

Thèse

Présentée par

Mohamed MIRAOU

Pour l'obtention du titre de

Docteur de l'Université des Sciences et Technologies de Lille 1

Spécialité : **Génie Civil**

Prétraitement et traitement des sédiments de dragage en vue d'une valorisation dans le génie civil

Directeur de thèse : Nor Edine ABRIAK

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

Soutenue publiquement le 06 décembre 2010, à Douai

JURY :

M. DAMIDOT Denis	Professeur, Mines de Douai	Président
M. ABRIAK Nor Edine	Professeur, Mines de Douai	Directeur de thèse
M. GAGNE Richard	Professeur, Université de Sherbrooke	Rapporteur
M. LEVACHER Daniel	Professeur, Université de Caen	Rapporteur
M. GARCIA DIAZ Eric	Professeur, Mines d'Ales	Examineur
M. LAFHAJ Zoubeir	Professeur, Ecole Centrale de Lille	Examineur
Mme T'KINT Michèle	Professeur, Université de Picardie	Examinatrice
M. ZENTAR Rachid	Enseignant – chercheur, Mines de Douai	Examineur



RÉSUMÉ

Les travaux de recherche s'intègrent dans une thématique globale du Département Génie Civil et Environnemental de l'Ecole des Mines de Douai relative à la valorisation de sous-produits et coproduits industriels dans le domaine du Génie Civil.

Les travaux de cette thèse se focalisent sur l'étude de deux matériaux : les sédiments fins, générés lors d'opérations de dragage et les laitiers d'aciérie, des coproduits de l'industrie métallurgiques.

Ce travail traite une démarche générale de prétraitements et de traitements de ces deux matériaux dans cinq chapitres.

Dans le premier chapitre, une étude bibliographique sur les sédiments et sur les laitiers a été réalisée. Dans cette partie, nous avons étudié la composition, la gestion actuelle et le cadre législatif défini pour la gestion des deux matériaux.

Dans le second chapitre, une caractérisation générale des matériaux utilisés a été entreprise. Cette première partie permettra d'appréhender le comportement mécanique, physico-chimique et le degré de pollution de ces deux matériaux. Dans cette partie, nous avons étudié les caractéristiques physiques, les performances mécaniques, la composition minéralogique et l'impact environnemental des sédiments de dragage et des laitiers d'aciérie.

Le troisième chapitre des travaux de la thèse s'intéresse aux sédiments de dragage. Dans ce chapitre, le processus de réduction de la teneur en eau initiale de deux sédiments a été exploré. Pour cela, nous avons défini un protocole expérimental pour l'optimisation du processus de séchage des sédiments de point de vue technique et économique. Dans cette partie, nous avons étudié le séchage des sédiments en fonction de plusieurs paramètres. Les paramètres sélectionnés sont : la teneur en eau initiale, le mode de séchage, la composition des sédiments et les conditions climatiques.

Le quatrième chapitre consiste à développer des formulations à base de sédiments de dragage et de laitiers d'aciérie. Tout d'abord, des traitements des sédiments fins de dragage au ciment et à la chaux ont été explorés. Cette partie nous permettra de comparer l'efficacité des différents traitements appliqués. Ensuite, des formulations à base de sédiments et de laitiers d'aciérie ont été réalisées. Dans ces formulations, nous avons défini les proportions dans un mélange optimal basé sur une compacité maximale. Dans cette partie, nous avons adapté le modèle d'empilement compressible aux matériaux utilisés. Puis nous avons étudié le comportement mécanique des formulations réalisées.

Enfin, dans le dernier chapitre, une tentative de dimensionnement d'une couche de chaussée à base des formulations réalisées a été mise en œuvre. Le dimensionnement a été réalisé conformément la *méthode française de dimensionnement des chaussées*. L'objectif de cette partie est d'étudier le potentiel de coproduits industriels pour une application en techniques routières en termes de contraintes et déformations admissibles.

Mots clés : valorisation, sédiments marins, laitiers d'aciérie, séchage, évaporation, drainage, comportement mécanique, technique routière.

ABSTRACT

This work is integrated in global thematic developed in Civil Engineering & Environmental Department of the Ecole des Mines de Douai. This thematic relate to the valorization of industrial co products to development an alternative solutions in terms of civil engineering materials.

The experimental study developed in this thesis consists to use two materials: dredged sediment and steel slag.

The manuscript content five chapters for discuss this approach to developed an experimental methodology to the valorization of these materials in road construction.

In the first chapter, a literature study of dredged sediments and steel slag has been realised. In this part, we studied composition, current management and actual legislation setting their management.

In the second chapter, the general characterization of used materials has been achieved. This part tends to understand the physical, mechanical and environmental behaviour of dredged sediment and steel slag.

The third chapter, the natural drying of two types of fine dredged sediments is discussed. In the following, the efficiency of the evaporation and/or drainage has been discussed. The object of this part is to observe the results in terms of water-content decrease by evaporation and drainage in terms to physical characteristics, composition and initial water content of the sediments.

The fourth chapter consists to develop a formulation of road materials of dredged sediments mixed to steel slag. Firstly, the treatment of the efficiency of sediment treatments with lime and cement are discussed. Then, a making of a road material with dredged sediment treated with steel slag is discussed. In this part we adapted of packing density model to sediments and steel slags.

The last chapter considers the design of base course composed of sediments and steel slags. The design is realised according to *méthode française de dimensionnements des chaussées*.

Keywords: Valorization, dredged sediment, drying, steel slag, evaporation, drainage, mechanical behaviour, road engineering.

REMERCIEMENTS

Je souhaite remercier ici tous ceux qui, par leur aide, leurs encouragements et leurs conseils, m'ont permis de réaliser cette thèse.

Je tiens à remercier, en premier lieu, les personnes qui m'ont suivi de près durant ces trois années de thèse. Tout d'abord, je souhaite citer mes deux responsables de thèse, M. Noredine ABRIAK, Professeur à l'Ecole des Mines de Douai et M. Rachid ZENTAR, Enseignant-Chercheur, qui ont toujours su se rendre disponibles et ont tout mis en œuvre pour que ce travail puisse se réaliser dans les meilleures conditions. Leur soutien assidu et permanent m'a permis de donner le meilleur de moi-même au cours de ces années de thèse.

Je remercie également M. Denis DAMIDOT, Chef du Département Génie Civil et Environnemental de l'Ecole des Mines de Douai pour son accueil durant les trois années de ma thèse au sein du laboratoire et pour sa participation au jury

Mes remerciements vont également à tous mes collègues du Laboratoire du département Génie Civil et Environnemental de l'Ecole des Mines de Douai, qui ont participé de près ou de loin au bon déroulement de ce travail. Ils ont, tous, contribué, directement ou indirectement, à mon travail, en apportant aides, conseils et bonne humeur. Parmi ceux-ci, je remercie particulièrement les enseignants chercheurs, les techniciens Guillaume, Christophe, Michaël, Johanna et Dominique qui m'ont assisté dans la plupart des montages et essais expérimentaux que j'ai été amené à utiliser. Merci à Carole, secrétaire au département, pour m'avoir aidé à relire la thèse. Je remercie également tous les thésards du laboratoire et notamment Caroline, Nathalie, Nassim, Mohamad, Thomas et Abdeljalil pour leur amitié et les nombreuses conversations stimulantes que nous avons eues sur nos sujets de thèse respectifs et sur les moments sympathiques que nous avons partagé tout au long de la thèse.

Je tiens à remercier également MM. Daniel LEVACHER et Richard GAGNE pour avoir accepté d'être les rapporteurs de ce travail. Leurs commentaires, leurs critiques et leurs questions sont autant d'encouragements à poursuivre ce travail. Je remercie également Mme T'KINT Michèle, MM. Eric GARCIA DIAZ, Zoubeir LAFHAJ, d'avoir fait l'honneur d'examiner ma thèse.

Je remercie toute ma famille, ma maman, mes sœurs et ma compagne, qui m'ont soutenu et ont toujours cru à ma réussite.

Merci à tous

TABLES DES MATIÈRES

Résumé	3
Abstract	5
Liste des tableaux	13
Liste des figures	15
Liste des abréviations.....	19
Liste des Symboles.....	21
Glossaire.....	23
Introduction Générale.....	25
Chapitre 1 Les sédiments de dragage, les laitiers et les modes de gestion.....	29
1.1 Les sédiments de dragage :	29
1.1.1 Introduction	29
1.1.2 Les sédiments marins	30
1.1.3 Les sédiments fluviaux.....	30
1.1.4 Type de dragage	31
1.1.4.1 Dragage d’entretien	31
1.1.4.2 Dragage d’approfondissement.....	32
1.1.4.3 Dragage d’aménagement de nouvelles aires portuaires	32
1.1.5 Constituants des sédiments de dragage	32
1.1.5.1 Eau interstitielle.....	33
1.1.5.2 Phase minérale.....	33
1.1.5.3 Phase organique.....	33
1.1.6 La réglementation relative au dragage et aux matériaux dragués	34
1.1.6.1 Dispositions internationales	34
1.1.6.2 Réglementation française	35
1.1.6.3 Dispositions d’autres pays européens et du Canada.....	37
1.1.7 Prétraitements des sédiments	39
1.1.7.1 Procédés mécaniques de séchage	40
1.1.7.2 Procédés physico-chimiques de déshydratation	43
1.1.8 Valorisation des sédiments marins en technique routière	46
1.1.8.1 Classification des matériaux et exigences de leur emploi en remblai	46
1.1.8.2 Traitements préalables des sédiments	49
1.1.9 Valorisation dans le secteur de la briqueterie.....	53
1.1.10 Fabrication de clinker à base des sédiments.....	54
1.1.11 Valorisation dans le secteur de fabrication des granulats.....	56
1.1.12 Valorisation dans le secteur de la fabrication du béton.....	56
1.1.13 Conclusion.....	57
1.2 Les laitiers d’aciérie	59
1.2.1 Classement selon la source des laitiers	59
1.2.1.1 Laitier de haut fourneau HF	59
1.2.1.2 Laitier d’aciérie LD.....	60
1.2.1.3 Le laitier électrique.....	61
1.2.2 Composition des laitiers :	61
1.2.2.1 Composition minéralogique	61

1.2.2.2	Caractéristiques physiques	62
1.2.3	Statut réglementaire.....	62
1.2.4	Domaine d'utilisation	63
1.2.4.1	Utilisation des laitiers en techniques routière	63
1.3	Conclusions	64
Chapitre 2	Caractérisation des matériaux utilisés	69
2.1	Caractérisation des sédiments de dragage	69
2.1.1	Caractéristiques physiques	70
2.1.1.1	Teneur en eau des sédiments bruts	70
2.1.1.2	Etude quantitative de la matière organique	71
2.1.1.3	Teneur en carbone total	74
2.1.1.4	Analyses granulométriques	75
2.1.1.5	Argilosité.....	79
2.1.1.6	Masse volumique des grains solides	80
2.1.1.7	Limites d'Atterberg	81
2.1.1.8	Comparaison des caractéristiques physiques avec des valeurs mesurées dans des études antérieures.....	84
2.1.1.9	Résistance au cisaillement.....	85
2.1.2	Caractérisation de portance et de compactage	87
2.1.2.1	Essai Proctor.....	87
2.1.2.2	Indice Portant Immédiat (IPI)	87
2.1.3	Caractérisation minéralogique.....	88
2.1.3.1	Analyses par spectrométrie de fluorescence X.....	90
2.1.3.2	Analyse par diffraction des rayons X.....	92
2.1.3.3	Analyse semi quantitative, Combinaison des DRX à la fluorescence X.....	93
2.1.4	Potentiel de pollution	94
2.2	Caractérisation des laitiers	96
2.2.1	Caractérisation physique	97
2.2.1.1	Distribution granulométrique	97
2.2.1.2	Teneur en eau	98
2.2.1.3	Masse volumique apparente et porosité des granulats	98
2.2.1.4	Masse volumique absolue	99
2.2.2	Caractérisation chimique.....	99
2.2.2.1	Dosage de la chaux.....	99
2.2.2.2	Caractérisation minéralogique.....	99
2.2.3	Comportement mécaniques des laitiers utilisés	101
2.2.3.1	Essai Proctor.....	101
2.2.3.2	Indice portant immédiat	102
2.2.4	Potentiel de pollution	103
2.3	Conclusion.....	104
Chapitre 3	Prétraitement et séchage des sédiments de dragage	107
3.1	Introduction	107
3.2	Essais réalisés.....	108
3.2.1	Dispositif et programme expérimental	108
3.2.2	Conditions de mesures	109
3.3	Exploitation des résultats.....	109

3.3.1	Evaporation	110
3.3.2	Séchage par drainage.....	116
3.3.3	Combinaison de l'évaporation et du drainage.....	119
3.3.4	Effet du traitement à la chaux.....	123
3.3.4.1	Effet du traitement à la chaux sur l'évaporation	124
3.3.4.2	Effet du traitement à la chaux sur le processus du drainage	124
3.3.4.3	Effet du traitement à la chaux sur le séchage par drainage et par évaporation 125	
3.4	Suivi environnemental	128
3.4.1	Polluants totaux	128
3.4.2	Potentiel Electrochimique	130
3.4.3	Evolution des sels dans les sédiments	130
3.5	Conclusion.....	131
Chapitre 4	Un matériau routier à base de sédiments de dragage et de laitiers d'aciérie 135	
4.1	Introduction	135
4.2	Sélection des matériaux	136
4.2.1	Traitements aux liants	137
4.2.2	Mélanges granulaires.....	141
4.2.2.1	Correcteurs granulométriques	141
4.2.2.2	Formulations à base de la compacité des mélanges	143
4.3	Comportement mécanique des mélanges	150
4.3.1	Comportement Proctor-IPI.....	151
4.3.2	Résistance à la compression.....	152
4.3.3	Résistance à la traction.....	153
4.3.4	Classification selon les performances mécaniques	154
4.3.5	Evaluation du potentiel d'expansion des formulations	155
4.3.6	Analyse de la composition de la matrice des mélanges étudiés.....	156
4.4	Conclusion.....	158
Chapitre 5	Dimensionnement d'une assise de chaussée à base de sédiments et de laitiers 161	
5.1	Introduction	161
5.2	Modèles de dimensionnement d'une structure de chaussée.....	161
5.2.1	Modèle mono couche de Boussinesq	162
5.2.2	Modèle de Hogg	164
5.2.3	Modèle de Westergaard (1926).....	166
5.2.4	Les modèles Multicouches (Burminster, 1943)	167
5.3	Méthode française de dimensionnement de la chaussée	168
5.3.1	Catégorie de voie.....	169
5.3.2	Classes de trafics	170
5.3.3	Paramètres de base du calcul.....	170
5.3.4	Données climatiques et d'environnement	170
5.3.5	Paramètres descriptifs des matériaux	171
5.4	Application de la méthode française pour le dimensionnement d'une structure de chaussée.....	174

5.5	Coût de réalisation	176
5.6	Conclusion.....	177
	Conclusions Générales et Perspectives	179
	Références bibliographiques	185
	Normes utilisées	189
	Liste des publications des travaux de recherche sur le sujet de thèse	191
	Annexes	193

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Valeurs guides des niveaux 1 et 2 pour les métaux (mg/kg de MS) retenues par la France	36
Tableau 1.2: Valeurs guides des niveaux 1 et 2 pour les congénères de polychlorobiphényles (mg/kg de MS) en France	36
Tableau 1.3: Teneurs limites admissibles dans les boues de stations d'épuration avant épandage	37
Tableau 1.4: Seuils de référence en Wallonie (Belgique) en mg/kg de MS	38
Tableau 1.5: Valeurs seuils des métaux au Pays Bas en mg/kg de MS	38
Tableau 1.6: Seuils de référence pour l'Allemagne en mg/kg de Ms	39
Tableau 1.7: Critères retenus pour l'évaluation de la qualité des sédiments au Canada en mg/kg de MS	39
Tableau 1.8 : Teneurs en matières organiques de quelques sédiments de dragage	48
Tableau 1.9 : Classes de matériaux selon la classification USCS	48
Tableau 1.10 : Sous classes de matériaux selon la classification USCS	48
Tableau 1.11: Système de classification unifié des sols USCS (réglementation USCS)	49
Tableau 1.12: Composition minéralogique moyenne typique d'un clinker de ciment Portland, [Ollivier, Vichot, 2008]	50
Tableau 1.13: Outils de décision pour la valorisation des sédiments	57
Tableau 1.14: Composition des laitiers	62
Tableau 1.15 : Propriétés physiques et mécaniques des laitiers	64
Tableau 2.1: Mesure de la teneur en eau des sédiments S1 et S2 (Etuvage à 40°C)	70
Tableau 2.2: Mesure de la teneur en eau des sédiments S1 et S2 (Etuvage à 105°C)	70
Tableau 2.3 Teneurs en eau initiales de sédiments dans des ports à fortes activités en France	71
Tableau 2.4: Perte au feu des sédiments bruts calcinés à 450°C et 550°	71
Tableau 2.5: Comparaison des résultats de calcination et d'ATG du sédiment S1	73
Tableau 2.6: Quantité de Matière organique par oxydée à l'eau oxygénée du sédiment S1	74
Tableau 2.7: Variation du CO en fonction de la température	74
Tableau 2.8: Granulométrie des sédiments par tamisage	76
Tableau 2.9: Distribution granulométrique: granulomètre laser	77
Tableau 2.10: Données relatives à d ₅₀ pour les sédiments du Nord	78
Tableau 2.11: Valeurs VBS mesurées sur les sédiments S1 et S2	79
Tableau 2.12: Masse volumique absolue des sédiments S1 et S2	81
Tableau 2.13: Limites de plasticité pour les sédiments S1 et S2	82
Tableau 2.14: Etat de plasticité des sédiments	83
Tableau 2.15: Etude comparative des caractéristiques physiques sur des sédiments de Dunkerque	84
Tableau 2.16 : Comparaison des résultats de compactage de différentes études sur les sédiments du port de Dunkerque	88
Tableau 2.17: Composition élémentaire des sédiments	92
Tableau 2.18: Analyse semi quantitative	94
Tableau 2.19 : Résultats des analyses au micro onde	95
Tableau 2.20: Dosages en polluants sur éluats sur le sédiments S1	95
Tableau 2.21: Dosages en polluants sur solide dans le sédiment S1	96
Tableau 2.22: Caractéristiques granulométriques des laitiers	97
Tableau 2.23: Teneur en eau des laitiers utilisés	98
Tableau 2.24: Paramètres de porosité des laitiers	98
Tableau 2.25: Masse volumique absolue	99
Tableau 2.26: Proportion de la chaux CaO dans les deux laitiers	99

Tableau 2.27 : Composition élémentaire des laitiers étudiés	100
Tableau 2.28 : Caractérisation environnementale des laitiers d'aciérie	103
Tableau 3.1 : Programme expérimental de l'étude du séchage par drainage et par évaporation.	109
Tableau 3.2: Paramètres du modèle de Penman (1948)	111
Tableau 3.3 : Evaluation de la variation de la teneur en eau en fonction du temps du drainage	117
Tableau 3.4 : Pente de la courbe durant la phase A et la phase B durant le séchage par évaporation et drainage (g/jour).	120
Tableau 3.5 : Notations des échantillons	123
Tableau 3.6: Apport thermique du traitement à la chaux	128
Tableau 3.7: Variation de la teneur en eau par apport thermique	128
Tableau 3.8 : Résultats des analyses après attaque acide	129
Tableau 3.9: Suivi environnemental des métaux dans le sédiment S1	129
Tableau 3.10 : Taux d'extraction des métaux durant le séchage par évaporation et par drainage (en %)	130
Tableau 3.11: Potentiel électrochimique en fonction du séchage des sédiments	130
Tableau 3.12 : Evolution de la quantité des sels durant le séchage	131
Tableau 4.1 : Composition chimique du ciment CEM I 42,5	138
Tableau 4.2 : Proportions de chaux et de ciments utilisées pour la stabilisation des sédiments de dragage.	138
Tableau 4.3 : Récapitulatif des résultats du comportement au compactage des formulations	140
Tableau 4.4 : Indices des vides mesurés sur des mélanges binaires	145
Tableau 4.5 : Indices de l'interaction déduite de mélanges binaires	146
Tableau 4.6 : Valeurs de K proposées pour différents procédés de remplissage	148
Tableau 4.7 : Constituants des mélanges des formulations réalisées	150
Tableau 4.8 : Résultats Proctor-IPI sur les formulations proposées	152
Tableau 4.9 : Comportement des formulations en traction et en modules de déformation à 90jours et à 360jours	154
Tableau 5.1 : Classe du trafic en France	170
Tableau 5.2 : Caractéristiques mécaniques des matériaux utilisés estimées à partir de la méthode de dimensionnement	174
Tableau 5.3 : Caractéristiques de la chaussée contenant une couche à base de sédiment et de laitier	175
Tableau 5.4 : Comparaison du coût de réalisation d'une couche d'assise à base de la formulation F1 avec une couche d'assise standard	176

