partie 1: Essai de compressibilité sur matériaux fins quasi saturés avec chargement par paliers. Décembre 1997.
- [188] Xu G.R., Zou J.L., Li G.B. Solidification and leaching behaviours of Cr⁶⁺ in sludge ceramsite. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 153:1031-1035.
- [189] XP P 94-047. Soils: investigation and testing-Determination of the organic matter content-Ignition method. Association Française de Normalisation, 1998.
- [190] Yilmaz I., Civelekoglu B. Gypsum: An additive for stabilization of swelling clay soils. *Applied Clay Science* 44 (2009) 166-172.
- [191] Yousuf M., Mollah A., Rajan K.Vempati, T.-C.Lin, David L.Cocke. The interfacial chemistry of solidification/stabilization of metals in cement and pozzolanic material systems. *Waste Management*, 1995, Vol.15, No.2, p: 137-148.
- [192] Zentar R., Abriak N.E., Dubois V. Effects of salts and organic matter on Atterberg limits of dredged marine sediments. *Applied Clay Science*, 42: 391-397, 2009.
- [193] Zhang Y., Ding R., Miu L. Test study on strength of muchy cement-soil. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2004, 21(11): 27-29. (en chinois)
- [194] Zhang C.S. Study on the properties of deformation and consolidation of marine clay at Shenzhen Houhai Bay, PhDs thesis, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2005.
- [195] Zhang H.Q., Xie J., Zhu W., Huang Y. Z., Shi P. Present situation of dredged materials dumping and the study of transforming dredged mud into regenerative resources - difficulties of refuse dumping in China sears and countermeasures to deal with these problems. *Marine Science Bulletin*, 23 (6), 2004, 54-60.
- [196] Zhang Yize. Technical summary of Shiligou fly ash dam. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1988, 10(5): 128-131. (en chinois)
- [197] Zhang Zhongkun, Hou Xueyuan, Cao Zhengkang, Yin Zongze. Review on coal ash and EPS used as filler of road embankment. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2001, 20(4): 538-542. (en chinois)
- [198] Zheng Niannian, He Zhen, Sun Haiyan, Wang Kuan, Tong Mingde. Research on the foamed concrete with high volume fly ash. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2009, 31(7): 96-99. (en chinois)
- [199] Zhou Qian, Shi yan, Du Juan. Experiment on the road performance of low activity fly-ash. *Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)*, 2007, 23(6): 905-909. (en chinois)
- [200] Zhu Wei, Zhang Chun-lei, Gao Yu-feng and Fan Zhao-ping. Fundamental mechanical properties of solidified dredged marine sediment. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2005, Vol.39, No.10: 1561-1565. (en chinois)

Publications et Communications

Publications

DongXing WANG, Nor Edine ABRIAK, Rachid ZENTAR, WeiYa XU. *Solidification / stabilization of dredged marine sediments for road construction*. Environmental Technology. (In Press) DOI: 10.1080/09593330.2011.551840.

DongXing WANG, Rachid ZENTAR, Nor Edine ABRIAK, WeiYa XU. *Experimental investigation on consistency limits of cement and lime stabilized marine sediments*. Environmental Technology. (In Press) DOI: 10.1080/09593330.2011.633565.

DongXing WANG, Rachid ZENTAR, Nor Edine ABRIAK, WeiYa XU, Mahfoud BENZEROUR. *Co-valorisation of Dunkirk dredged sediments and siliceous-aluminous fly ash using lime*. Road Materials and Pavement Design. (Under Review)

Rachid ZENTAR, DongXing WANG, Nor Edine ABRIAK, Mahfoud BENZEROUR, Wenzhao CHEN. *Utilisation of siliceous-aluminous fly ash and cement for solidification of marine sediment*. Construction and Building Materials. (Under Review)

Communications

Dongxing Wang, Rachid Zentar, Nor Edine Abriak, Xu Weiya. *Experimental research of dredged marine sediment for the beneficial use as a new roadbed material*. 11ème Symposium International sur la gestion des sédiments, 11-13 Mai 2010, pp.1-8, Casablanca, Maroc.

Dongxing Wang, Rachid Zentar, Nor Edine Abriak, Xu Weiya. *Experimental Study on Physical and Mechanical Characteristics of Dredged Marine Sediment for Valorization in Road Engineering*. In Proceedings of the 3rd International Conference on Engineering for Waste and Biomass Valorisation, 17-19 May, Beijing, China 2010.

Dongxing Wang, Nor Edine Abriak, Rachid Zentar, Xu Weiya. *Caractérisation géotechnique en laboratoire de sédiments marins en vue de leur valorisation éventuelle*. Acte de «XIèmes Journées Nationales Génie Cotier–Génie Civil», 22-24 Juin, Sables d'Olonne, France 2010. pp.913-920. DOI:10.5150/jngcgc.2010.099-W.

Dongxing WANG, Nor Edine ABRIAK, Rachid ZENTAR, Hongxing WANG. *Reuse and recycle of dredged marine sediment as a new material resource in road construction*. 10-12 November, Larache, Maroco 2010, CD ROM.

Dongxing WANG, Nor Edine ABRIAK, Rachid ZENTAR, Weiya XU, Hongxing WANG. *Caractérisation physique, environnementale et mécanique des sédiments de dragage*. 10-12 Novembre, Larache, Maroc 2010, CD ROM.

Dongxing WANG, Rachid ZENTAR, Nor Edine ABRIAK, Weiya XU. *Experimental exploration of dredged marine sediment as new material resource for road engineering*. Proceeding of 14th ARC. The 14th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 23 - 27 May 2011, Hong Kong, China.

Dongxing WANG, Rachid ZENTAR, Nor Edine ABRIAK and Weiya XU. *Effect of fly ash and lime treatment on mechanical and swell properties of Dunkirk dredged sediments*. The 2011 International Conference on Civil Engineering, Architecture and Building Materials (CEABM2011). 18-20 June 2011, Haikou, China.

Dongxing WANG, Rachid ZENTAR, Nor Edine ABRIAK and Weiya XU. *Geotechnical properties of cement-based dredged marine sediments as a new pavement material*. GeoHunan International Conference II: Emerging Technologies for Design, Construction, Rehabilitation, and Inspections of Transportation Infrastructures (GeoHunan2011). June 9-11, 2011, Hunan, China.

Dongxing WANG, Rachid ZENTAR, Nor Edine ABRIAK. *Strength and swelling properties of solidified dredged materials*. 2011 International Conference on Civil Engineering and Building Materials (CEBM 2011). July 29-31, 2011, Kunming, China.

Dongxing WANG, Nor Edine ABRIAK, Rachid ZENTAR, Weiya XU. *Mineralogical and compaction properties of dredged marine sediments*. 2nd Coastal and Maritime Mediterranean Conference, Tangier, Morocco, 2011.

Dongxing WANG, Nor Edine ABRIAK, Rachid ZENTAR. *Durability analysis of fly ash/cement-solidified dredged materials*. 2nd Coastal and Maritime Mediterranean Conference, Tangier, Morocco, 2011.