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1: Données relatives aux matériaux dragués en France 1994-1996 ($\times 10^3 \text{m}^3$).	29
Figure 1.2: Accumulation des sédiments fluviaux	31
Figure 1.3: Classement granulaire d'un sol	32
Figure 1.4 : Répartition de la matière organique contenue dans les sédiments	34
Figure 1.5: Courbe de filtration	41
Figure 1.6: Exemple d'un filtre-presse	42
Figure 1.7: Schéma de fonctionnement d'un filtre à bandes presseuses	42
Figure 1.8: Principe de fonctionnement général d'une centrifugeuse	43
Figure 1.9: Classification des matériaux	47
Figure 1.10 : Evolution du pH en fonction de la quantité de chaux	50
Figure 1.11 : Etapes du modèle d'empilement compressible	51
Figure 1.12 : Chaîne de production de briques avec substitution de sédiments de dragage à 35%	54
Figure 1.13: Pourcentage de l'alite dans du clinker à base de sédiment de dragage	55
Figure 1.14: Diagramme binaire Cao-SiO ₂ des phases	55
Figure 1.15: Sources des granulats en millions de tonnes en 2007	56
Figure 1.16: Classification des types de laitiers	59
Figure 1.17: Schéma descriptif d'un haut fourneau	60
Figure 1.18: Elaboration de l'acier liquide par la filière convertisseurs à oxygène	61
Figure 1.19 : Diagramme ternaire CaO - SiO ₂ et Al ₂ O ₃	62
Figure 1.20: Expansion à la vapeur d'un laitier	64
Figure 2.1: Zone du prélèvement Port Autonome de Dunkerque	69
Figure 2.2: Récapitulatif des pertes au feu pendant 2 heures à 450 et 550°C	72
Figure 2.3: Analyse thermogravimétrique du sédiment S1	73
Figure 2.4: Evolution du % de carbone total en fonction de la température	75
Figure 2.5: Courbes granulométriques des sédiments étudiés	77
Figure 2.6: Distribution granulométrique par sédimentométrie et par laser du sédiment S1	79
Figure 2.7: Mesure de la masse volumique absolue.	80
Figure 2.8: Limite de liquidité des sédiments S1 et S2	82
Figure 2.9: Relations $I_p - w_L$ dans l'abaque de Casagrande	83
Figure 2.10 : Classement des sédiments S1 et S2	85
Figure 2.11 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de w (%)	85
Figure 2.12: Mesure de la pénétration dans les deux sédiments	86
Figure 2.13 : Essai Proctor modifié des sédiments bruts	87
Figure 2.14 : Indice portant immédiat des sédiments bruts	88
Figure 2.15: Traitement thermique des sédiments	89
Figure 2.16 : Perte de masse dans le sédiment S1	90
Figure 2.17 : Evolution de la composition élémentaire d'un sédiment traité	91
Figure 2.18: Evolution des phases du sédiment pendant le traitement thermique	93
Figure 2.19: Distributions granulométriques des laitiers d'aciérie	97
Figure 2.20 : Comparaison de la composition des laitiers étudiés	100
Figure 2.21: Spectres des laitiers LD1 & LD2 issus de DRX	101
Figure 2.22: Courbes Proctor des laitiers utilisés	102
Figure 2.23 : Indice portant immédiat des laitiers étudiés	102
Figure 3.1: Protocole expérimental	108
Figure 3.2 : Evolution de la température et de l'humidité relative, pendant l'essai	109
Figure 3.3: Comparaison entre des modèles de prédiction et l'évaporation mesurée	110

Figure 3.4: Comparaison entre l'évaporation de l'eau dans les sédiments bruts et de l'eau de mer seule	112
Figure 3.5: Evolution de la teneur en eau en fonction du temps par évaporation	113
Figure 3.6 : Variation de la masse des échantillons du sédiment S1 durant le séchage par évaporation	114
Figure 3.7: Evolution de la teneur en eau en fonction du temps par évaporation pour S1 et S2	115
Figure 3.8 : Variation de la masse des échantillons des sédiments S1 et S2 durant le séchage par évaporation	116
Figure 3.9 : Evolution de la teneur en eau en fonction du temps du drainage du sédiment S1	117
Figure 3.10 : Variation de la masse des échantillons de sédiments S1 durant le séchage par drainage	118
Figure 3.11: Evolution de la teneur en eau en fonction du temps par drainage pour S1 et S2	119
Figure 3.12 : Variation de la masse des échantillons de sédiments S1 durant le séchage par évaporation et par drainage	120
Figure 3.13 : Variation de la masse des échantillons de sédiments S1 durant le séchage par évaporation et par drainage	121
Figure 3.14: Evolution de la teneur en eau en fonction du temps par drainage et évaporation pour S1 et S2- Diamètre 110mm	121
Figure 3.15: Comparaison entre l'évaporation et le drainage pour S1 et S 2	122
Figure 3.16: Potentiel du séchage des deux sédiments S1 & S2	123
Figure 3.17 : Effet de la chaux sur le séchage par évaporation	124
Figure 3.18: Effet de la chaux sur le séchage par drainage	125
Figure 3.19: Effet de la chaux sur le séchage par drainage et par évaporation- diamètre 110 mm.	126
Figure 3.20 : Variation moyenne de masse durant le séchage des sédiments B, C3 et C6.	126
Figure 3.21 : Variation moyenne de masse durant le séchage des sédiments B, C3 et C6.	127
Figure 4.1: Démarche de valorisation suivie	136
Figure 4.2 : Courbe granulométrique de la chaux utilisée.	137
Figure 4.3 : Comportement des formulations traitées au compactage- Essai Proctor	139
Figure 4.4 : Comportement des formulations traitées au compactage-IPi	140
Figure 4.5 : Distribution granulométrique des sables utilisés	141
Figure 4.6 : Formulation à base du fuseau granulométrique	142
Figure 4.7 : Dispositif expérimental pour les matériaux fins [Tran, 2009]	143
Figure 4.8 : Dispositif expérimental pour les gros granulats.	144
Figure 4.9 : Valeurs expérimentales exprimant la relation entre l'indice des vides et la proportion de grains fins	146
Figure 4.10 : Compacité du mélange M1 des sédiments de dragage et sables du Boulonnais	147
Figure 4.11 : Compacité du mélange M2 des sédiments de dragage et sable dragage	148
Figure 4.12 : Classes granulométriques des laitiers	149
Figure 4.13: Mélange de sédiments et de laitiers LD1	150
Figure 4.14: Mélange de sédiments et de laitiers LD2	150
Figure 4.15: Courbes Proctor modifié des formulations proposées de sédiments et laitiers d'aciéries	151
Figure 4.16 : Indice Portant Immédiat des formulations	152
Figure 4.17 : Evolution de la résistance en compression des formulations réalisées	153
Figure 4.18 : Illustration de l'essai de traction par compression diamétrale	154

Figure 4.19: Classification des formulations étudiées	155
Figure 4.20 : Evaluation du gonflement des formulations F1 et F2.	156
Figure 4.21 : Composition des formulations étudiées	157
Figure 4.22 : Analyse minéralogique des formulations étudiées	157
Figure 5.1 : Fonctionnement d'une structure de chaussée souple sous une charge roulante	162
Figure 5.2 : Diffusion des pressions dans un massif de Boussinesq.	163
Figure 5.3 : Evolution de la contrainte admissible dans le massif de Boussinesq	164
Figure 5.4 : Modèle de Hogg	165
Figure 5.5 : Modèle de Westergaard	166
Figure 5.6 : Schéma du modèle de Burminster	167
Figure 5.7 : Synoptique de la démarche de détermination d'une structure de chaussée	169
Figure 5.8 : Démarche générale du dimensionnement mécanique selon ALIZE.	173
Figure 5.9 : Profil en travers de la chaussée	176



LISTE DES ABRÉVIATIONS

- AGW : l'Arrêté du Gouvernement Wallon (Belgique)
- ATG : Analyse thermogravimétrique
- BOF : Basic Oxygene Furnaste
- BTP : Bâtiment et travaux publics
- CET : Catalogue européen des déchets
- CO : Carbone organique
- COT : Carbone organique total
- DRX : Diffraction de Rayons X
- FX : Florescence X
- GEODE : Groupe d'Études et d'Observation sur le Dragage et l'Environnement
- GTR : Guide des Terrassements Routiers
- IPI : Indice Portant Immédiat
- JOCE : Journal Officiel des Communautés Européennes
- LHF : Laitier de haut fourneau
- MEC : Modèle d'Empilement Compressible
- MS : Matière sèche
- OSPAR : Convention d'OSlo et de PARis
- PAD : Port Autonome de Dunkerque
- SETRA : Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes
- TBT : Tributylétain
- VNF : Voies Navigables de France

LISTE DES SYMBOLES

Al : Aluminium

As : Arsenic

Ba : Baryum

C₃A : Aluminat tricalcique (3 CaO Al₂O₃)

C₂S : Silicate bicalcique (2 CaO SiO₂)

C₃S : Silicate tricalcique (3 CaO SiO₂)

C₄AF : Aluminoferrite tétracalcique (4 CaO Al₂O₃ Fe₂O₃)

C : Carbone

Ca : Calcium

CaO : Chaux vive

Ca(OH)₂ : Chaux hydratée

Cd : Cadmium

Cl : Chlore

Cr : Chrome

Cr VI : Chrome VI

Cu : Cuivre

Fe : Fer

Hg : Mercure

Indice CH₂ : Hydrocarbures

K : Potassium

K₂SO₄ : Sulfate de potassium

Mg : Magnésium

Mn : Manganèse

Mo : Molybdène

Na : Sodium

Na₂SO₄ : Sulfate de sodium

Ni : Nickel

O : Oxygène

P : Phosphore

Pb : Plomb

S : Soufre

Sb : Antimoine

Se : Selenium

Si : Silicium

Ti : Titane

Zn : Zinc

Zr : Zirconium

V : Vanadium

GLOSSAIRE

Analyse : une technique consistant à l'exploration de plusieurs paramètres d'un matériau.

Boue : un mélange d'eau et de particules sédimentaires fines de limons et d'argiles.

Compacité : le taux d'occupation des grains d'un matériau dans un moule.

Co-produit : un produit inévitable et crée au même moment que le produit fini.

Déchets : une substance générée lors d'un processus de transformation.

Dragage : une opération qui consiste à enlever des sédiments au fond de la mer.

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

Échantillon : une petite quantité d'un matériau.

Évaporation : une transition progressive de l'état liquide à l'état gazeux.

Filtre : un système permet de séparer les particules du sol de l'eau lors du drainage.

Formulation : un technique expérimentale permettant la confection d'un matériau continu.

Potentiel d'évaporation : le rapport du volume évaporé sur la surface d'exposition estimée.

Prétraitement : une phase de préparation d'un matériau au traitement.

Protocole expérimental : application de la même expérience à plusieurs matériaux.

Séchage : un procédé de séparation solide-liquide.

Sédiment : un matériau issu de l'érosion, transporté et déposé dans le fond des voies navigables, des chenaux et des zones portuaires.

Sous-produit : un produit qui apparaît durant la confection ou la transformation d'un produit fini.

Traitement : protocole expérimental afin de comprendre un effet ou changer un comportement d'un matériau.

Valorisation : un processus visant à améliorer la valeur d'un produit ou d'un sous-produit.

Vase : un mélange de matières organiques et de terre qui forme un dépôt au fond de l'eau.

Résidu : un sous-produit issu d'une transformation d'un produit ou un matériau.

Laitier d'aciérie : sous-produit d'industrie métallurgique.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La société est de plus en plus industrielle, le taux de production est de plus en plus croissant. Cette croissance de consommation augmente naturellement la production de déchets. En France, la production de déchets était de l'ordre de 849 millions de tonnes en 2004 [ADEME].

La préservation de l'environnement est l'une des grandes préoccupations contemporaines. Un élément clé de cet engagement en termes d'environnement et de développement durable concerne la gestion et la valorisation des déchets et le recyclage.

Les déchets produits peuvent avoir d'importants impacts sur l'environnement. Leur gestion globale, leur élimination ou leur utilisation font l'objet de réglementations de plus en plus sévères. Ceci a amené les industriels à chercher des solutions durables pour gérer les déchets générés chaque année.

L'exploitation des ports et des voies navigables est une industrie en développement croissant avec son intérêt économique et environnemental. Le transport maritime des échanges mondiaux a atteint 8 milliards de tonnes en 2007 [CNUCED, 2007]. L'augmentation du trafic dans les ports et dans les voies navigables nécessite des opérations permanentes de dragage et ceci génère des quantités importantes de sédiments à gérer.

La gestion des sédiments de dragage constitue aujourd'hui un enjeu majeur en raison des quantités produites et des effets nuisibles qui leur sont reprochés. En France, la quantité de sédiments dragués est de l'ordre de 50 millions de tonnes par an en France [Alzieu 1999]. Les sédiments sont généralement des matériaux fins riches en minéraux. Leur exploitation pourrait être une alternative à l'utilisation de plusieurs matériaux naturels dans divers domaines en génie civil. Toutefois, ils sont généralement dragués sous forme de vase et comportent des taux de matière organique élevés (10%) [Alzieu 1999]. Ils peuvent également contenir des polluants ce qui peut limiter leur utilisation comme la présence de sels ou de métaux lourds [Marot, 1997, Kribi, 2005].

Les sédiments pourraient être utilisés dans différents secteurs du domaine de génie civil. De la cimenterie à la briqueterie, du bloc du béton au domaine routier. Néanmoins, la filière routière consomme des quantités plus importantes de matériaux chaque année. La valorisation des sédiments en technique routière représente, par conséquent, une opportunité intéressante de point de vue économique et technique. L'abondance des sédiments et l'intérêt à mettre en place un exutoire pour ces quantités importantes présentent un matériau à faible valeur économique pour les travaux en génie civil.

Le travail de cette thèse s'intègre dans le cadre de la thématique globale du département génie civil et environnemental de l'Ecole des Mines de Douai, relative à la valorisation de sous-produits et coproduits industriels dans le domaine du Génie Civil. Les travaux concernent les prétraitements des sédiments de dragage et leur association avec différents matériaux en vue de valorisation en technique routière. Cette étude s'intéresse à l'élaboration d'une démarche globale pour une meilleure gestion de la valorisation des sédiments de dragage.

Pour un emploi en technique routière, les sédiments doivent répondre obligatoirement aux exigences mécaniques. Il est également indispensable que l'environnement soit préservé tout au long de la durée de vie de l'ouvrage. Le suivi environnemental permet de contrôler le potentiel de largage des polluants de la structure dans des différentes conditions climatiques (pluies, neige, température,). Il est ainsi indispensable de cerner les aspects physico-chimiques et mécaniques du comportement du matériau.

Dans la première partie de cette thèse, la problématique de la gestion des sédiments de dragage a été globalement abordée. Dans cette partie nous avons insisté sur la composition, les gisements, le cadre législatif et les modes d'élimination actuels des sédiments.

Dans la deuxième partie de cette thèse, les sédiments et les matériaux utilisés ont été caractérisés largement. La caractérisation initiale des sédiments et des autres matériaux a permis d'établir des fiches d'identification, à partir desquelles sont déterminés les problèmes à traiter lors des traitements des sédiments de dragage et de la valorisation.

Parmi les prétraitements envisagés, l'opération de séchage a été jugée un aspect important de l'étude. Ainsi, dans la troisième partie, la diminution de la teneur en eau initiale par drainage et évaporation a été explorée. A cet effet des dispositifs expérimentaux et une méthodologie ont été élaborés. Ce travail a permis d'explorer clairement l'efficacité du séchage par drainage et de celui par évaporation.

Dans la quatrième partie, les sédiments sont traités de sorte à convenir au domaine de valorisation envisagé. Dans cette partie l'évolution de la texture de la matrice sédimentaire en fonction des traitements à l'échelle macroscopique et microscopique sera étudiée. Des traitements aux liants hydrauliques et aux correcteurs granulométriques sont explorés. Les correcteurs granulométriques utilisés dans cette étude sont des laitiers d'aciérie. Ces matériaux contiennent particulièrement un pourcentage de chaux. Ceci permet d'optimiser le traitement des sédiments aux liants.

La dernière partie du mémoire est consacrée au dimensionnement d'une couche de chaussée par la méthode française de dimensionnement des chaussées. Dans le corps de la chaussée ainsi modélisée, la couche d'assise est constituée de matériaux formulés à partir de l'étude réalisée dans le présent travail. Ce travail permet d'avoir une première appréciation des aspects technico-économiques de l'étude.

CHAPITRE 1

LES SÉDIMENTS DE DRAGAGE, LES LAITIERS ET LES MODES DE GESTION



Chapitre 1 Les sédiments de dragage, les laitiers et les modes de gestion

1.1. Les sédiments de dragage :

1.1.1. Introduction

Le sédiment est un matériau issu de l'érosion, transporté et déposé par les cours d'eau, et n'ayant pas encore subi de transformation diagénétique [Ramade, 2001]

Un sédiment se caractérise essentiellement [Duchaufour, 1983] par :

- Sa granulométrie,
- Sa composition minérale,
- Sa teneur en eau et en matière organique.

L'accumulation des sédiments dans les ports et les cours d'eau peut gêner les activités de navigation. Des opérations de dragage de façon périodique sont ainsi indispensables.

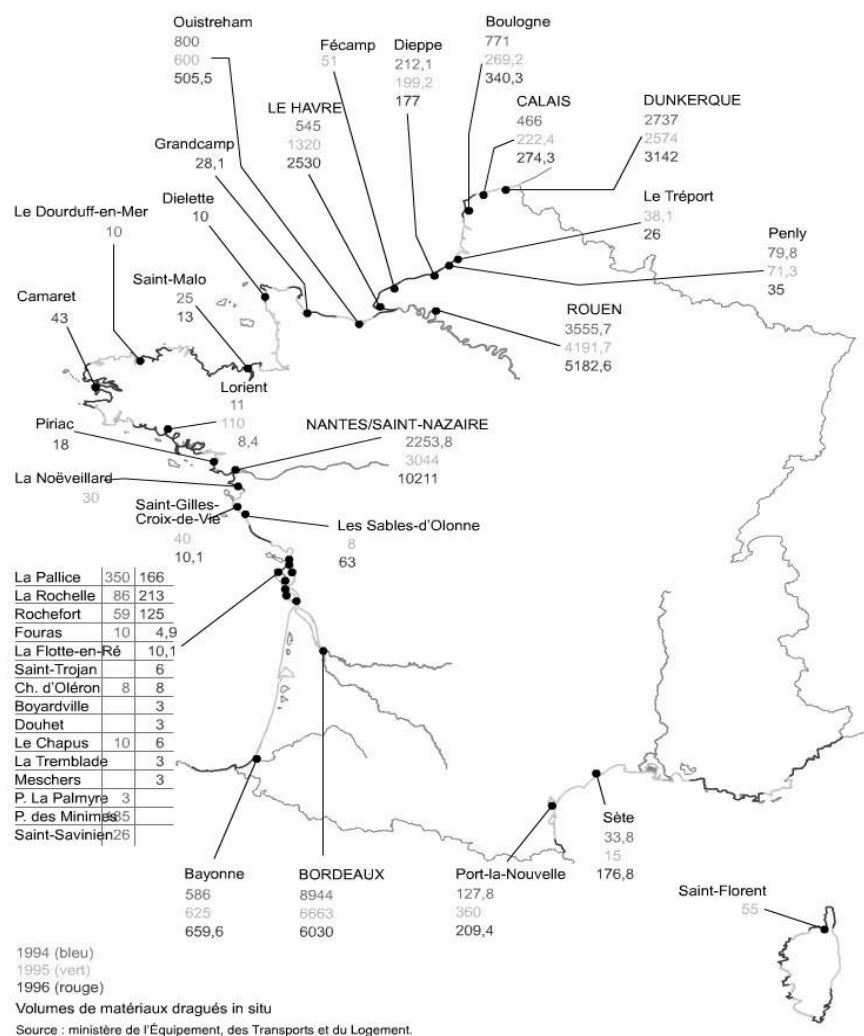


Figure 1.1: Données relatives aux matériaux dragués en France 1994-1996 ($\times 10^3 m^3$).
(Source Ifremer)

Les sédiments contenant des quantités variables de polluants sont considérés comme déchets [CED, 2008]. Ils sont soumis à un cadre législatif plus ou moins sévère (arrêté du 14 juin 2000, Convention OSPAR 1978, arrêté du 4 juillet 2008...) qui permet de statuer sur leur devenir (Rejet en mer, stockage à terre, traitement, ...).

Selon leur lieu de récupération, on peut distinguer les sédiments: les sédiments marins et les sédiments fluviaux (lac, fleuve, rivière,...) [AEAP, 2005,].

1.1.2. Les sédiments marins

L'activité portuaire est très développée en France. En effet, le littoral français métropolitain, baigné par la mer du Nord, l'océan Atlantique et la Méditerranée, offre près de 5500 km de côtes. Sur cette étendue, des activités très diversifiées se côtoient. De l'industrie au transport, de la pêche à la plaisance et au tourisme, un secteur important, qui offre 27% des revenus touristiques annuels.

En France, plus de 50 millions de mètres cubes de sédiments marins sont dragués chaque année [Alzieu, 1999]. Les volumes les plus importants de matériaux déplacés le sont au sein des grands ports (cf. Figure 1.1). Les trois principaux ports d'estuaires (Rouen, Nantes, St-Nazaire et Bordeaux) font état d'un volume annuel d'environ 25 millions de mètres cubes, dont 6,5 millions de mètres cubes de sables, 9.3 millions de mètres cubes de vases clapées (c'est-à-dire que les sédiments compacts sont largués par l'ouverture de fond des chalands porteurs) dans les zones d'immersion et une quantité équivalente rejetée en surverse. Les cinq grands ports maritimes, Dunkerque, Calais, Boulogne, le Havre et la Rochelle, génèrent un volume moyen annuel de 25 millions de mètres cubes, composés par environ 20% de sable et 80% de vase [IFREMER, 1996]. A ceux ci s'ajoutent les dragages, moins conséquents en volume, des multiples autres enclaves portuaires.

1.1.3. Les sédiments fluviaux

A l'instar des sédiments marins, les sédiments fluviaux sont des matériaux enlevés au fond des cours d'eau pour l'entretien des voies navigables. On compte sur le territoire français 525 000 km de cours d'eau qui transportent chaque année, en moyenne 6 millions de m³ de sédiments [VNF, 2007]. Leur dépôt provoque l'envasement des cours d'eau, des canaux, et des plans d'eau. Ce phénomène tout à fait naturel est accentué par une topographie plane, de faibles débits, les processus d'érosion, ainsi que par les rejets industriels et urbains.

Autrefois, les cours d'eau étaient entretenus par les riverains. Mais actuellement, ceux-ci ne les utilisent presque plus pour leurs besoins : la valorisation du bois issu de l'entretien des berges ne présente plus d'intérêt économique et les travaux d'entretien sont devenus coûteux. Par cet abandon, le cours d'eau ne peut plus fonctionner correctement. D'une part, les capacités d'écoulement se réduisent et apparaissent des risques d'inondation des terrains riverains, avec l'envasement progressif du lit. D'autres parts, la dégradation des fonctions biologiques du cours d'eau, associée à une perte de la biodiversité (disparition des frayères et des fonctions épuratrices) conduit à la dégradation de la qualité de l'eau. De plus, l'attrait touristique et paysager est diminué.

La présence de toxiques (issues des industries et des eaux urbaines par temps de pluie...) dans les sédiments aggrave la situation. Mais les pratiques agricoles amènent

également des substances polluantes. Le curage constitue alors une opération de restauration, d'entretien voire d'assainissement indispensable à la prévention des risques d'inondation, au rétablissement du tirant d'eau pour la navigation, et aussi à la restauration du milieu naturel. Le choix de la filière de gestion de ces sédiments doit alors minimiser les impacts sur l'environnement avec un coût de réalisation raisonnable.

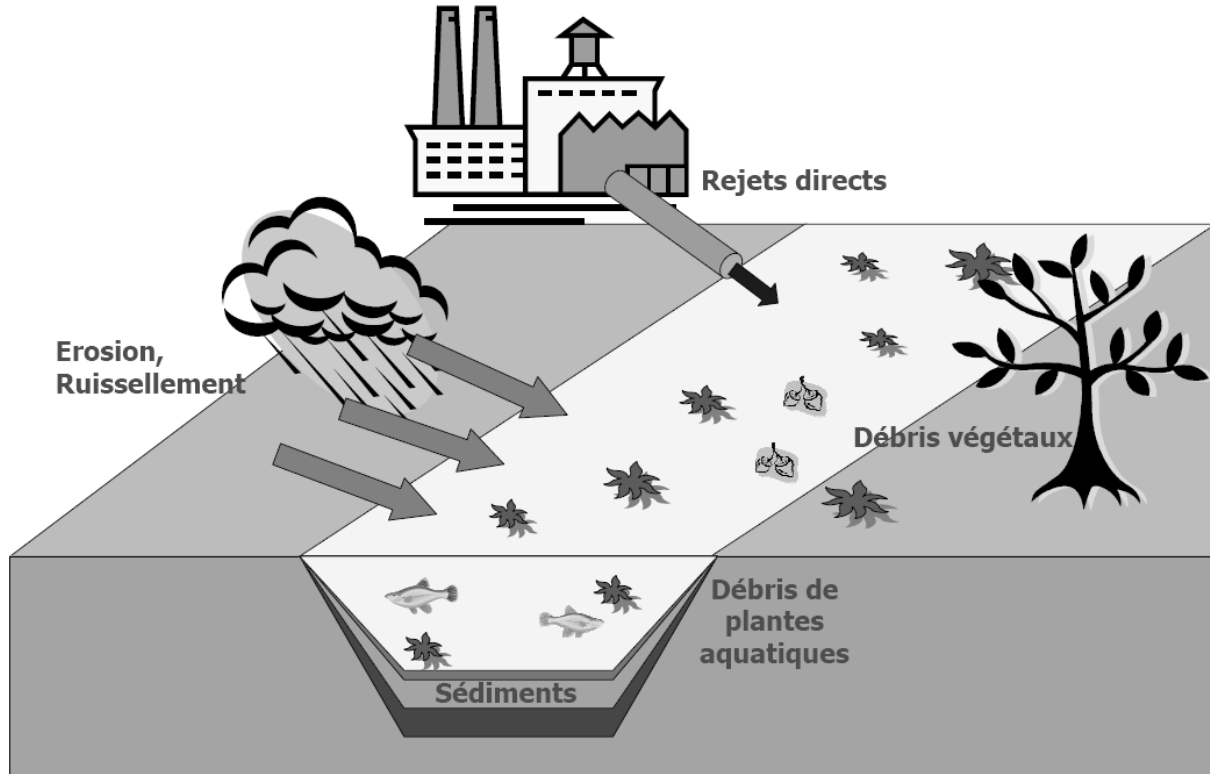


Figure 1.2: Accumulation des sédiments fluviaux [OIE, 2006]

1.1.4. Type de dragage

On distingue trois types de dragage selon la nature des sédiments à draguer et le type de travaux à réaliser : dragage d'entretien, d'approfondissement et création de nouvelles aires portuaires.

1.1.4.1. Dragage d'entretien

Le dragage d'entretien périodique est associé à l'enlèvement des sédiments accumulés du fond d'un chenal afin de conserver la profondeur nominale des voies de navigation, des ports, des marinas, des rampes de mise à l'eau et des installations portuaires. Ce type de dragage s'effectue à intervalles réguliers aux fins de navigation (au moins une fois tous les cinq ans) et ne prévoit aucun agrandissement de la zone draguée.

Habituellement, le dragage se fait par des moyens mécaniques, comme une benne à traction, une pelle à benne traînante ou une rétrocaveuse.

Les travaux de dragage occasionnent le déplacement de volumes de sédiments souvent très importants. Ce déplacement engendre des modifications physiques et hydro sédimentaires des sites aménagés.

1.1.4.2. Dragage d'approfondissement

Les dragages d'approfondissement sont entrepris lorsqu'il devient nécessaire d'adapter le seuil de navigation à la taille des navires. Ces travaux nécessitent de déplacer d'importants volumes de sédiments et demandent des moyens de dragage importants.

1.1.4.3. Dragage d'aménagement de nouvelles aires portuaires

L'aménagement de nouvelles aires portuaires occasionne souvent le déplacement d'importants volumes de matériaux divers : roches, graviers, sables, terres, argiles ou vases. Ces matériaux peuvent également être utilisés pour créer les nouvelles aires.

1.1.5. Constituants des sédiments de dragage

Les sédiments sont classés selon leur taille (granulométrie) et selon la nature de leurs constituants (phase liquide et phase solide).

La répartition des volumes des particules des sédiments est différente selon leurs origines :

- La fraction supérieure à 80 microns, engendre les cailloux, les graviers, les gros sables et les sables fins, sont des sédiments terrigènes. C'est-à-dire des matériaux d'érosion.
- La fraction fine, relative aux particules inférieures à 80 μm , est issue du processus de la sédimentation. Cette fraction est constituée de minéraux argileux ayant un diamètre compris entre 0,2 et 2 μm et de silt ayant un diamètre compris entre 2 μm et 80 μm . Cette fraction engendre généralement des comportements complexes provoqués par les interactions entre les particules. Les interactions de ces particules avec l'eau contenue dans le milieu, les ions présents dans le milieu, et aussi les éléments organiques.

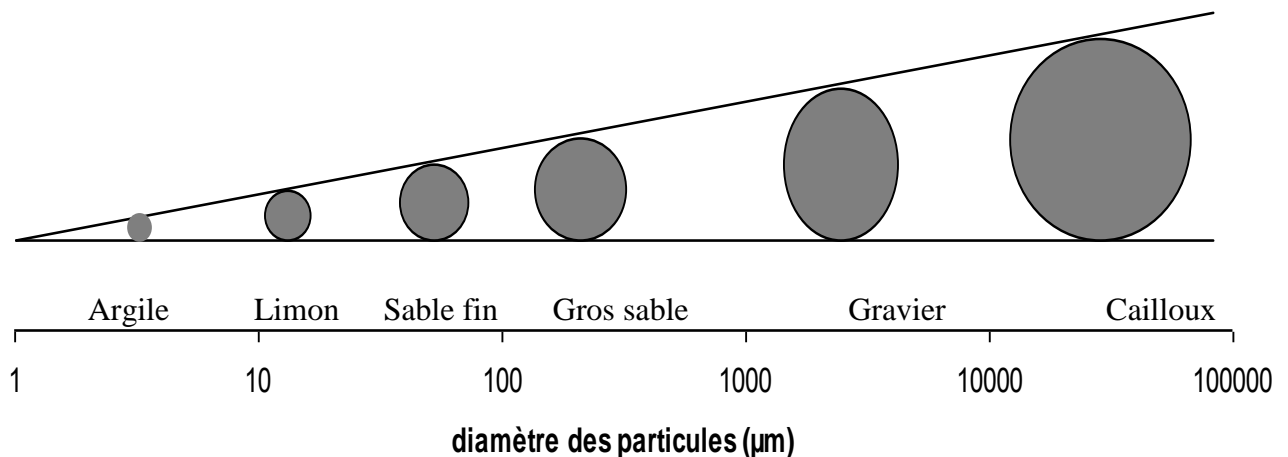


Figure 1.3: Classement granulométrique d'un sol

Du point de vue nature des éléments présents dans les sédiments, ce matériau présente une matrice très hétérogène, constitué de matériaux détritiques inorganiques et organiques (Geffard, 2001).

1.1.5.1. Eau interstitielle

L'eau qui occupe l'espace entre les particules sédimentaires représente une fraction importante du sédiment avec généralement plus de 50% de son volume (Geffard, 2001).

L'eau interstitielle peut être divisée en quatre catégories : [LIFE, 2002]:

- L'eau libre : c'est la quantité d'eau circulant librement entre les particules. L'eau libre est séparable des grains solides par une simple décantation ou un séchage.
- L'eau capillaire : c'est la quantité d'eau liée aux fines par des forces de capillarité; elle occupe les pores interconnectés très fins (quelques microns).
- L'eau colloïdale, c'est la partie d'eau qui forme les hydrates en réagissant avec les différents éléments présents dans le sol (eau entre les feuillets d'argile ou dans le gypse).
- L'eau intercellulaire, qui est liée chimiquement à la surface des particules, et constitue un film autour d'elles.

1.1.5.2. Phase minérale

La phase minérale est formée de minéraux provenant de l'érosion de l'écorce terrestre et de débris coquilliers. Ses composés sont principalement, les argiles, les carbonates et les silicates. Les particules inorganiques sont généralement enrobées d'hydroxyde de fer, de manganèse et de substances organiques qui leur confèrent une grande capacité d'adsorption vis à vis des polluants (Geffard, 2001).

1.1.5.3. Phase organique

La phase organique représente les débris végétaux et des ensembles de rejets représentant des contaminants (les HAP: hydrocarbures polycycliques aromatiques, pesticides, solvants chlorés, PCB). Ces éléments sont souvent très toxiques, solubles ou adsorbés sur les matières en suspension. Les matières organiques du sol, en général, sont réparties en quatre classes (Figure 1.4):

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

L'humus se divise en trois groupes : la fraction humine, les acides humiques, et les acides fulviques.

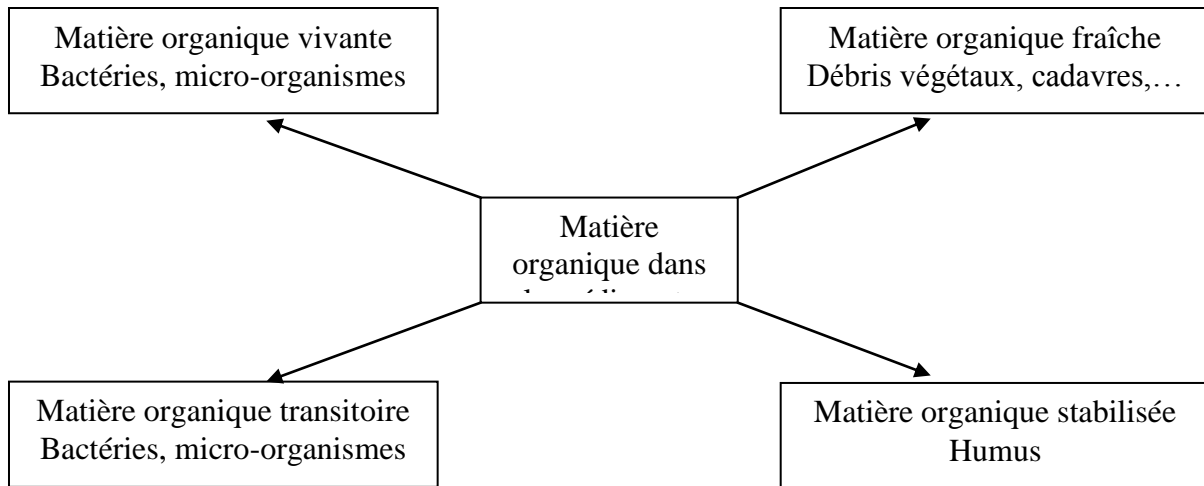


Figure 1.4 : Répartition de la matière organique contenue dans les sédiments

En général, la proportion de matière organique est de l'ordre de 2 à 10% pour les sédiments de cours d' « eaux vives » et elle est constituée à 60% de composés humiques [Rey *et al*, 2000, Schneider, 2008]. Dans d'autres conditions, cette teneur peut atteindre les 20%.

1.1.6. La réglementation relative au dragage et aux matériaux dragués

La gestion des sédiments et les opérations de dragage sont régies par des dispositions internationales et nationales

1.1.6.1 Dispositions internationales

a. Convention OSPAR

La Convention OSPAR prend la suite des Conventions d'Oslo et de Paris. Pour mémoire, on rappellera que la Convention pour la prévention de la pollution marine par les opérations d'immersion effectuées par les navires et les aéronefs, dite Convention d'Oslo, signée en février 1972, avait constitué une étape importante de la prise de conscience des dangers suscités par la pollution des mers et des océans. Un accord analogue, la Convention pour la prévention de la pollution due aux rejets de substances dangereuses d'origine tellurique, charriés par les cours d'eau ou les oléoducs, dite Convention de Paris, fut ensuite ouverte à la signature en juin 1974, et entra en vigueur en 1978.

Tout d'abord, on doit relever que la convention mentionne d'emblée en son article 2, et au titre des obligations générales que les Parties doivent respecter deux principes déjà dégagés antérieurement par le droit international de l'environnement :

- Le principe de précaution, qui fait l'objet d'une définition propre à la Convention dans les termes suivants : « des mesures de prévention doivent être prises lorsqu'il y a des motifs raisonnables de s'inquiéter du fait que des substances ou de l'énergie introduites, directement ou indirectement, dans le milieu marin, puissent entraîner des risques pour la santé de l'homme, nuire aux ressources biologiques et aux écosystèmes marins, porter atteinte aux valeurs d'agrément ou entraver d'autres utilisations légitimes de la mer, même s'il n'y a pas de preuves concluantes d'un rapport de causalité entre les apports et les effets ».

- Le principe du pollueur-payeur, selon lequel « les frais résultant des mesures de prévention, de réduction de la pollution et de lutte contre celle-ci doivent être supportés par le pollueur ».

Les pays membres ont également déterminé pour les éléments métalliques et les substances les plus toxiques, des seuils imposant des niveaux en fonction de la toxicité des sédiments et du bruit du fond du milieu étudié:

- Le niveau 1 (N1) : Concentrations en contaminants au dessous desquelles l'immersion peut être autorisée mais une étude complémentaire est requise dès le dépassement de ce seuil,
- Le niveau 2 (N2) : Concentrations en contaminants au dessus desquelles l'immersion ne peut être autorisée que si on apporte la preuve que c'est la solution la moins dommageable pour l'environnement aquatique et terrestre.

b. Convention de Londres

La Convention sur la prévention de la pollution des mers résultant de l'immersion de déchets, communément appelée Convention de Londres (1972), est un traité réglant la prévention de la pollution des mers résultant de l'immersion.

Elle ne couvre ni les émissions à partir de sources côtières, comme les égouts, ni les déchets provenant de l'exploration et de l'exploitation des ressources minérales maritimes, et ne s'applique pas en cas de force majeure lorsqu'il s'agit de sauvegarder des vies humaines ou de sécurité des navires, Elle ne couvre pas non plus le stockage de matière dans un but autre que l'élimination,

La convention de Londres est entrée en vigueur le 30 Août 1975.

Depuis janvier 2003, 78 États avaient ratifié la Convention de Londres [convention de Londres, 1972].

1.1.6.2 Réglementation française

Sur les plans nationaux les législations sont aussi de plus en plus contraignantes et consolident les principes du développement durable.

La réglementation française en termes de gestion de l'immersion des matériaux de dragage est définie par l'arrêté du 14 juin 2000. Dans cet arrêté, le Groupe d'Etudes et d'Observations sur les Dragages et l'Environnement (GEODE) a proposé des valeurs pour les seuils N1 et N2 pour les sédiments destinés à l'immersion [Paul, 2005] (Tableau 1.1 et Tableau 1.2).

Contaminant (mg/kg de MS)		Niveau N1	Niveau N2
Arsenic	(As)	25	50
Cadmium	(Cd)	1,2	2,4
Chrome	(Cr)	90	180
Cuivre	(Cu)	45	90
Mercure	(Hg)	0,4	0,8
Nickel	(Ni)	37	74
Plomb	(Pb)	100	200
Zinc	(Zn)	276	552

Tableau 1.1 : Valeurs guides des niveaux 1 et 2 pour les métaux (mg/kg de MS) retenues par la France (Arrêté du 14/06/2000)

Contaminant (mg/kg de MS)	Niveau N1	Niveau N2
PCB totaux	0,5	1
PCB congénère 28	0,025	0,05
PCB congénère 52	0,025	0,05
PCB congénère 101	0,05	0,1
PCB congénère 118	0,025	0,05
PCB congénère 138	0,05	0,1
PCB congénère 153	0,05	0,1
PCB congénère 180	0,025	0,05

Tableau 1.2: Valeurs guides des niveaux 1 et 2 pour les congénères de polychlorobiphényles (mg/kg de MS) en France (Arrêté du 14/06/2000)

Contrairement à l'immersion en mer des produits de dragage, la réglementation française relative aux dépôts à terre des sédiments et notamment leur qualité physico-chimique n'est pas encore bien définie. Dans le cadre du Grenelle de l'environnement de 2008, la Circulaire du 04/07/08 relative à la procédure concernant la gestion des sédiments lors de travaux ou d'opérations impliquant des dragage ou curages maritimes et fluviaux a précisé les points suivants :

- 1- Les notions de curage et dragage et le droit applicable aux travaux et opérations susceptibles d'impliquer un curage ou un dragage et donc une gestion de sédiments.
- 2- Le droit applicable aux techniques de remise en suspension et/ou d'immersion.
- 3- La possibilité de commercialiser les matériaux excédentaires et les procédures applicables.

4- Les procédures applicables lorsque les matériaux excédentaires ne sont pas commercialisables et lorsqu'une gestion à terre doit être envisagée et notamment :

- L'état de la réflexion sur le point de partage entre le caractère dangereux ou non dangereux des sédiments.
- Les procédures applicables à la gestion à terre des sédiments qui ne sont pas caractérisés comme des déchets dangereux.

En l'absence de textes complets, il est communément admis de prendre en considération les niveaux de référence prescrits par la législation pour l'épandage des boues de stations d'épuration (Tableau 1.3).

Contaminants	Valeur limite dans les boues (mg/kg MS)	Valeur limite dans les sols (mg/kg MS)
Cadmium	15	2
Chrome	1000	150
Cuivre	1000	100
Mercure	10	1
Nickel	200	50
Plomb	800	100
Zinc	3000	300
Cr +Cu+Ni+Zn	4000	-
Produits organiques		
PCB	0,8	-
Fluoranthène	5	-
Benzo(b) Fluoranthène	2,5	-
Benzo(a)pyrène	2	-

Tableau 1.3: Teneurs limites admissibles dans les boues de stations d'épuration avant épandage [IFREMER]

1.1.6.3 Dispositions d'autres pays européens et du Canada

Beaucoup de pays européens ont pour leur part fixé leurs propres réglementations. Ces réglementations dépendent du bruit du fond de la zone concernée ainsi que la technique d'identification de la pollution.

a. Belgique

Pour l'examen de la réglementation belge, il faut se reporter à l'Arrêté du Gouvernement Wallon AGW du 30 novembre 1995 modifié par l'AGW du 10 juin 1999. Les boues sont définies en fonction de leur qualité, catégorie A et catégorie B selon leur contenu en polluants (Tableau 1.4). Si les concentrations en polluants sont intermédiaires entre les boues de catégorie A et B, il faut procéder à des tests d'élution. Les boues de catégorie A peuvent être utilisées conformément aux dispositions de l'AGW du 14 juin 2001. Si la siccité est supérieure à 35%, ces boues peuvent être valorisées en travaux de sous-fondation, fondations, réhabilitation des sites désaffectés, aménagements et réhabilitation de CET. Si les taux de

siccité sont inférieurs à 35%, les boues peuvent être utilisées pour des travaux d'aménagements du lit et des berges des cours et plan d'eau en dehors des zones présentant un intérêt biologique. Les boues de dragage de catégorie B, peuvent être orientées vers des installations de prétraitement pour être traitées afin de répondre aux critères de la catégorie A. En Région Wallonne, le passif en termes de sédiments à draguer s'élève à 2,1 millions de m³ de boues dont 2/3 de catégorie B [Defoux, 2006].

Eléments	A	B
Cadmium	6	30
Chrome	200	460
Cuivre	150	420
Mercure	1,5	15
Nickel	75	300
Plomb	250	1500
Zinc	1200	2400

Catégorie A : Matières pour lesquelles aucune norme imposée en métaux lourds et en composés organiques n'est dépassée. Elle représente les teneurs maximales admissibles (mg/kg/MS).

Catégorie B : Matières pour lesquelles une ou plusieurs normes en métaux lourds et en micropolluants sont dépassées. Elle représente les teneurs de sécurité pour les éléments (mg/kg/MS).

*Tableau 1.4: Seuils de référence en Wallonie (Belgique) en mg/kg de MS [Boucard, 2006]
Définis sur la base d'un essai de lixiviation avec L/S=10.*

b. Aux Pays Bas

Afin de réduire le volume de déchets, les Pays-Bas perçoivent une taxe sur les déchets destinés à la mise en décharge. Or, cette approche ne s'applique pas aux boues de dragage. En effet, les Pays-Bas ont pour politique d'améliorer les voies navigables publiques et donc d'assurer, voire de développer le dragage. Actuellement, les quantités draguées dépassent 45 millions de m³/an.

Les seuils limites mis en place par les autorités néerlandaises pour apprécier la qualité des sédiments sont reportés dans le Tableau 1.5 [Boucard, 2006].

Eléments	1	2	3
Cadmium	2	7,5	30
Chrome	480	480	1000
Cuivre	35	90	400
Mercure	0,3	1,6	15
Plomb	530	530	1000
Zinc	480	1000	2500

Tableau 1.5: Valeurs seuils des métaux au Pays Bas en mg/kg de MS [Boucard, 2006]

Les seuils correspondent à trois limites 1, 2 et 3. Le niveau 1 correspond aux valeurs acceptables en termes de concentrations des métaux dans les sédiments. Le domaine 1-2

définit les valeurs tests. Dans cette plage de concentration, les sites du dragage sont étudiés au cas par cas. Le niveau situé entre les seuils 2 et 3 correspond aux valeurs qui nécessitent des précautions particulières. Le niveau 3 limite le seuil acceptable pour le rejet en mer réglementé.

c. *En Allemagne*

L'Allemagne, contrairement aux Pays Bas, n'a établi qu'un seul niveau (Tableau 1.6) au-dessus duquel des traitements spécifiques sont désormais obligatoires [Boucard, 2006]. Les concentrations vérifiant les limites indiquées dans le Tableau 1.6 permettent de rejeter mes sédiments en mer actuellement.

Métaux	Seuil
Mercure	8
Cadmium	10
Plomb	900
Chrome	900
Cuivre	800
Zinc	2500
Nickel	200

Tableau 1.6: *Seuils de référence pour l'Allemagne en mg/kg de Ms [Boucard, 2006]*

d. *Au Canada*

Au Canada, il existe des critères intermédiaires pour l'évaluation des sédiments retenus.

Pour cette raison, trois niveaux ont été définis (Tableau 1.7). Le niveau 1 c'est celui sans effet, le niveau 2 définit les seuils d'effets mineurs et le niveau 3 représente les seuils d'effets néfastes.

	Mercure	Cadmium	Plomb	Chrome	Cuivre	Zinc	Nickel
1	0.05	0.2	23	55	28	100	35
2	0.2	0.9	42	55	28	150	35
3	1	3	170	100	86	540	61

Tableau 1.7: *Critères retenus pour l'évaluation de la qualité des sédiments au Canada en mg/kg de MS [Boucard, 2006]*

La réglementation au Canada définit un cadre juridique pour le dépôt à terre des sédiments du fleuve saint Laurent à partir des seuils définis dans le Tableau 1.7. La limitation débute au niveau du domaine 1-2. A cette plage, les matériaux peuvent être utilisés après une étude complémentaire et préventive sur la détérioration de l'environnement. Entre les niveaux 2 et 3, les sédiments ne peuvent être utilisés qu'à des sites plus pollués. Au-delà du niveau 3, les sédiments doivent subir des études complémentaires.

1.1.7 **Prétraitements des sédiments**

Comme discuté précédemment, les sédiments de dragage peuvent être plus ou moins fins avec des teneurs en eaux éventuellement importantes. Dans le cadre de cette étude les sédiments étudiés sont fins et à fortes teneurs en eau. Ainsi, le séchage constitue un aspect important de l'étude.

La séparation des phases solide-liquide est une préoccupation récurrente pour les industriels et les collectivités dans divers secteurs d'activité. Dans ce qui suit, seuls les procédés essentiellement utilisés seront abordés.

1.1.7.1 Procédés mécaniques de séchage

a. La filtration

La filtration est considérée comme un procédé mécanique de déshydratation des boues résiduelles. Elle est très utilisée dans le prétraitement des sédiments. Son principe repose sur le passage d'une phase liquide (filtrat) d'un mélange solide-liquide à travers un milieu poreux (filtre) qui retient les particules solides (gâteau).

Pour la réalisation de la filtration, on a recours à des systèmes de filtrations comme le filtre presse ou le filtre à bandes passantes.

Par définition, deux grandeurs caractéristiques permettent de définir l'aptitude à la filtration d'une suspension, à savoir :

La résistance spécifique à la filtration (α) : c'est la résistance d'une quantité de gâteau à la filtration contenant 1g de matière sèche sur une surface de 1 cm².

La compressibilité du gâteau qui caractérise l'évolution de filtrabilité en fonction de pression appliqué.

Généralement, l'équation de Poiseuille exprime le débit filtré par unité de section:

$$q = \frac{1}{S} \frac{dV}{dt} = \frac{\Delta P}{\eta} \frac{1}{R} \quad \text{Eq. 1-1}$$

avec :

q : débit instantané (cm/s),

S : surface filtrante (cm²),

V : volume de filtrat (cm³),

t : temps

ΔP : différence de pression (g/cm²)

η : viscosité du filtrat (Pa.s).

R : Résistance à la filtration

Le débit augmente avec la surface, la pression et le diamètre des pores. Il diminue avec la viscosité du fluide et la longueur du filtre.

Ce débit n'est pas constant, car il se produit en réalité un phénomène de colmatage. Ce dernier ralentit la filtration par augmentation de l'épaisseur du filtre, mais aussi par réduction du diamètre des pores.

Le paramètre R dans la formule [1-1] représente la résistance globale à la filtration par unité de surface. Elle est égale à la somme des résistances exercées par le milieu filtrant R_m et le gâteau (R_g). Pour cette dernière, elle s'exprime par la relation suivante :

$$R_g = \alpha \frac{M}{S} = \frac{\alpha c V}{S} \quad \text{Eq. 1-2}$$

avec :

M : masse totale du gâteau déposé (g),

S : surface de filtration (cm²),

c : concentration en matières solides (g/cm³),

V : volume de filtrat (cm³),

α : résistance spécifique du gâteau (cm/g).

L'intégration à pression constante de l'équation [1-2], par rapport à V, conduit à une relation de type $t/V=aV+b$, soit:

$$\frac{t}{V} = \frac{\alpha c \eta}{2S^2 \Delta P} V + \frac{\eta R_m}{S \Delta P} \quad \text{Eq. 1-3}$$

Il en résulte que le tracé $t/V=f(V)$ montre une asymptotique (Figure 1.5) dont la partie à débit important est linéaire. Le tracé expérimental de cette droite permet de mesurer des paramètres de l'infiltration (α et R_m) comme définit la Figure 1.5

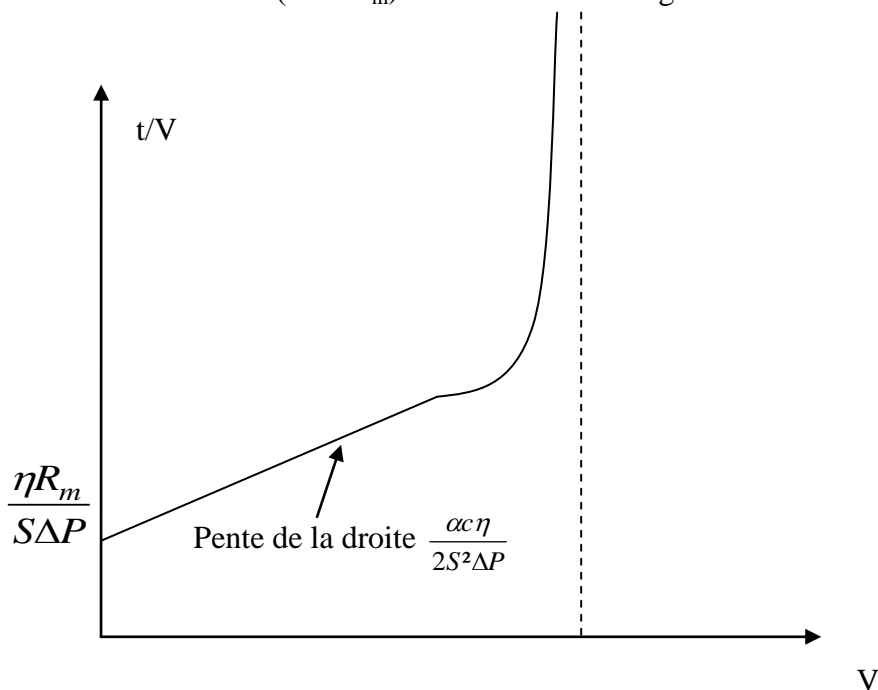


Figure 1.5: Courbe de filtration
(Type)

La pente de la droite : $\frac{\alpha c \eta}{2S^2 \Delta P}$, permet de déterminer α , la résistance spécifique et la résistance du milieu filtrant R_m à partir de l'ordonnée à l'origine : $\frac{\eta R_m}{S \Delta P}$.

Deux modes de déshydratation d'un matériau par filtration sont possibles :

- Le filtre presse (Figure 1.6) où le liquide est extrait d'une matrice solide poreuse par déformation (pressage) de la matière entre une plaque et un filtre textile. En pratique, pour les boues, on utilise le pressage sur tapis roulant. Le pressage sur plateau est d'usage général.

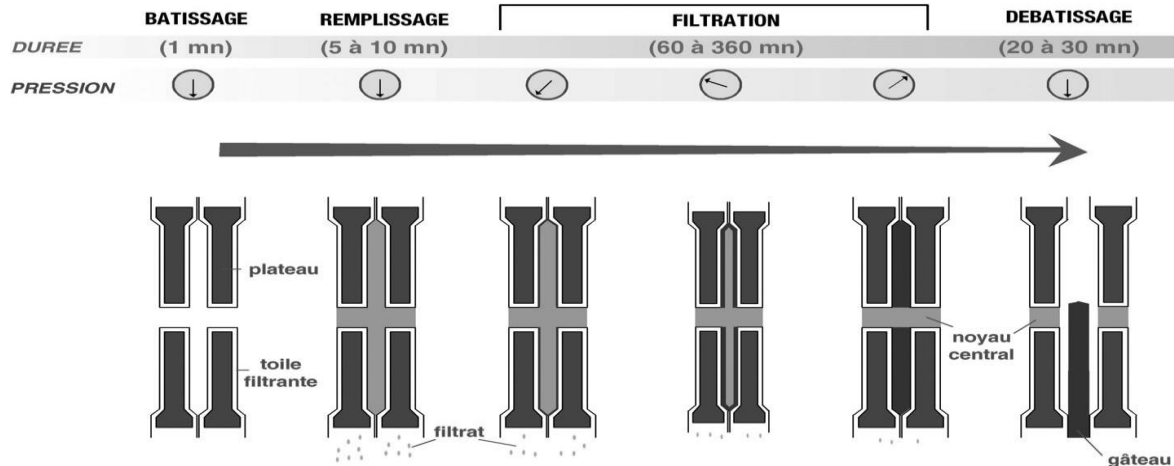


Figure 1.6: Exemple d'un filtre-presse [Colin, 2003]

- Le filtre à bandes presseuses (Figure 1.7) où le mélange des boues dans le réservoir alimente le filtre par débordement. Le matériau comprimé entre deux bandes, est alors pressé en passant par une succession de rouleaux.

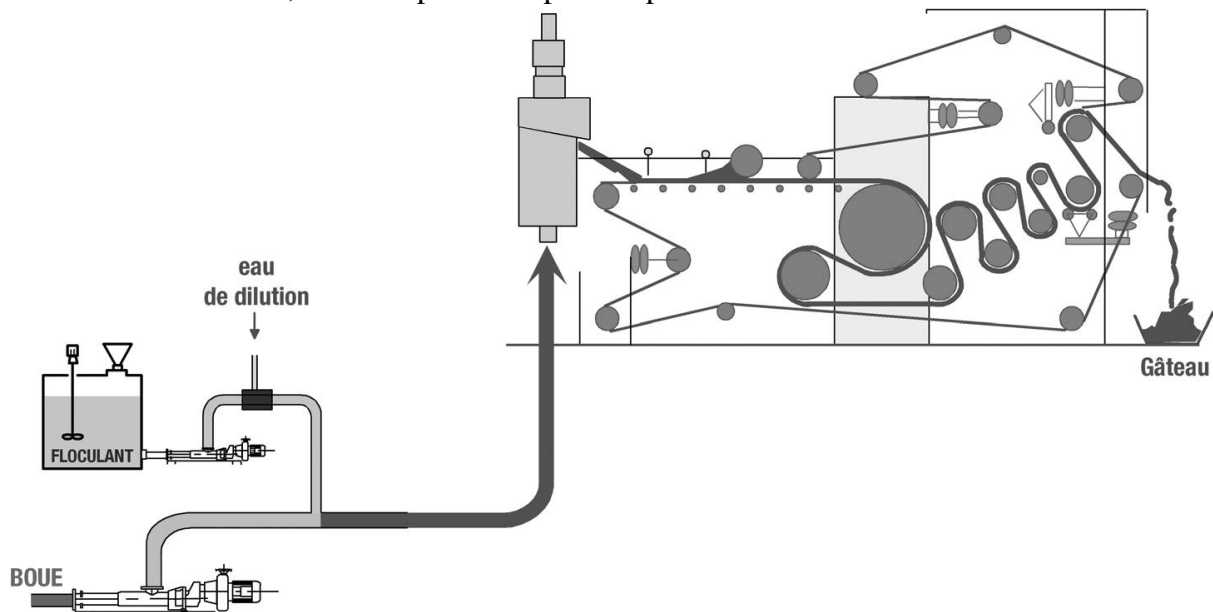


Figure 1.7: Schéma de fonctionnement d'un filtre à bandes presseuses [Colin, 2003]

b. La centrifugation

La centrifugation est une technique permettant d'isoler des éléments solides en suspension dans une boue en la faisant tourner à grande vitesse. Ce procédé utilise la force centrifuge. L'appareil est généralement composé d'un bol cylindro-conique en rotation autour d'un axe horizontal (Figure 1.8).

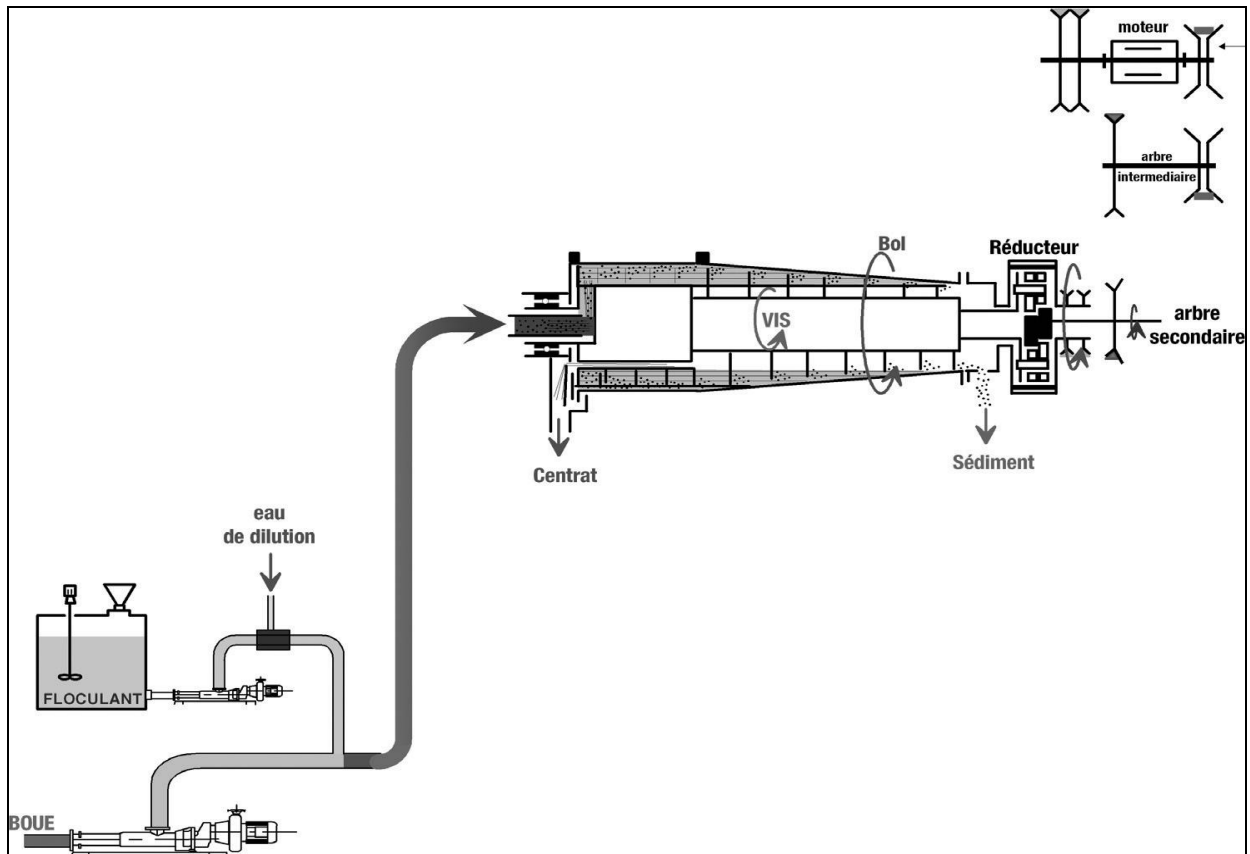


Figure 1.8: Principe de fonctionnement général d'une centrifugeuse

La partie cylindrique du bol sert à la clarification tandis que la partie conique correspond à la phase finale de la déshydratation.

Cette technique est à la base utilisée dans l'industrie alimentaire, par exemple pour séparer la crème du lait ou éliminer des particules du vin, ou au laboratoire pour récupérer un précipité, ou pour séparer les éléments figurés du sang.

Dans le cas des sédiments, la centrifugeuse n'est rentable qu'avec les boues non abrasives. En effet, la présence en excès de quartz contribue considérablement à l'usure de ces machines et le coût de maintenance devient prohibitif [Colin, 2003].

1.1.7.2 Procédés physico-chimiques de déshydratation

Plusieurs phénomènes interviennent lors des opérations de déshydratation. Les deux principaux sont la coagulation-floculation et la décantation.

a. La sédimentation-décantation

La sédimentation-décantation est une opération de séparation des phases solide-liquide par différence de gravité. Sous l'effet de leur poids propre, les particules tendent à tomber et à se déposer au fond. La décantation est marquée par la clarification du liquide et la formation d'une boue concentrée au fond [Colin, 2003]. La sédimentation-décantation paraît être le moyen le plus économique d'un point de vue énergétique pour séparer les grains solides en suspension dans un liquide. Néanmoins, ce procédé peut s'avérer long. L'utilisation des flocculants est généralement associée à la sédimentation-décantation [Colin, 2003].

b. L'évaporation

L'évaporation résulte d'une agitation moléculaire des molécules d'un liquide donné. Dans une masse M d'eau à l'état liquide, les molécules circulent d'une manière désordonnée et à une vitesse proportionnelle à la température: plus elle est élevée, plus le mouvement est amplifié et plus l'énergie associée est suffisante pour permettre à certaines molécules de s'échapper et d'entrer dans l'atmosphère. Plusieurs recherches se sont intéressées au séchage des boues et des sols [Dalton, 1802, Benson *et al*, 1987, Asbrubali, 2006, Aydin *et al*, 2005].

[Dalton, 1802] est le premier à avoir défini une loi linéaire qui exprime le taux d'évaporation d'un plan d'eau en fonction du déficit de saturation de l'air au dessus de la surface exposée (quantité d'eau ($e_s - e_a$) que l'air peut stocker) et de la vitesse du vent u . Cette loi est formulée selon la relation suivante :

$$E = f(u)(e_s - e_a) \quad \text{Eq. 1-4}$$

avec:

E: potentiel d'évaporation [mm/j],

f(u) : constante de proportionnalité (avec vitesse du vent u exprimée en m/s),

e_s : pression de vapeur d'eau à saturation à la température de la surface évaporante [mb]

e_a : pression effective ou actuelle de vapeur d'eau dans l'air, [mb].

En se basant sur des tests de bacs d'eau, Rohwer, 1934 a proposé en 1934 l'expression suivante pour l'évaporation:

$$E = 0,484(1 + 0,6.u)(e_s - e_a) \quad \text{Eq. 1-5}$$

En intégrant les expressions (1-6) et (1-7) qui définissent la pression de vapeur et la pression de vapeur saturante: dans (1-5)

$$e(T) = \varphi \cdot e_{sat}(T) \quad \text{Eq. 1-6}$$

$$e_{sat}(T) = 611 \cdot \exp\left(\frac{17,27T}{237,3+T}\right) \quad \text{Eq. 1-7}$$

avec

T : la température dans l'enceinte, et,

φ : l'humidité relative,

Sachant que l'étude est réalisée dans une enceinte fermée, la vitesse du vent est considérée nulle. La formule de Rohwer devient donc :

$$E = 0,29572 \exp\left(\frac{17,27T}{237,3+T}\right) \cdot (1 - \varphi) \quad \text{Eq. 1-8}$$

En se basant sur la mesure de la balance énergétique, Penman, [1948] a défini l'équation du potentiel d'évaporation d'un sol nu :

$$E_{mass} = \frac{mR_n + \rho_a c_p (\delta e) g_a}{\lambda_v (m + \gamma)} \quad \text{Eq. 1-9}$$

Avec :

E_{mass} : le potentiel d'évaporation du sol ($\text{kgm}^{-2} \text{t}^{-1} \approx \text{mm.s}^{-1}$);

m : la pente de la courbe de la pression de vapeur saturante (Pa K^{-1})

R_n : irradiance nette (W m^{-2})

ρ_a : densité de l'air (kg m^{-3})

c_p : capacité thermique de l'air ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)

g_a : conductance atmosphérique (m s^{-1})

δe : variation de pression (Pa)

λ_v : énergie vaporisation (J kg^{-1})

γ : constante psychrométrique (Pa K^{-1})

Dans le cadre de cette étude, les essais envisagés seront réalisés dans une salle climatique fermée et privée du rayonnement solaire, donc R_n sera considéré nulle.

L'équation (1-9) s'écrira donc dans le cadre de notre étude :

$$E = \frac{\rho_a c_p g_a}{\lambda_v (m + \gamma)} (\delta e) \quad \text{Eq. 1-10}$$

$$\delta e = (1 - \varphi) e_{sat}(T) \quad \text{Eq. 1-11}$$

En intégrant l'équation 1-6 et 1-7 dans l'équation 1-10. Nous aurons finalement :

$$E = \frac{\rho_a c_p g_a}{\lambda_v (m + \gamma)} (1 - \varphi) \times 611 \times \exp\left(\frac{17,27T}{237,3+T}\right) \quad \text{Eq. 1-12}$$

L'équation (1-12) permet de déterminer le potentiel d'évaporation de l'eau en fonction du milieu et l'environnement de cette étude.

1.1.8 **Valorisation des sédiments marins en technique routière**

En matière de valorisation de la vase marine seule dans le génie civil, de nombreuses recherches se rapportent à son emploi pour les sous-couches de route. Cependant, les études sont très limitées au niveau industriel. A ce jour, aucune application réelle n'a été réalisée sur une étendue significative supérieure au kilomètre. La valorisation de la vase marine dans les matériaux de construction est une autre voie possible (briques, bétons expansés, ciment à basse résistance,...). Depuis trente ans, beaucoup de recherches ont été menées dans cette voie, mais leur valorisation à l'échelle industrielle reste également limitée.

Le principal obstacle à la valorisation des sédiments fins dans les couches de chaussées, est le caractère organique des sédiments. Aussi, l'existence des métaux lourds et des éléments toxiques peut causer un problème environnemental incompatible avec leur emploi.

Dans ce qui suit, on décrira différentes études menées dans le but de valorisation des sédiments en technique routière, en fabrication de matériau seront décrites.

Les méthodes de formulation et/ou de traitements seront également abordées.

1.1.8.1 **Classification des matériaux et exigences de leur emploi en remblai**

L'utilisation d'un matériau en remblai ou terrassement routier nécessite la connaissance de ses propriétés physiques et géotechniques. La classification peut se faire selon différentes approches.

a. Classification GTR

Pour une classification selon le Guide des Terrassements Routier GTR, 2000, les paramètres d'entrées sont comme illustré dans la Figure 1.9. Ils sont essentiellement les caractéristiques physiques du matériau. Ces paramètres sont la granulométrie, l'activité argileuse et la plasticité du matériau.

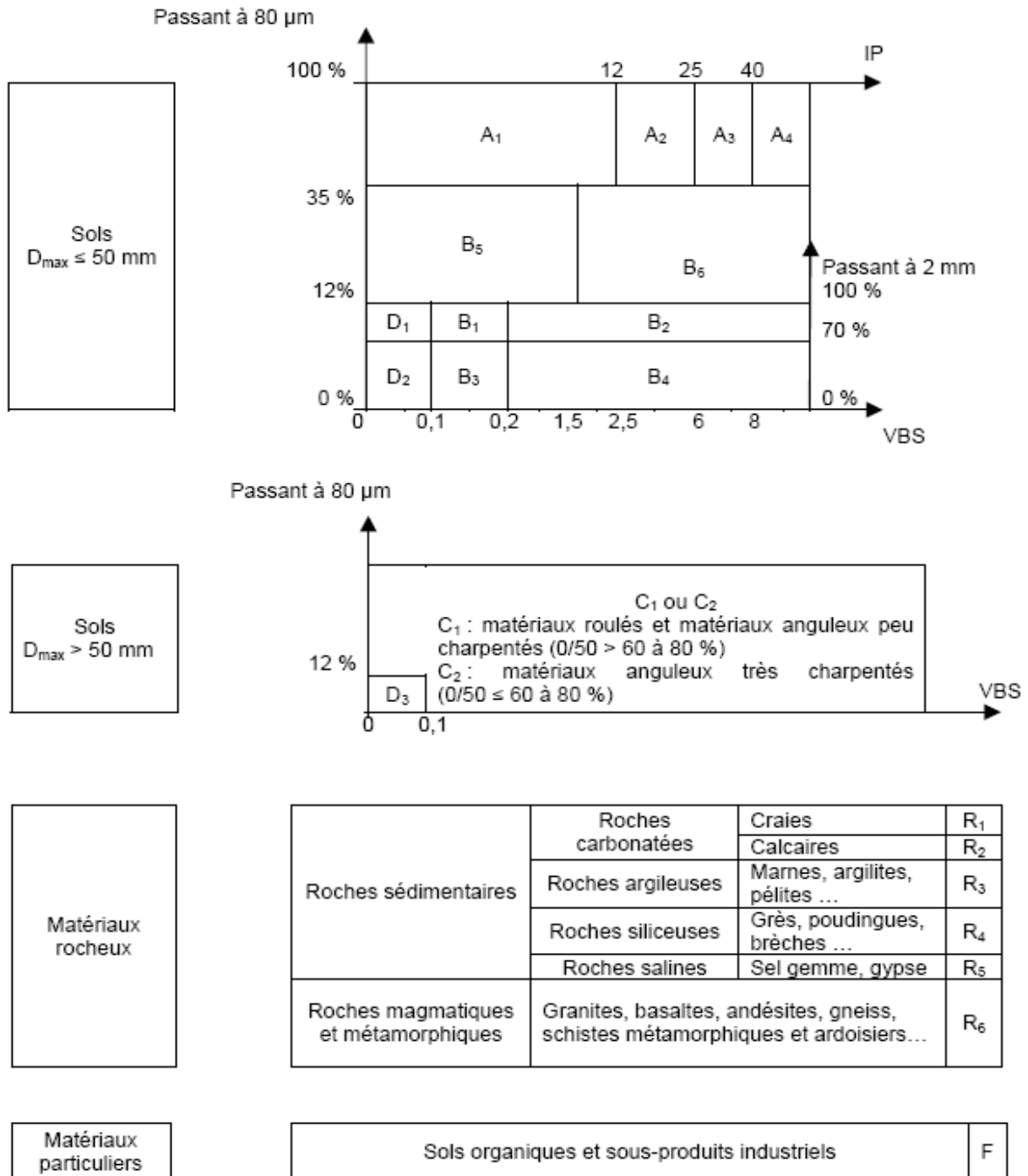


Figure 1.9: Classification des matériaux [GTR, 2000]

Les sédiments de dragage sont essentiellement des sols fins très humides à l'extraction.

Leur teneur en eau comprise entre 100 et 300 %, souvent supérieure à leur limite de liquidité, leur donne l'apparence d'une boue ou d'une vase. La granulométrie de ces matériaux, à l'exception de quelques sédiments sableux, montre une forte dominance de la fraction inférieure à 80 μ m [Boutouil et Rekik, 2006]. De plus, les indices de plasticité IP sont généralement supérieurs à 12. Il est également important de signaler la matière organique abondante comme présenté dans le Tableau 1.8.

Références : Auteurs (Année)	Teneurs en MO (%)	Zone de prélèvements
Boutouil (2006)	9	Port du Havre
Tremblay (1998)	8	Port de Québec
Colin (2003)	7	Port Autonome du Rouen
Dubois (2006)	10,3	Port Autonome de Dunkerque

Tableau 1.8 : Teneurs en matières organiques de quelques sédiments de dragage

La variation des paramètres physiques peut affecter la classification du matériau.

b. Classification USCS

Le Système de Classification Unifié des Sols (ou USCS) est un système de classification des sols utilisés dans les disciplines de la géologie et de l'ingénierie pour décrire la texture et la taille des grains d'un sol. Le système de classification peut être appliqué à la plupart des matériaux non consolidés. Il est représenté par un symbole à deux lettres (Tableau 1.9, Tableau 1.10 et Tableau 1.11). Chaque lettre est décrite ci-dessous (à l'exception de Pt):

Premières et/ou secondes lettres :

Lettre	Définition
G	GRAVIER
S	SABLE
M	LIMON
C	CALCAIRE
O	ORGANIQUE

Tableau 1.9 : Classes de matériaux selon la classification USCS

Secondes lettres :

Lettre	Définition
P	Mal classé (tailles de particules non uniformes)
W	Bien classé (tailles de particules diversifiées)
H	Haute plasticité
L	Faible plasticité

Tableau 1.10 : Sous classes de matériaux selon la classification USCS

Symbole graphique :

Grandes divisions			Symbole du groupe	Nom du groupe
Sol à grains grossiers 50% > 75µm	Gravier 50% > 4,75 µm	Gravier propre	GW	Gravier bien classé
		Gravier avec une proportion de fines > 12%	GP	Gravier mal classé
	Sable 50% < 4,75 µm	Sable propre	GM	Gravier limoneux
			GC	Gravier argileux
		Sable avec une proportion de fines > 12%	SW	Sable bien classé
			SM	Sable mal classé
Sols à gains fins 50% < 75µm	Limon et argile w _L < 50	Inorganique	ML	Limon
			CL	Argile
		Organique	OL	Limon organique, argile organique
	Limon et argile w _L ≥ 50	Inorganique	MH	Limon très plastique, limon élastique
			CH	Argile de haute plasticité
		Organique	OH	Limon organique, argile organique
Sol très organique			Pt	Tourbe

Tableau 1.11: Système de classification unifié des sols USCS (réglementation USCS)

1.1.8.2 Traitements préalables des sédiments

Avant d'envisager l'utilisation dans l'infrastructure routière des sédiments de dragage, ces derniers doivent avoir certaines caractéristiques géotechniques. Ces dernières peuvent concerner une augmentation de la résistance à la compression et au cisaillement, de l'indice de portance immédiat ou du CBR [Boutouil, 1998, Boutouil et Rekik, 2006] Pour ce faire, des traitements aux liants peuvent être nécessaires. Le traitement des sédiments de dragage par des liants hydrauliques ou aériens ne peut être effectué qu'après réduction des teneurs en eau par un processus de déshydratation [Boutouil et Rekik, 2006].

a. Traitements à la chaux

La chaux utilisée dans le traitement des sédiments est la chaux vive CaO. L'ajout dans les sédiments permet l'assèchement du matériau, une floculation des argiles, ainsi que l'amélioration des caractéristiques mécaniques du sédiment (Cabane, 2004).

La présence de la chaux génère une réaction chimique exothermique entraînant une évaporation d'une partie d'eau présente. En plus, la chaux, par l'intermédiaire des ions Ca²⁺ réagit avec les molécules d'argiles. Les ions de calcium vont remplacer les ions de sodium dans la formation argileuse. Ces formations vont accroître la stabilité structurale du sol en assurant l'agglomération des particules d'argiles. Enfin, l'état basique (Figure 1.10) du sol altère certains matériaux et une partie des éléments organiques [Dubois, 2006].

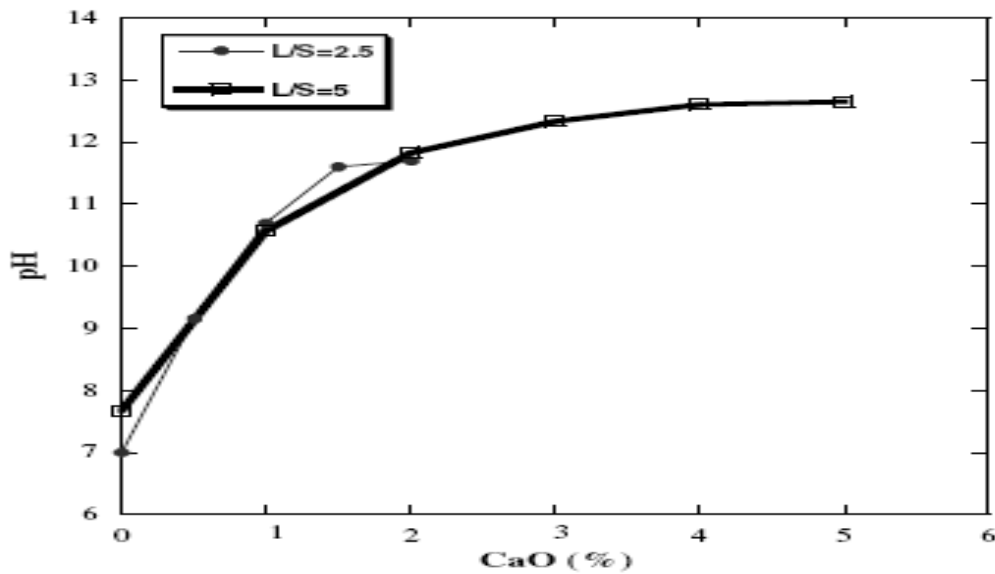


Figure 1.10 : Evolution du pH en fonction de la quantité de chaux [V. Dubois et al. 2008]

Enfin, la chaux peut contribuer à l'amélioration de l'état de pollution du sédiment. En effet, la chaux permet de détruire les germes pathogènes existants initialement dans l'eau.

b. Traitements au ciment

Le ciment utilisé dans le traitement des sols fins, et les sédiments en particulier, est en général un ciment Portland [Rekik, 2006]. Le ciment Portland est polyphasique issu de la cuisson d'un mélange de calcaire et d'argile. Il est contient 4 phases (Tableau 1.12) obligatoire à la réaction d'hydratation : les silicates tricalciques C3S et silicates bicalciques C2S, d'aluminate tricalcique C3A et d'aluminate tétracalcique C4AF. On donne dans le tableau suivant la composition détaillée d'un clinker :

Constituant	Notation cimentaire	Formule brute	% massique des phases
Silicate tricalcique (alite)	C3S	3CaOSiO_2	60-65
Silicate bicalcique (bélite)	C2S	2CaOSiO_2	20-10
Aluminate tricalcique	C3A	$3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$	8-12
Aluminoferrite tétracalcique	C4AF	$4\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$	8-10

Tableau 1.12: Composition minéralogique moyenne typique d'un clinker de ciment Portland, [Ollivier et Vichot, 2008]

La dissolution des différentes phases du clinker déclenche la formation des hydrates à la surface des grains du sol ou du sédiment traité en augmentant la cohésion des grains du sol [Rekik B. 2007]. Les premiers hydrates formés sont des silicates de calcium hydratés C-S-H présents jusqu'à 70% du volume de la pâte de ciment totalement consommée. Au bout d'un certain temps, la solution devient vite saturée en C-S-H. de ce fait, en se dissolvant le silicate tricalcique libère plus d'ions calcium et hydroxyde que le C-S-H n'en consomme, la solution

s'enrichit en ces ions et devient sursaturée par rapport à l'hydroxyde de calcium qui précipite sous forme de Portlandite [Ollivier et Vichot, 2008] :



Une chute de plasticité est également observée, cette évolution rhéologique revient à la formation d'hydrates, essentiellement les silicates de calcium hydratés C-S-H et des aluminates de calcium hydratés C-A-H [Boutouil et Rezik, 2006].

Si la chaux présente des privilèges dans le traitement des sols fins du fait des coûts moins onéreux, le ciment présente des avantages techniques d'être d'un effet plus rapide et de meilleures résistances mécaniques [Tao-Wei Feng, 2001].

c. Ajouts granulaires

Comme il a été discuté précédemment, les traitements aux liants hydrauliques et à la chaux peuvent être nécessaires pour la valorisation des sédiments de dragage en techniques routières. Cependant, pour atteindre des résistances mécaniques suffisantes pour la conception d'une couche de base, il peut être nécessaire de traiter à des pourcentages élevés [Duan, 2006]. Le renforcement du squelette granulaire des sédiments fins combiné avec un traitement aux liants permet d'améliorer le comportement mécanique des sédiments mais également rendre la solution économiquement viable. Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour le dosage des ajouts granulaires d'une façon optimale. On peut se baser sur la distribution granulométrique, en recherchant la meilleure distribution en fonction des différentes proportions utilisées [Dubois, 2006] ou en utilisant des méthodes prenant en compte les concepts de la meilleure compacité [Tran, 2009]. Cette dernière méthode se base sur le modèle d'Empilement Compressible [De Larrard, 2000].

Dans le présent travail, le renforcement du squelette granulaire pour la valorisation des sédiments de dragage en couche de base fera l'objet du Chapitre 4 de ce manuscrit.

Le Modèle d'Empilement Compressible MEC [De Larrard, 2000] se base sur la prédiction de la densité d'empilement maximale de la phase granulaire à l'état sec.

Le modèle de De Larrard est fondé essentiellement sur une approche géométrique [Bournonville *et al.* 2005]. C'est un modèle de prédiction de la compacité d'empilement de grains secs de tailles et de formes quelconques, (*Figure 1.11*).

Figure 1.11 : Etapes du modèle d'empilement compressible [De Larrard, 2000]

La fraction volumique φ_i occupée par les particules de la classe i au sein de l'empilement peut être inférieure ou égale à la fraction volumique correspondant à la situation où la classe i occupe avec sa compacité propre le volume laissé libre par les particules de taille supérieure, ce qui s'écrit :

$$\varphi_i \leq \beta_i \left(1 - \sum_{j=i+1}^N \varphi_j \right) \quad \text{Eq. 1-14}$$

N : le nombre d'ensemble de particules tel qu'il soit possible de les trier en N classes, chacune caractérisée par une taille d_i

β_i : la compacité propre d'un empilement constitué uniquement de particules de la classe i.

• Cas d'un mélange sans interaction

Pour définir la compacité γ d'un mélange de particules, De Larrard considère qu'il existe toujours une classe de particules dominante jouant le rôle de matrice.

Si i est la classe dominante, dans ce cas, parmi toutes les inégalités (Eq. 1-14), il y aura nécessairement une égalité :

$$\varphi_i = \beta_i \left(1 - \sum_{j=i+1}^N \varphi_j \right) \quad \text{Eq. 1-15}$$

L'absence d'interaction se traduit par le fait qu'au sein de l'espace qui lui reste la classe dominante puisse atteindre sa compacité propre. Pour déterminer la classe dominante d'un mélange, De Larrard définit une compacité virtuelle de mélange γ_i , en considérant chaque classe i comme dominante. Cette compacité est alors égale :

$$\gamma_i = \frac{\beta_i}{1 - \sum_{j=1}^{i-1} y_j - (1 - \beta_i) \sum_{j=i+1}^N y_j} \quad \text{Eq. 1-16}$$

Où y_i est la proportion volumique de la classe i, définie par :

$$y_i = \frac{V_i}{\sum_{j=1}^N V_j} \quad \text{Eq. 1-17}$$

La compacité finale du mélange est alors le minimum des compacités γ_i calculées en (Eq. 1-17 ci-dessus).

A partir de la formule théorique de compacité virtuelle (Eq. 1-16), on constate que la compacité virtuelle ne dépend que de la caractéristique propre du matériau dans le mélange. En réalité, la compacité dépend non seulement du matériau mais également du mode de mise en place. Pour décrire la dépendance entre la compacité et le protocole de compaction, De Larrard a introduit un paramètre appelé : indice de serrage « K » et développé le modèle d'empilement compressible [De Larrard. 2000]. Ce modèle permet de déterminer la compacité réelle d'un mélange connaissant sa compacité virtuelle et l'indice associé au protocole de compaction. L'expression du modèle est présentée par l'équation suivante :

$$K = \sum_{i=1}^n \frac{\frac{y_i}{\beta_i}}{\frac{1}{\Phi} - \frac{1}{\gamma_i}} \quad \text{Eq. 1-18}$$

Avec ;

- K : indice de serrage qui ne dépend que du protocole (ou de l'énergie) de compactage
- Φ : compacité réelle du mélange de n classes

Pour un empilement de grains de même taille, K prend la forme suivante :

$$K = \frac{1}{\frac{\beta}{\Phi} - 1} \quad \text{Eq. 1-19}$$

Pour prendre en compte les interactions entre les particules, on considère le cas d'un mélange avec interaction et le cas d'un mélange quelconque.

- Mélange binaire avec interaction :

Si les classes de particules ne vérifient pas la condition de « nettement différentes », il est nécessaire de tenir compte des interactions géométriques entre les particules appartenant à différentes classes granulaires. Deux types d'interactions géométriques sont pris en compte : l'effet de desserrement et l'effet de paroi [De Larrard, 2000, Tran, 2009].

- Cas d'un mélange quelconque :

Dans le cas d'un mélange à N classes de particule, la fraction volumique de la classe i supposée dominante correspond à la compacité de la classe i prise seule dans le volume laissé entre les grosses particules, en tenant compte de l'effet de desserrement et celui de paroi.

Au final, le système à résoudre pour déterminer la compacité d'un mélange de particules doit satisfaire les relations suivantes :

$$\gamma = \min_{1 \leq i \leq N} \gamma_i \quad \text{Eq. 1-20}$$

$$\text{Avec } \gamma_i = \frac{\beta_i}{1 - \sum_{j=1}^{i-1} y_j \left(1 - a_{ij} \frac{\beta_i}{\beta_j} \right) - \sum_{j=i+1}^N y_j \left(1 - b_{ij} \beta_i \left(1 - \frac{1}{\beta_j} \right) \right)} \quad \text{Eq. 1-21}$$

1.1.9 Valorisation dans le secteur de la briqueterie

Le potentiel minéral des sédiments de dragage peut être valorisé en fabrication de briques par traitement thermique [Lafhaj *et al.* 2007, Hamer et Karius, 2002] Des travaux de faisabilité [Hamer et Karius, 2002] ont pu montrer que la fabrication des briques à partir de la substitution des sédiments marins est réalisable. Les sédiments sont optimisés pour produire des briques de qualité sans impact environnemental sur leur milieu. Cependant la fabrication

de la brique émet beaucoup d'oxydes de soufre dans les gaz échappés pendant le processus de fabrication. Aussi, des traitements contre l'efflorescence par l'ajout de carbonate de baryum ($BaCO_3$) au sédiment brut sont essentiels [Hamer et Karius, 2002].

Dans la Figure 1.12, le schéma du cycle de synthèse des briques est présenté [Hamer et Karius, 2002] :

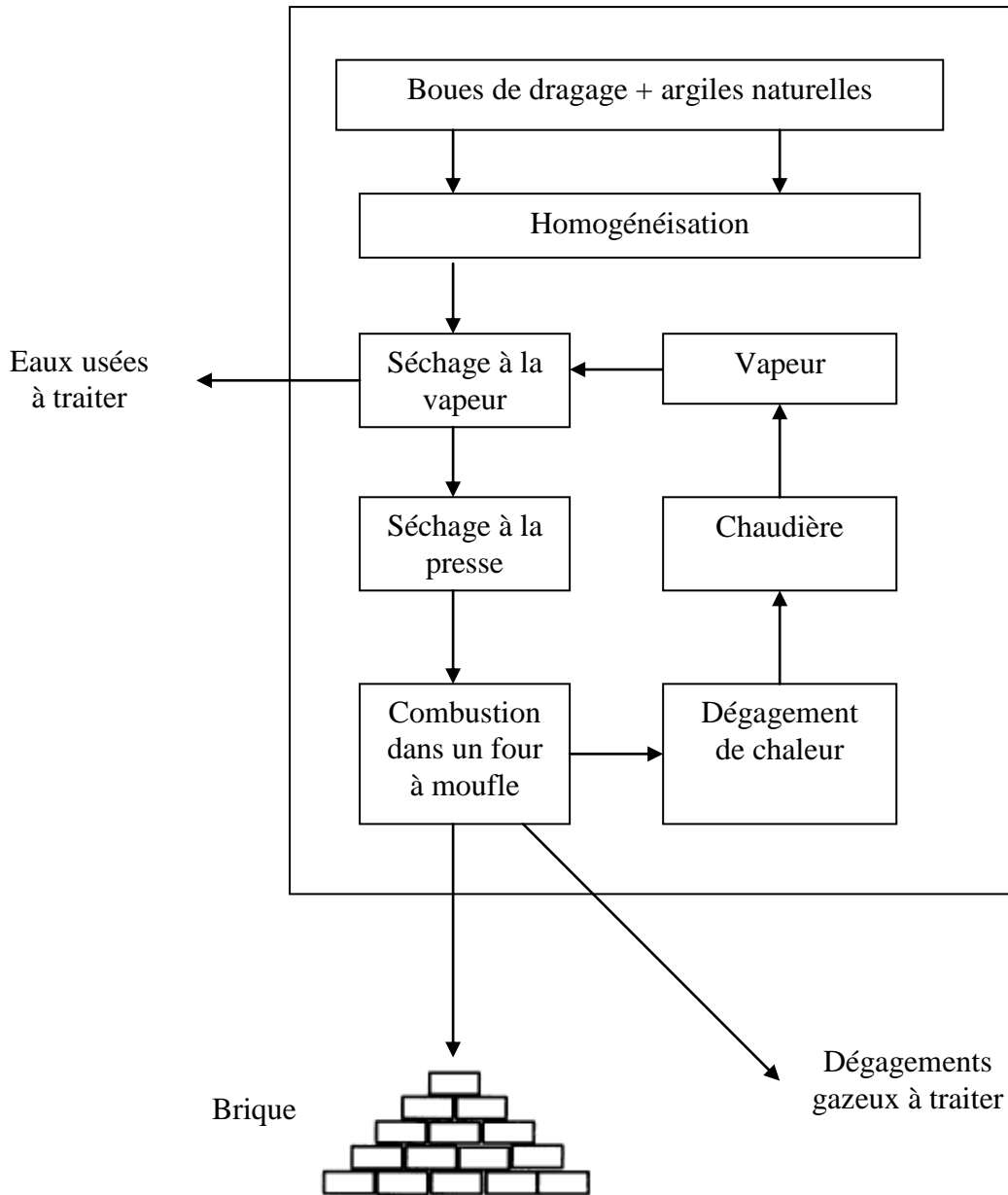


Figure 1.12 : Chaîne de production de briques avec substitution de sédiments de dragage à 35%. [Hamer et Karius, 2002]

1.1.10 Fabrication de clinker à base des sédiments

Le concept théorique de la technique de fabrication du clinker à partir des sédiments est du point de vue technique possible. Ainsi on trouve dans la littérature des recherches qui l'ont montré expérimentalement [Agostini *et al.* 2007]. En plus, [JL. Dalton *et al.* 2004] ont montré qu'avec la substitution de sédiments de dragage on peut fabriquer des silicates

tricalciques (Figure 1.13). Les composés essentiels du ciment avec les meilleures performances (hydratation rapide, résistance acquise à jeune âge).

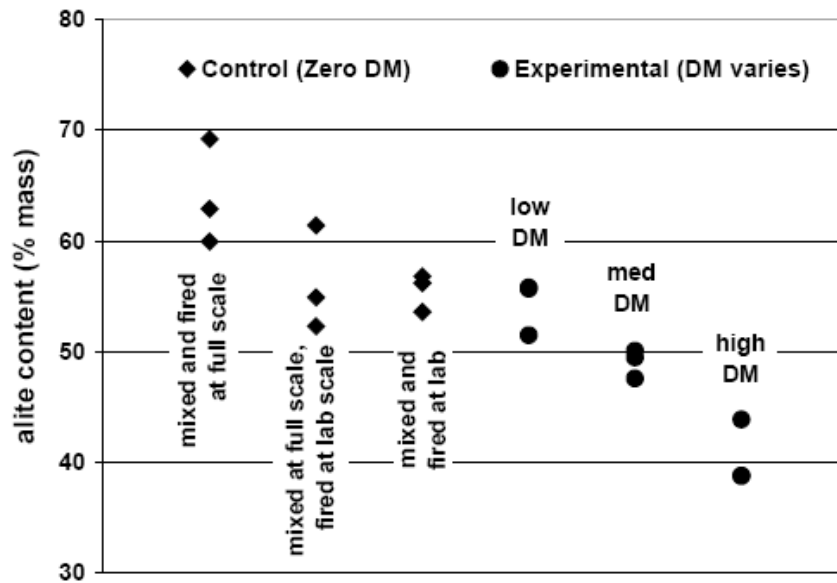


Figure 1.13: Pourcentage de l'alite dans du clinker à base de sédiment de dragage [Dalton, et al. 2004]

Cependant, la problématique pour ce type de matériau est la faible réactivité des minéraux en présence. Les déchets industriels ont souvent des composés minéraux (quartz, feldspaths) peu réactifs et qui nécessitent d'importantes températures de cuisson comme le montre le diagramme de la Figure 1.14.

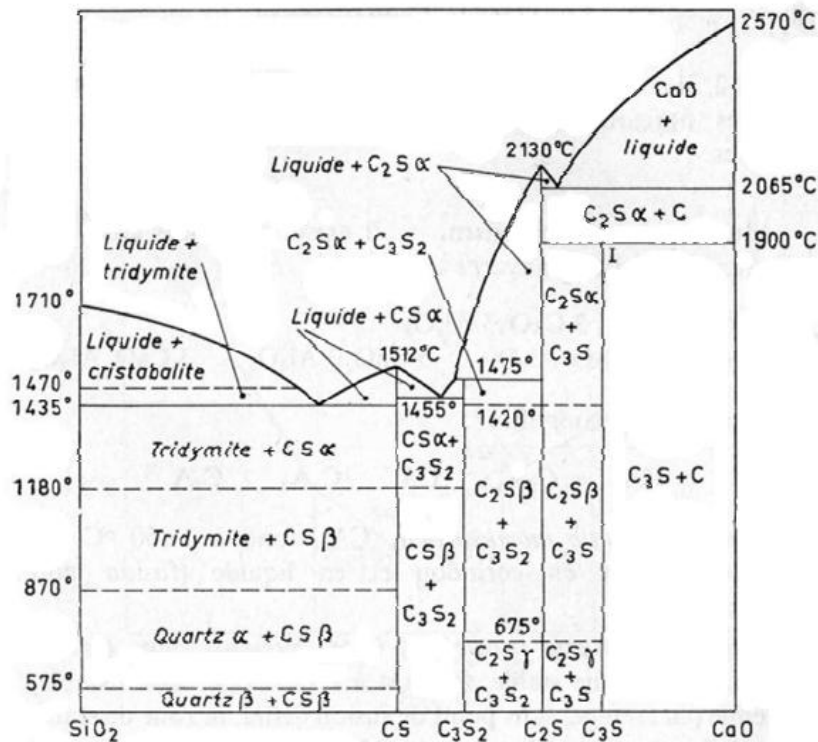


Figure 1.14: Diagramme binaire CaO-SiO₂ des phases [Taylor, 1992]

Ainsi, dans le diagramme ci-dessus, en changeant les proportions de silice et chaux on peut former des éléments réactifs à des températures différentes (β -C2S à 1200°C).

1.1.11 Valorisation dans le secteur de fabrication des granulats

Les quantités importantes de sédiments générées chaque année doivent être gérées dans des conditions respectueuses de l'environnement [Arrêté 4 juillet 2008, Projet sédimatériaux 2010]. Dans le même temps, en Génie Civil, on continue de puiser dans les ressources naturelles en utilisant en grande majorité des matériaux naturels (*Figure 1.15*) en génie civil. Particulièrement, l'industrie routière consomme des quantités considérables de granulats dont seulement 7% d'origine marine (UNPG, 2007).

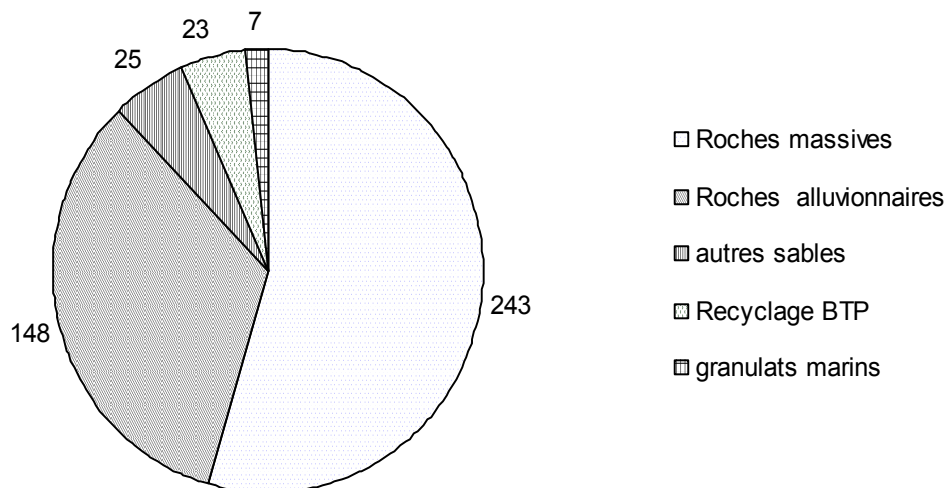


Figure 1.15: Sources des granulats en millions de tonnes en 2007 d'après UNPG (2007)

La valorisation des sédiments de dragage en techniques routières repose donc sur deux opportunités : réussir une gestion durable de déchets (les sédiments) et assurer un approvisionnement permanent en matériaux pour le secteur de génie civil. En plus, ce mode de gestion s'avère économiquement intéressant pour les gestionnaires portuaires ainsi que pour les maîtres d'ouvrages.

En France, la construction d'équipements collectifs, d'ouvrages d'art, d'infrastructures routières, consomme en moyenne 450 millions de tonnes de granulats provenant essentiellement de gisements terrestres (Figure 1.15).

La politique de l'État, en ce qui concerne ces extractions, vise à réduire de 50% la quantité des matériaux d'origine alluvionnaire terrestre d'ici 5 ans, en y substituant des granulats extraits des fonds marins [MEEDDM, 2007].

Dans le cas des sables marins, ils peuvent être utilisés directement comme granulats. Mais également, les sédiments fins ont fait l'objet de plusieurs travaux pour la confection de granulats [Brakni, 2009, Zri, 2010].

1.1.12 Valorisation dans le secteur de la fabrication du béton

Le bloc de béton ou le parpaing, est un béton à faible dosage en fines. Il est composé de 85% de granulats de 7% de ciment, de faible teneur en eau et de superplastifiant pour faciliter le moulage. Les classes de résistances maximales définies par la réglementation sont limitées à 16 MPa. Les sédiments de dragage contenant des minéraux pourraient être

incorporés dans la fabrication de parpaings. Une partie de la présente thèse discute la possibilité de la valorisation des sédiments de dragage en bloc de béton après la stabilisation des sédiments

Au terme de cette étude, pour les secteurs de valorisation discutés, les caractéristiques de base à mesurer sont reportées dans le Tableau 1.13. Dans cette synthèse, les critères de choix de filière de destination sont regroupés en fonction du domaine de valorisation envisagé.

Techniques et essais		Technique routière	Granulats	Bétons	Briques	Liants	Autres
Analyses Physiques	Teneur en eau	x	x	x	x	x	x
	Granulométrie	x	x	x	x	x	x
	Matière organique	x	x	x			
	Liquidité et plasticité	x	x				
	Argilosité	x					
Comportement mécanique	Compacité	x	x	x	x	x	x
	Sollicitation de traction et de compression	x	x	x			
	Dureté et fragmentabilité	x	x				
	Gonflement	x					
Analyses environnementales	Lixiviation (L/S=10)	x	x	x	x	x	x
Analyses minéralogiques	DX	x	x	x	x	x	x
	FX	x	x	x	x	x	x
	MEB	x	x	x	x	x	x

Tableau 1.13: Outils de décision pour la valorisation des sédiments

1.1.13 Conclusion

Que ce soit dans les ports maritimes et des ports d'estuaires, le bilan de dragage en France fait apparaître une quantité considérable de matériaux fins. Les vases représentent, en général, 75% environ des sédiments de dragage totaux [Boutouil, 1998]. Quant au niveau de contamination des sédiments, il reste très variable selon les sites de prélèvement.

En termes de réglementation, tant européenne que française, la problématique des sédiments pollués est assez peu abordée et surtout de façon non spécifique. Seuls les «niveaux Geode » donnent une définition claire de ce qu'est un sédiment pollué et un sédiment non pollué. En revanche, l'absence est totale au niveau des réglementations de la valorisation des sédiments de dragage après leur traitement. Le besoin d'un cadre réglementaire est évident pour permettre d'évaluer l'efficacité des procédés de valorisation des matériaux traités, notamment dans le domaine du génie civil (routes, remblai,...).

Cependant, comme nous l'avons montré, les sédiments sont généralement fins. Pour renforcer la structure du matériau, il est nécessaire de sélectionner également une source de granulat économique. Dans la partie qui suit, nous allons décrire deux types de laitiers d'aciérie utilisés comme ajout granulaire dans le cadre des travaux du chapitre 4.

1.2. Les laitiers d'aciérie

En sidérurgie, le laitier est un sous-produit de la métallurgie. Ces matériaux sont générés en même temps que la fonte de fer (cas des laitiers de haut-fourneau) ou que l'acier (cas des laitiers d'aciérie), sous forme liquide à 1500°C environ : ils en sont les « coproduits ». Les principales utilisations des laitiers sont le bâtiment et les ouvrages d'art.

Les laitiers sont donc issus d'un processus thermique à haute température. Ils ne peuvent contenir de matières organiques. Le laitier contient des oxydes métalliques, essentiellement des silicates, des aluminates et de la chaux, qui sont formés en cours de fusion ou d'élaboration de métaux par voie liquide.

La production française de granulats de laitiers est, en France pour 2005, de 2 080 000 tonnes, pour 51 847 000 euros, dans 10 entreprises.

1.2.1. Classement selon la source des laitiers

Les laitiers peuvent être classés en 3 catégories selon leurs sources de provenance comme il est montré dans le diagramme de la Figure 1.16. On peut distinguer les laitiers de haut fourneau HF, les laitiers d'aciérie et les laitiers électriques.

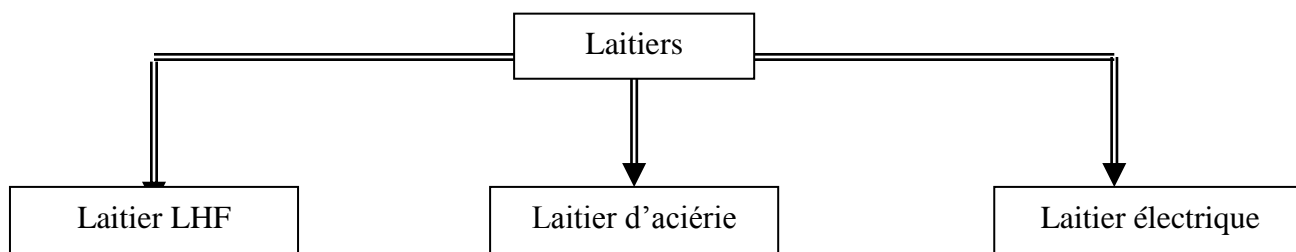


Figure 1.16: Classification des types de laitiers

1.2.1.1. Laitier de haut fourneau HF

Le laitier de haut-fourneau HF est un produit issu de la fabrication de la fonte. Il correspond à la gangue de minerai de fer rejetée de la fonte liquide par flottation (Figure 1.17). Ce sont des phases solides de couleur jaune/beige. Les principaux composants chimiques de ces laitiers sont la chaux (CaO, 40% environ), la silice (SiO₂, 35% environ), l'alumine (Al₂O₃, 11% environ) et la magnésie (MgO, 8% environ). Le laitier d HF est souvent utilisé comment ajout dans le clinker pour la fabrication des ciments à ajouts : Ciments au laitier et aux cendres ou ciment composé noté CEM V.

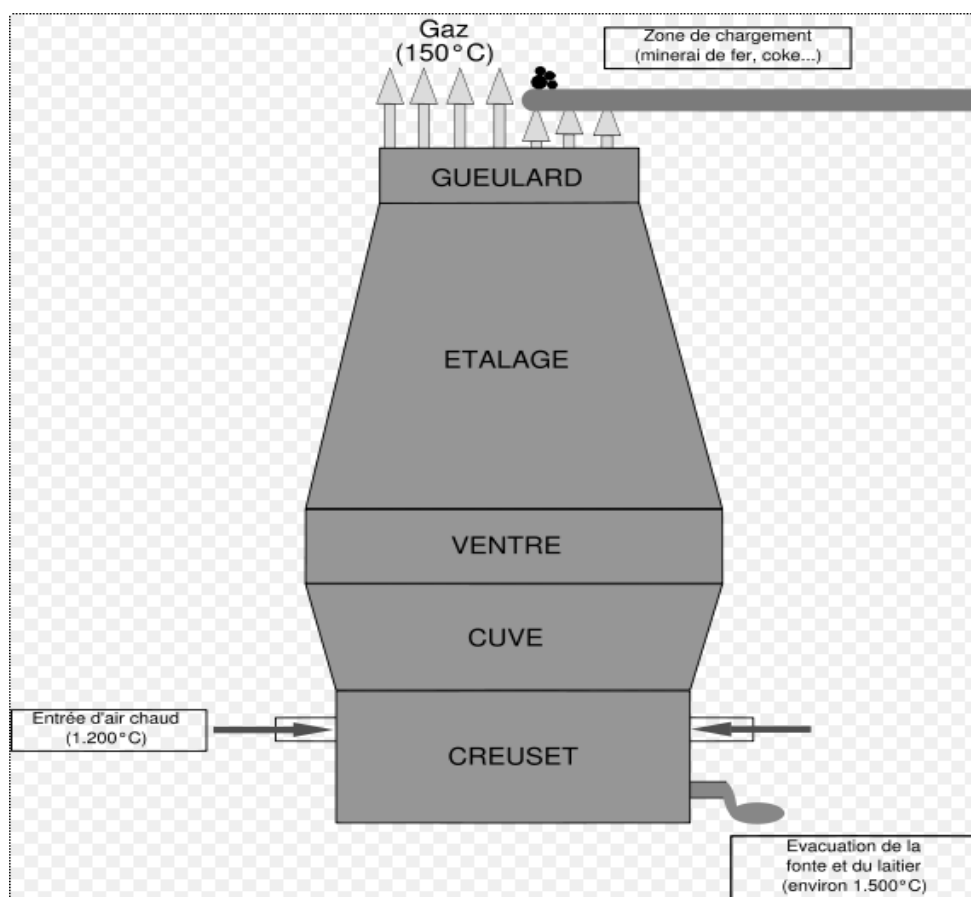


Figure 1.17: Schéma descriptif d'un haut fourneau

1.2.1.2. Laitier d'aciérie LD

Après la séparation des laitiers LHF et de la fonte, on place celle-ci dans une sorte de cuve pour la convertir en acier : c'est l'affinage. En effet, la fonte, très riche en carbone, est trop fragile pour de nombreuses applications. Il est donc nécessaire de réduire ce taux de carbone. La méthode la plus courante consiste à injecter de l'oxygène dans le convertisseur dans lequel on aura placé la fonte en fusion et des ferrailles de récupération. On peut ajouter des réactifs comme la chaux, qui permet une meilleure oxydation des éléments dissous dans le fer liquide, ces derniers ayant la propriété d'être plus facilement oxydables que le fer.

Une réaction violente se produit durant laquelle le carbone se combine à l'oxygène. Lorsque le taux de carbone souhaité est atteint dans le bain en fusion, on ajoute divers produits chimiques dans le convertisseur pour obtenir la nuance d'acier souhaitée. On obtient un laitier d'aciérie de conversion : mélange des minéraux présents dans la fonte et de ce qui a été ajouté pour obtenir la nuance d'acier élaborée. Ce laitier est communément appelé laitier d'aciérie de conversion LD en français ou BOF slag en anglais (Basic Oxygen Furnaste Slag).

La chaux joue un rôle très important dans l'oxydation des composés. En effet, les composés « parasites » ont une affinité plus ou moins marquée pour l'oxygène. La chaux sert donc à mieux fixer dans le laitier les éléments parasites pour l'acier et ainsi, obtenir un acier plus pur. Généralement, on utilise de la chaux magnésienne pour protéger les briques réfractaires présentes dans le convertisseur. Cela permet également de réduire l'acidité du laitier.

Lorsque l'opération de conversion est terminée, on sort l'acier du convertisseur vers une cuve (dite "poche"). Le laitier, plus léger, et qui surnage au-dessus de l'acier, est déversé dans un "cuvier" et est transporté dans un parc, où il est vidé dans une fosse. Comme pour le laitier LHF, on le refroidit violemment par aspersion d'eau. On obtient ainsi une roche artificielle, qui peut être concassée et criblée comme dans une carrière pour produire des granulats.

La production annuelle moyenne est de 1 100 000 tonnes de laitiers par an en France. Chaque tonne d'acier génère environ de 100 kg de laitier.

Figure 1.18 Elaboration de l'acier liquide par la filière convertisseurs à oxygène

Suivant le lieu d'arrivée de l'oxygène, on obtient 2 types de laitiers.

Les laitiers LD Linz-Donowitz avec l'affinage à l'oxygène par le haut du convertisseur

Les laitiers LWS Loire-Wendel-Sprunck avec l'affinage à l'oxygène par le fond du convertisseur.

1.2.1.3. Le laitier électrique

On appelle laitier électrique la croûte qui se forme sur le bain de la soudure. Il protège ce bain de l'oxygène de l'air, et l'isole thermiquement. Dans le soudage à l'électrode enrobée, c'est l'enrobage qui va, en fondant, créer le laitier. On distingue alors les électrodes en fonction de leur enrobage:

- enrobage basique (riche en chaux), dont la mise en œuvre est difficile, mais qui assure une excellente résistance mécanique,
- enrobage acide (riche en silice), à l'utilisation plus facile.

1.2.2. Composition des laitiers :

1.2.2.1. Composition minéralogique

La composition des laitiers varie en fonction des techniques d'affinage utilisées dans les aciéries, de la teinte de l'acier, et des différentes usines. Les valeurs habituellement obtenues pour des laitiers LD sont données dans le Tableau 1.14.

Constituants	Teneur en %
Fe _{tot.} (Fer total)	20-25
SiO ₂ (oxyde de silicium)	10-15
CaO (oxyde de calcium ou chaux)	40-45
MnO (oxyde de manganèse)	5-7
MgO (oxyde de magnésium)	2-8
P ₂ O ₅ (pentoxyde de phosphore)	2-3
Al ₂ O ₃ (oxyde d'aluminium)	1-2
Cr ₂ O ₃ (oxyde de chrome)	0,1-0,3
S (soufre)	0,05
CaO libre (chaux libre)	2-10

Tableau 1.14: Composition des laitiers

La quantité de chaux dans les laitier peut être sous la forme hydratée Ca(OH)₂ ou de la chaux vive confinée dans les grains [Waligora et al. 2010]

Comme montré dans la Figure 1.19, la composition des laitiers les classes comme matériaux siliceux avec un pourcentage important de chaux (Figure 1.19).

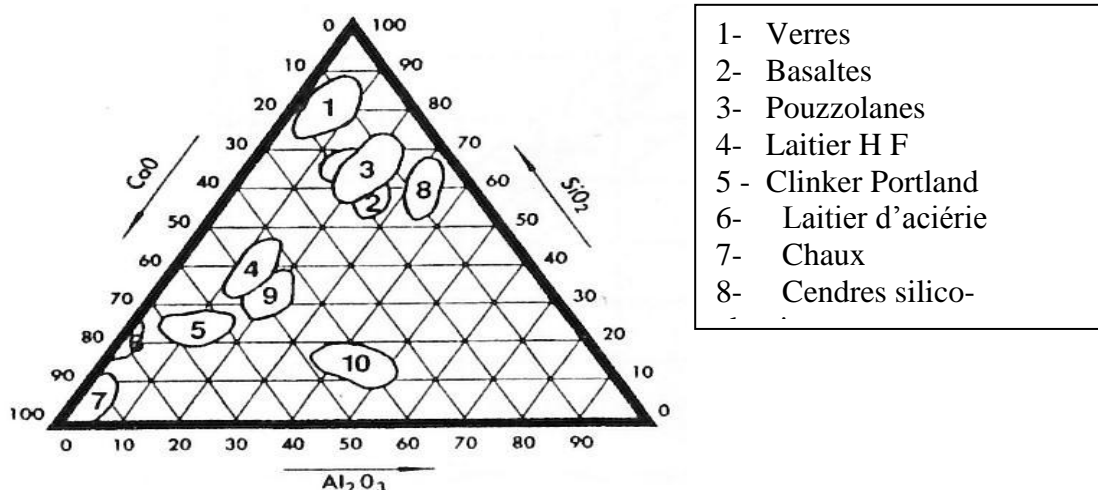


Figure 1.19 : Diagramme ternaire CaO - SiO₂ et Al₂O₃ [Boudonnet, 1994]

Les laitiers LD sont situés entre la chaux et le clinker dans un diagramme ternaire (Figure 1.19). Ils contiennent au même temps des phases minérales comme la chaux et les silicates.

1.2.2.2. Caractéristiques physiques

En l'état, après une période de vieillissement de trois mois, c'est un tout venant dont la granulométrie est de l'ordre de 0/30 mm. Après diverses opérations de concassage-criblage il peut, selon la demande, être proposé sous une large gamme de fractions granulométriques 0/D et d/D.

1.2.3. Statut réglementaire

Les laitiers d'aciérie de conversion ne présentent pas de risque relatif au relargage de métaux lourds par lixiviation. Pour des utilisations en immersion, il est nécessaire de porter une attention particulière à la basicité de ces matériaux. Dans le Nord-Pas-de-Calais, dans l'attente d'une prochaine réglementation nationale qui devrait définir les règles

environnementales d'usage en matière de valorisation des Résidus des Procédés Thermiques (R.P.T), les services administratifs compétents autorisent l'utilisation des laitiers sous réserve de la mise en place d'un plan d'assurance qualité, visant notamment à démontrer leur stabilité volumique, dont les modalités sont fixées par arrêté préfectoral. Dans ce cadre, sur chaque lot de production ou sur un échantillon correspondant à 15 jours de fabrication, si le lot de production excède cette durée, le producteur procède à une analyse sur le laitier brut et sur le lixiviat obtenu selon la norme XP 31-210 [PREDIS Nord Pas de Calais, 2002].

1.2.4. Domaine d'utilisation

Depuis plus de 100 ans, le laitier est employé comme composant du ciment et du béton. Depuis longtemps, déjà, les ciments contenant du laitier LHF sont utilisés dans les ouvrages marins. Aujourd'hui, le laitier de haut fourneau granulé est de plus en plus employé dans la fabrication du ciment de laitier non seulement pour produire le béton traditionnel, mais aussi des bétons à hautes performances. La composition chimique du laitier a connu une évolution au fil des années, le procédé métallurgique utilisé dans les hauts fourneaux ayant évolué lui aussi. A l'heure actuelle, les hauts fourneaux sont chargés de pellets de minerai de fer de composition chimique particulièrement constante, ce qui permet aux laitiers modernes d'avoir une composition chimique assez stable. Bien que certains aspects du béton contenant du laitier, tels que la résistance au gel/dégel et le retrait, fassent toujours l'objet de différentes thèses, l'emploi du laitier dans la production des bétons normaux et à hautes performances offre plusieurs avantages. La plupart des propriétés du béton frais et durci sont améliorées par la présence du laitier, notamment si celui-ci est utilisé avec un superplastifiant et avec des fumées de silice ou une cendre volante. La substitution du laitier dans le ciment est également avantageuse pour l'environnement, parce qu'elle accroît la valeur d'un sous-produit. Lorsqu'il est techniquement possible, on peut utiliser le laitier pour la fabrication du clinker de ciment Portland comme source de CaO , SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3 . Un tel emploi permet de réduire les émissions de CO_2 , car pendant la combustion une petite quantité de carbonate de calcium doit être dissociée afin de récupérer la teneur en chaux de 40% présente dans le laitier. Dans ce cas, le laitier ne doit pas être nécessairement vitreux, mais l'on peut utiliser du laitier cristallisé. L'utilisation du laitier sert aussi à apporter les avantages technologique, économique et environnemental.

1.2.4.1. Utilisation des laitiers en techniques routière

La technique routière est un domaine d'application très attractif pour les laitiers LD. Ceci se justifie par le fait qu'ils présentent des propriétés physiques et mécaniques équivalentes voire supérieures à celles des granulats naturels habituellement utilisés en technique routière.

Les laitiers LD, possèdent des caractéristiques mécaniques équivalentes à des graves de carrières. A titre comparatif, on présente dans le Tableau 1.15 une comparaison des caractéristiques des laitiers d'aciérie avec celle de granulats naturels couramment utilisés.

Paramètres	Laitier LD	Basalte	Granite	Calcaire
Masse volumique absolue (t/m ³)	3,1-3,9	2,8-3,1	2,6-2,8	2,7-2,8
Porosité connectée (%)	5-24	0,2	-	4,3
Los Angeles (%)	10-20	15	15-20	22
Micro-Deval	6-12	10	10	15
Coefficient de polissage accéléré	0,45-0,65	0,45	0,55	0,44
Résistance à la compression (MPa)	>100	>250	>120	-

Tableau 1.15 : Propriétés physiques et mécaniques des laitiers
(- : non renseignée)

Cependant, les caractéristiques de laitiers à long et à moyen terme défavorisent la stabilité de la chaussée par le phénomène du gonflement généré par la présence de la chaux et de la magnésie (éléments qui gonflent par carbonatation à 30% vol.). De ce fait, il est nécessaire de procéder à une stabilisation pour pouvoir les utiliser en technique routière.

Pour évaluer le gonflement des laitiers, plusieurs essais ont été développés (essais accélérés à la vapeur). Une étude réalisée par Dao et al. [2008] sur des laitiers LD, met en évidence le gonflement (Figure 1.20) généré par l'hydratation de la chaux et de la magnésie.

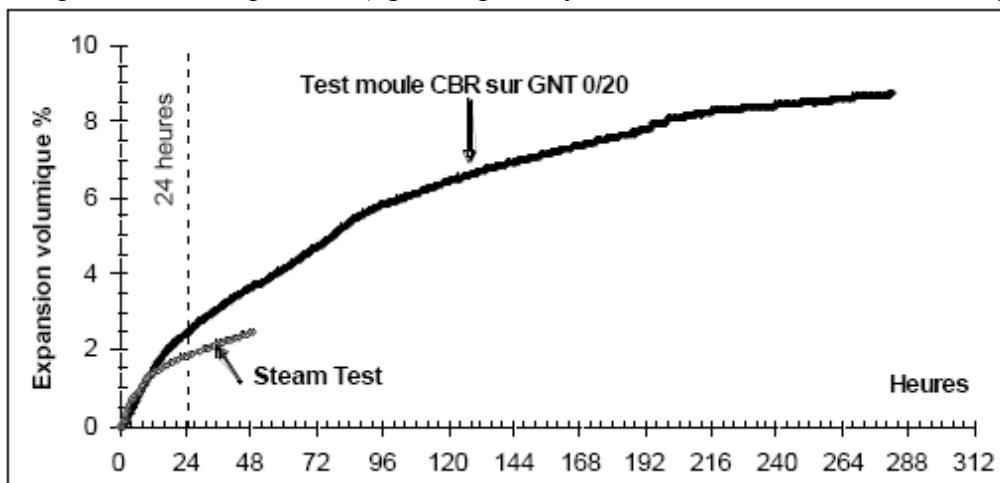


Figure 1.20 Expansion à la vapeur d'un laitier
(Norme NF EN 1744-1 et moule CBR)

On remarque que les laitiers possèdent un potentiel d'expansion inférieur aux valeurs limités aux travaux routiers (5%) par rapport à l'essai au moule CBR préconisé pour les routes. L'essai de gonflement à la vapeur reste comparable avec le gonflement dans le moule CBR sur les premières 4 heures. Cependant, le gonflement à la vapeur est croissant. Ceci peut engendrer des problèmes d'instabilité des laitiers en cours du temps. Dans cette étude, les sédiments diminuent le gonflement des laitiers.

1.3. Conclusions

Plusieurs voies de valorisation où les sédiments de dragage peuvent être réemployés sont identifiées. Les composés des sédiments de dragage leur offrent l'intérêt à les utiliser dans des matériaux à savoir du clinker, des briques ou des granulats. Néanmoins, les

sédiments de dragage possèdent des caractères néfastes, pour lesquelles ils doivent subir un traitement. En effet, les sédiments possèdent une moyenne de 10% de matière organique, des polluants comme les métaux lourds ou des chlorures. Ces teneurs en polluants doivent être allégés par des traitements avant toute valorisation du matériau.

Les laitiers présentent des caractéristiques mécaniques et environnementales intéressantes pour leur emploi en technique routière. En plus le phénomène du gonflement peut être cerné par la consommation de la chaux vive par le sédiment.

Dans ce sens, les laitiers d'aciérie produits peuvent faire une meilleure alternative d'étude de point de vue économique (laitiers LD plus abondants que les laitiers LHF et moins coûteux) et technique. De point de vue environnemental, les laitiers LD, sont des déchets inertes. Cependant selon le type d'acier conçu, quelques traces de chrome (Cr) et de vanadium (V) peuvent être détectées.

L'étude expérimentale sera réalisée sur deux types de laitiers LD : LD1 et LD2. Le premier type présente une teneur en chaux de l'ordre de 6% et le second contient plus que 12% de chaux.

CHAPITRE 2

CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX UTILISÉS

Chapitre 2 Caractérisation des matériaux utilisés

2.1 Caractérisation des sédiments de dragage

Dans ce travail, en premier lieu une caractérisation globale des matériaux étudiés est entreprise. La méthodologie de caractérisation n'étant pas prioritairement orientée vers un domaine d'utilisation spécifique. Le but est ainsi d'étudier globalement les matériaux utilisés afin d'explorer le potentiel de valorisation des sédiments de dragage.

Les sédiments sont prélevés du Port Autonome de Dunkerque (PAD), un des sites portuaires important en région Nord Pas-de-Calais, et troisième port français en termes d'activités. Le Port de Dunkerque est réputé comme port de grands vracs destinés à des nombreuses implantations industrielles dans la zone portuaire de Dunkerque. Il s'illustre également sur d'autres segments tels le roulier transmanche sur la Grande-Bretagne, les conteneurs et les cargaisons. Son étendue en fait une source de quantités importantes de sédiments de dragage.

Les sédiments, après prélèvements, sont conditionnés dans des fûts hermétiques en plastiques de 60 litres dans les mêmes conditions. Ce choix est destiné à garder les sédiments aux mêmes états pour pouvoir comparer le comportement des sédiments durant l'étude réalisée.

Dans un premier temps, on a procédé à une caractérisation des sédiments afin de connaître les comportements physiques, chimiques et mécaniques. Cette étude a été complétée par une étude d'impact environnemental. De ces résultats, l'opportunité des différentes voies de valorisation des sédiments est discutée. Les essais de caractérisation ont été réalisés sur deux prélèvements de sédiments du PAD est. Le premier est prélevé en juin 2006 au niveau du bassin Freycinet et noté S1. Le second prélèvement S2, a eu lieu en juin 2008 au bassin d'Evolution comme présenté dans la *Figure 2.1*.



Figure 2.1: Zone du prélèvement Port Autonome de Dunkerque

Dans ce chapitre, une étude comparative a été menée sur les deux sédiments S1 et S2 dans le but d'étudier l'effet de la teneur en eau initiale, la composition, la distribution granulométrique sur le comportement du sédiment essentiellement en cours du processus du séchage détaillé dans le chapitre 3. Cette étude, nécessite une identification des caractéristiques globales des sédiments. Toutefois, le sédiment S1 a été sélectionné pour être utilisé pour les traitements ultérieurs (cf. Chapitre 4), des analyses complémentaires ont été réalisées. Le choix du sédiment S1 est essentiellement dû à la qualité du sédiment S1 moins polluants et aussi les stocks ont été suffisants pour l'étude détaillée dans le chapitre 4 avec le même échantillon.

2.1.1 Caractéristiques physiques

2.1.1.1 Teneur en eau des sédiments bruts

Après le dragage, les sédiments sont sous la forme d'une vase, et contiennent une part importante d'eau répartie sous plusieurs formes. Cependant la quantité d'eau est très variable et dépend essentiellement de la méthode de dragage et du type de matériau dragué.

Deux séries de mesures ont été réalisées sur ces deux (*Figure 2.1*). Le séchage du matériau est réalisé par étuvage à 40°. La teneur en eau est calculée après une stabilisation de la masse de l'échantillon à l'étuve (Norme NFP 94-050) et exprimée en pourcentage. Les résultats des mesures sont rapportés dans le Tableau 2.1 ci-dessous :

Echantillons	S1 (%)	S2 (%)
E1	217,65	103,82
E2	217,52	102,47
E3	218,45	101,9
Moyenne	217,86	102,73

Tableau 2.1: Mesure de la teneur en eau des sédiments S1 et S2 (Etuvage à 40°C)

Comme le montrent les résultats, les teneurs en eau peuvent être variables d'un prélèvement à l'autre. Ceci dépend du mode de prélèvement, du conditionnement et du type de sédiment. Dans la présente étude, les zones de prélèvement sont différentes. L'activité dans chaque zone ainsi que les courants d'eau génèrent des sédimentations différentes. Quant aux conditions de conservations des sédiments sont identiques.

Un deuxième séchage a été réalisé à 105°C. Il est observé que la valeur est légèrement supérieure à celle enregistrée pour un séchage à 40°C. Ceci pourrait s'expliquer par la destruction d'une partie de la matière organique ou d'autres éléments volatils à cette température.

Echantillons	S1 (%)	S2 (%)
E1	222,25	106,04
E2	223,08	106,18
E3	222,15	103,16
Moyenne	222,49	105,22

Tableau 2.2: Mesure de la teneur en eau des sédiments S1 et S2 (Etuvage à 105°C)

A titre de comparaison, nous avons donné les teneurs en eau mesurées sur les sédiments du Port du Havre, du Port Autonome de Rouen, Cherbourg et ceux obtenus pour le Port de Dunkerque dans le cadre de la thèse de Tran, 2009 (Tableau 2.3). On remarque que les teneurs en eau mesurées sont toujours très élevées mais restent très variables d'un site à l'autre.

Etudes	Teneur en eau (%)
Dunkerque (Tran, 2009)	150
Cherbourg (Duan, 2008)	140
Rouen (Colin, 2003)	360
Le Havre (Boutouil, 1998)	160

Tableau 2.3 Teneurs en eau initiales de sédiments dans des ports à fortes activités en France

2.1.1.2 Etude quantitative de la matière organique

L'importance de la matière organique dans les sédiments de dragage nécessite une connaissance précise des taux en présence.

Dans cette étude, la quantification de la matière organique dans les sédiments a été réalisée par :

- des essais de perte au feu à différentes températures,
- des essais d'analyse thermogravimétrique (ATG),
- des essais chimiques par oxydation à l'eau oxygénée

a. Matière organique par calcination

Les essais de perte de masse ont été réalisés suivant la norme XP P94-047 sur un échantillon préalablement séché à 40°C. Dans ce paragraphe, l'effet de la température de calcination sur le résultat final a été étudié. Les résultats de la matière organique contenue dans les deux sédiments sont également comparés. Les résultats de perte de masse après deux heures de calcination sont reportés dans le Tableau 2.4.

Sédiment	S1		S2	
	450°C (%)	550°C (%)	450°C (%)	550°C (%)
Echantillons				
1	9,53	16,44	5,50	10,19
2	10,12	16,34	5,37	10,07
3	10,42	16,30	5,29	10,09
Moyenne	10,02	16,36	5,39	10,12

Tableau 2.4: Perte au feu des sédiments bruts calcinés à 450°C et 550°

De ces résultats, il apparaît que le sédiment S1 est beaucoup plus organique que le sédiment S2. La variation de masse est de l'ordre de 16% pour S1. Tandis que le taux de mobilisation massique pour S2 est de 10% seulement. Ceci reflète une différence importante dans les sédiments étudiés. Cette différence est liée à la composition des sédiments différente entre les deux types de sédiment.

La comparaison des résultats issus de deux températures différentes (450 et 550 °C) sur le sédiment S1 montre également une différence importante (Figure 2.2).

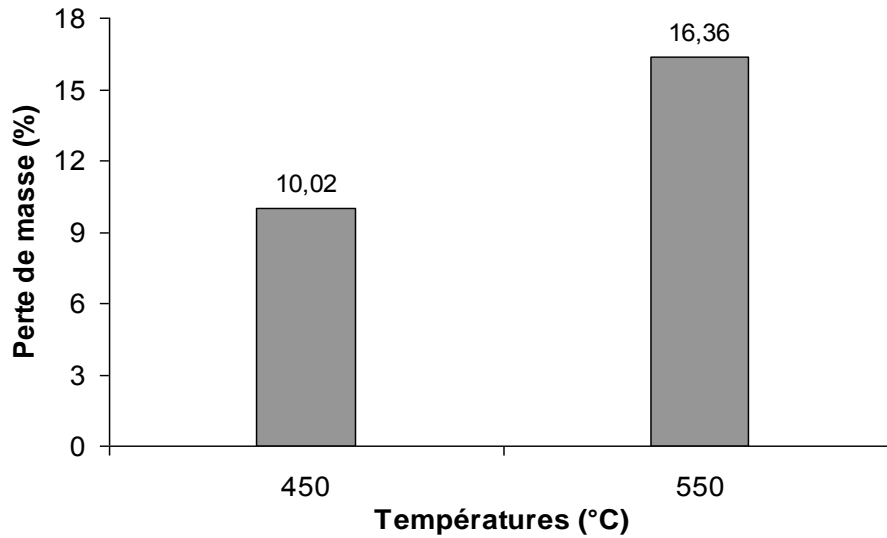


Figure 2.2: Récapitulatif des pertes au feu pendant 2 heures à 450 et 550°C

Ceci démontre la complexité de la définition de ce paramètre et la difficulté quant aux choix de la température de calcination. En effet, à ce niveau de température plusieurs composés organiques sont consommés. Mais une partie de la phase minérale est altérée. Dans ce but, on détaillera plus loin une analyse minéralogique en fonction des traitements thermiques appliqués à différentes températures.

b. Analyses thermogravimétriques

A titre de comparaison des techniques de mesures de la matière organique, une analyse thermogravimétrique a été réalisée sur le sédiment S1. La variation de la température a été réalisée selon une cinétique de calcination comme définie dans la Figure 2.3. On reporte dans cette dernière figure la variation de masse par rapport à la masse initiale en fonction du temps.

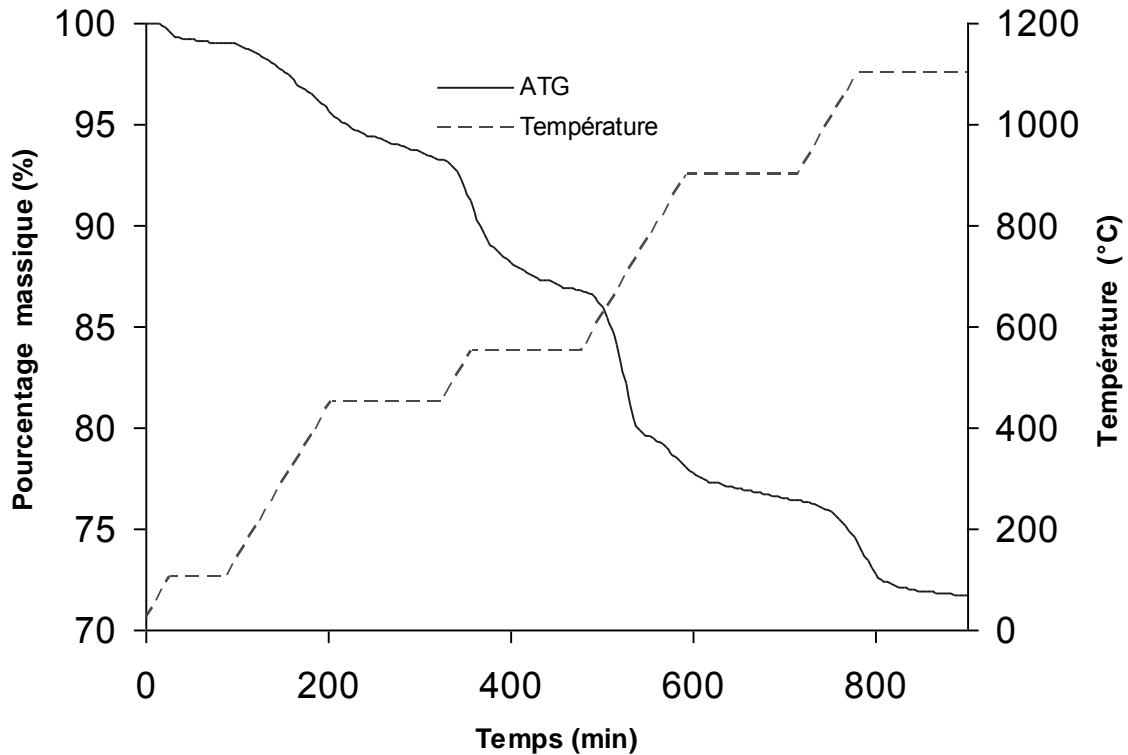


Figure 2.3: Analyse thermogravimétrique du sédiment S1

Il est à noter que la vitesse de montée en température pendant les rampes est de 3°C/min. Des paliers à température fixe ont été réalisés à 105, 450, 550, 900 et 1100°C. La variation de la masse du sédiment est faible au début de la calcination. Les sédiments ont été séchés avant l'essai. Une légère baisse est remarquée à la température de 105°C. La majorité de la partie organique est consommée à partir de 200°C. À partir de cette température, on remarque une accélération de la variation de masse jusqu'à la température de 400°C environ. Cette variation de masse est estimée à 9% de la masse initiale. On remarque ensuite une stabilisation à 450°C. À partir de 550°C, la variation de masse est importante de nouveau. Ceci s'explique par le début de la mobilisation des carbonates contenus dans les sédiments. Entre l'état initial et la température de 550°C, la perte de masse est de l'ordre de 14%. On remarque que les pertes de masse enregistrées par calcination dans un four à résistance électrique sont similaires à celles enregistrées par la technique de l'ATG comme montré dans le Tableau 2.5.

Températures (°C)	Pertes de masse (%)	
	Calcination	ATG
450	9,79	10,75
550	16,36	13,98

Tableau 2.5: Comparaison des résultats de calcination et d'ATG du sédiment S1

A partir de 550 °C et jusqu'à la température maximale de 1100°C, la masse continue à baisser. Cette perte est due à la décarbonatation.

c. Méthode à l'eau oxygénée

Cette méthode consiste à attaquer le sédiment sec à l'eau oxygénée selon la norme *NBN teneur en matière organique, §3 – Procédé de laboratoire à l'eau oxygénée*. La matière organique présente dans le sédiment sera oxydée par une solution à 30% d'eau oxygénée. L'échantillon étudié est réduit de la fraction passant au tamis de 2 mm. On y prélève 100 g pour chaque analyse. Ensuite l'échantillon est séché à l'étuve. Lors de cet essai, la préparation des échantillons a été réalisée selon deux températures d'étuvage, l'un à 40°C et l'autre à 105°C. Comme la norme est destinée à l'évaluation de la matière organique dans un sol quelconque, la température du séchage, ne devrait pas détruire la matière organique susceptible de résister à l'attaque acide.

A partir des résultats obtenus, la quantité de la matière oxydée est nettement inférieure à celle calcinée à 450°C (Tableau 2.6). Ce qui atteste d'une quantité de matière mobilisée seulement par calcination.

Le pourcentage de la matière organique oxydée passe de 4,46% pour les sédiments séchés à 40°C à 2,04% pour ceux séchés à 105°C. Une quantité de la matière humique est probablement altérée par une température entre 40°C et 105 °C. Ce point nécessite une étude particulière dans le futur.

Echantillons	Séchage 40°C		105°C	
	1	2	1	2
Masse initiale M1 (g)	100,00	100,00	100,00	100,00
Masse finale M2(g)	94,79	96,30	97,98	97,95
Δm (g)	5,21	3,70	2,02	2,05
Perte de masse (%)	5,21	3,70	2,02	2,05
Moyenne	4,46		2,04	

Tableau 2.6: Quantité de Matière organique par oxydée à l'eau oxygénée du sédiment S1

2.1.1.3 Teneur en carbone total

La mesure du carbone total permet d'estimer d'une autre façon la quantité de la matière organique du matériau [Mustin, 1987, Dubois, 2006].

Cette étude a été réalisée à l'aide d'un COTmètre de type TOC 5000 et de module SSM-5000A. Afin de faire un bilan des différentes formes de carbone, des analyses du carbone total ont été réalisées sur échantillons calcinés à différentes températures (Tableau 2.7).

Température °C	Teneur en carbone (%)
750	0,00
550	1,03
450	1,24
20	6,42
105	6,42

Tableau 2.7: Variation du CO en fonction de la température

A partir du Tableau 2.7, on pourra fournir une courbe approximative déterminant la perte du carbone en fonction de la température (Figure 2.4). Le carbone dans les sédiments est issu de deux sources : organique, contenu dans la matière organique et inorganique lié dans quelques minéraux (particulièrement les carbonates).

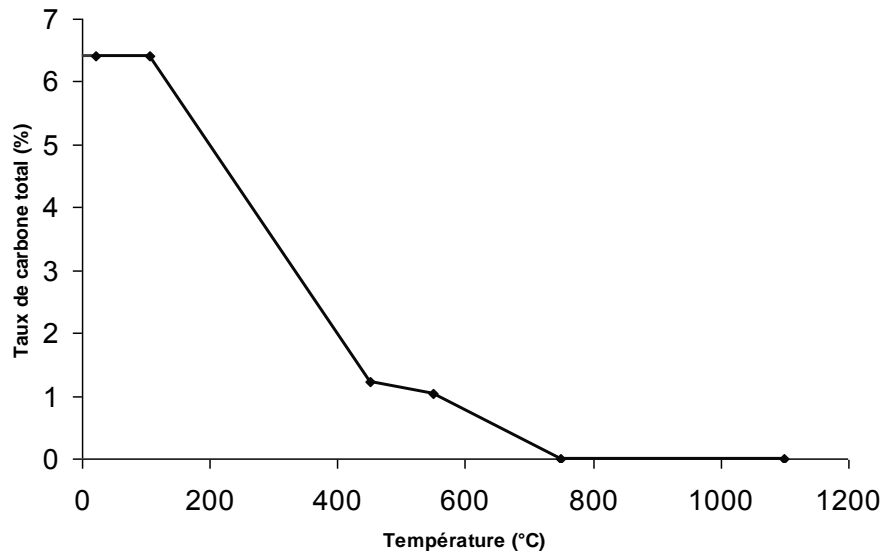


Figure 2.4: Evolution du % de carbone total en fonction de la température

La teneur en matière organique dépend du pourcentage du carbone présent dans le sédiment. On estime que le rapport $\frac{\text{Matière organique}}{\text{Carbone}}$ est à peu près constant et égal à $\frac{MO\%}{C\%} = 1,72$ [Mustin, 1987].

En plus du sédiment S1 brut, les autres échantillons du même sédiment ont été calcinés à des températures de 105°C, 450°C, 750°C et 1100 °C avant d'être passés au COTmètre. Cette démarche consiste à fixer à part entière les pourcentages du carbone organique et inorganique. En effet à la température de 105°C, le sédiment contient la totalité du pourcentage carbonique : carbone total. Le taux de carbone total à cette température est évalué à 6,4%. D'après la formule de [Mustin, 1987], le taux de la matière organique est évalué à 11%. C'est une estimation assez comparable avec les deux valeurs mesurés sur le même sédiment S1 à 450°C par calcination à 9,79%, et par ATG à 10,75%.

A 450°C, le carbone organique est approximativement consommé. La perte à 750°C correspond aux deux types du carbone. A cette température, une partie du carbone inorganique est consommée. On remarque qu'à cette température, la totalité du carbone est consommée.

2.1.1.4 Analyses granulométriques

A l'état initial, les sédiments étudiés sont sous forme de boues ($w > 100\%$). Ils présentent une granulométrie majoritairement fine. L'homogénéisation des prises d'essai est réalisée moyennant une agitation mécanique pendant 30 minutes.

Le temps d'homogénéisation est estimé à partir des mesures constantes des teneurs en eau d'un même fût.

Les analyses granulométriques ont été réalisées selon trois méthodes : par tamisage à voie humide, par un granulomètre laser, et pour le sédiment S1 par sédimentation pour la partie fine selon la norme NF P 94-057. L'utilisation de plusieurs méthodes permet de mieux cerner la distribution granulométrique sachant que chaque méthode est basée sur des hypothèses différentes.

a. Granulométrie par tamisage par voie humide

Les sédiments étudiés présentent une granulométrie très fine. Dans ce cas, le tamisage est utilisé pour déterminer les proportions de part et d'autre de 80 microns. Les résultats sont reportés dans le Tableau 2.8.

Sédiment	S1	S2
Masse de l'échantillon étudié (g)	540,94	400,00
Refus à 80 microns (g)	34,04	10,59
Pourcentage cumulé (%)	6,29	5,45
Proportion des fines (%)	93,71	79,31

Tableau 2.8: Granulométrie des sédiments par tamisage

Du Tableau 2.8, il apparaît que pour les deux sédiments, plus de 80% passe à 80µm. ils sont essentiellement des limons argileux.

b. Granulométrie par granulomètre laser

L'analyse granulométrique par la technique au laser est réalisée selon la norme française NF ISO 13320-1 septembre 2000.

L'essai consiste à faire passer un échantillon représentatif, dispersé à une concentration adéquate dans l'eau déminéralisée, au travers du faisceau d'une source lumineuse monochromatique, un laser. La lumière diffusée par les particules à divers angles est mesurée par un détecteur multi-canaux et les valeurs numériques liées aux paramètres de diffusion sont enregistrées pour être ensuite analysées. Ces valeurs numériques sont ensuite transformées à l'aide d'un modèle optique approprié et suivant une procédure mathématique, de façon à répartir la proportion du volume total dans un nombre discret de catégories de tailles de particules.

L'appareil utilisé dans cette étude est un granulomètre laser de marque COULTER type LS230, permettant de mesurer des tailles de particules dans une plage de 0,04 à 2000µm.

La mesure est réalisée sur six échantillons et chaque échantillon est testé deux fois.

Sur la Figure 2.5, les distributions granulométriques moyennes mesurées sont présentées.

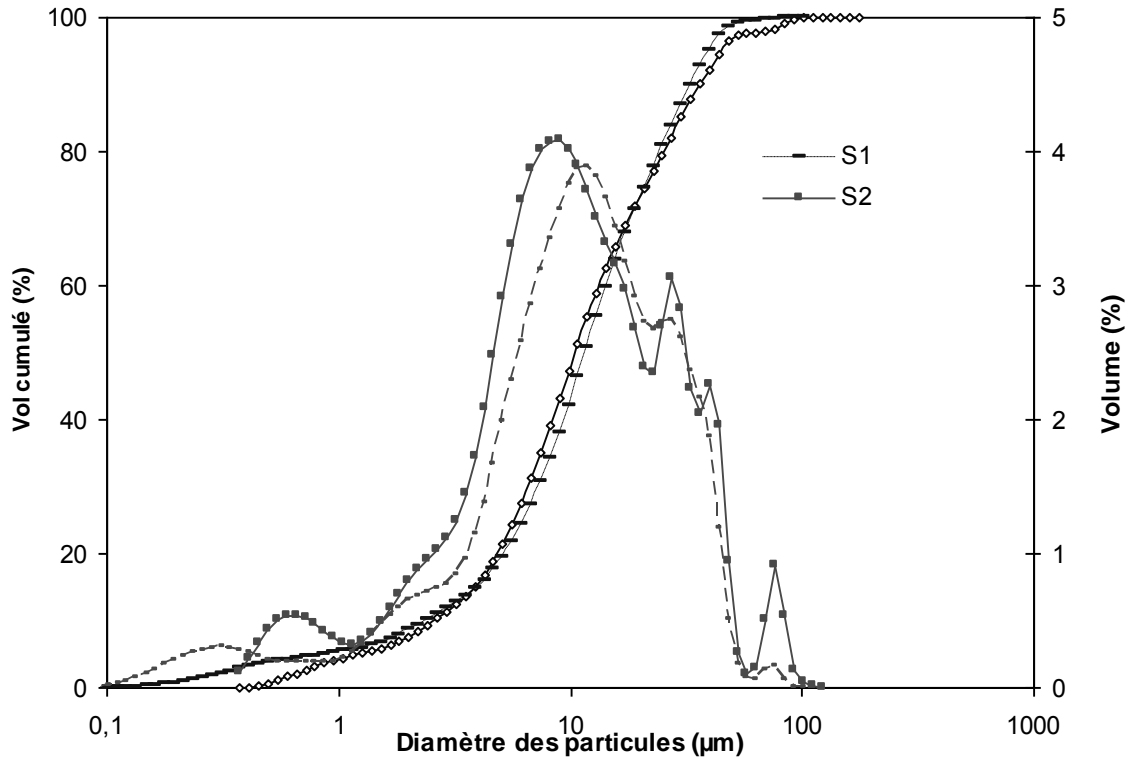


Figure 2.5: Courbes granulométriques des sédiments étudiés

A partir des distributions, nous avons déterminé les classes granulométriques en fonction de différentes tailles des particules. La distribution granulométrique obtenue est reportée dans le tableau suivant (Tableau 2.9).

Essais	<2µm	2µm->63µm	63µm->80µm	>80µm	d ₅₀ (µm)	Dmax (µm)	
	(%)	(%)	(%)	(%)			
Sédiment S1	1	12,88	86,1	0	0	11,3	57,77
	2	13,9	87,12	0	0	11,51	57,77
	3	6,19	93,8	0	0	11,55	52,62
	4	5,97	94,03	0	0	11,83	52,62
	5	6,01	93,54	0,50	0	12,17	92,09
	6	5,96	93,69	0,35	0,02	12,40	92,09
	Moyenne	8,52	90,24	0,15	0,00	11,81	71,01
Sédiment S2	1	7,13	80,32	4,55	0	11,10	92,09
	2	7,07	91,28	1,65	0	11,10	92,09
	3	7,76	90,99	1,22	0	10,10	92,09
	4	7,95	92,04	0	0	9,79	52,62
	5	7,8	88,58	3,32	0	10,60	121,8
	6	7,19	89,96	1,85	0	9,96	92,09
	Moyenne	7,65	90,2	2,10	0	10,44	90,46

Tableau 2.9: Distribution granulométrique: granulomètre laser

D'après le Tableau 2.9, il apparaît ainsi une granulométrie très fine pour les deux sédiments. Le d₅₀ est de l'ordre de 10µm pour les deux sédiments.

Dans le tableau comparatif Tableau 2.10, les données d'études réalisées sur des sédiments prélevés des ports du Nord de la France sont reportées. On remarque une assez bonne concordance des valeurs mesurées.

Etude	d_{50} (μm)
Dunkerque (Dubois 2006)	15
Dunkerque (Brakni 2008)	7
Le Havre (Boutouil 1998)	10
Rouen (Colin 2003)	17

Tableau 2.10: Données relatives à d_{50} pour les sédiments du Nord

c. Granulométrie par sédimentométrie

L'analyse granulométrique par sédimentométrie repose sur le principe de la loi de Stokes. C'est une loi liant la gravité à la vitesse de chute d'une sphère dans un liquide :

$$v = \frac{2r^2 g \Delta(\rho)}{9\mu} \quad \text{Eq. 2-1}$$

- v : vitesse limite de chute (en m/s)
- r : rayon de la sphère (en m)
- g : accélération (m/s^2)
- $\Delta(\rho) = d_p - d_f$: variation de masse volumique entre la particule et le fluide (en kg/m^3)
- μ : viscosité du fluide (Pa.s).

En supposant que les particules du sédiment ont une forme sphérique et ayant une masse volumique quasi constante, on détermine la dimension des grains.

La comparaison des résultats obtenus pour le sédiment S1 par sédimentométrie et l'analyse au granulomètre laser est illustrée sur la Figure 2.6.

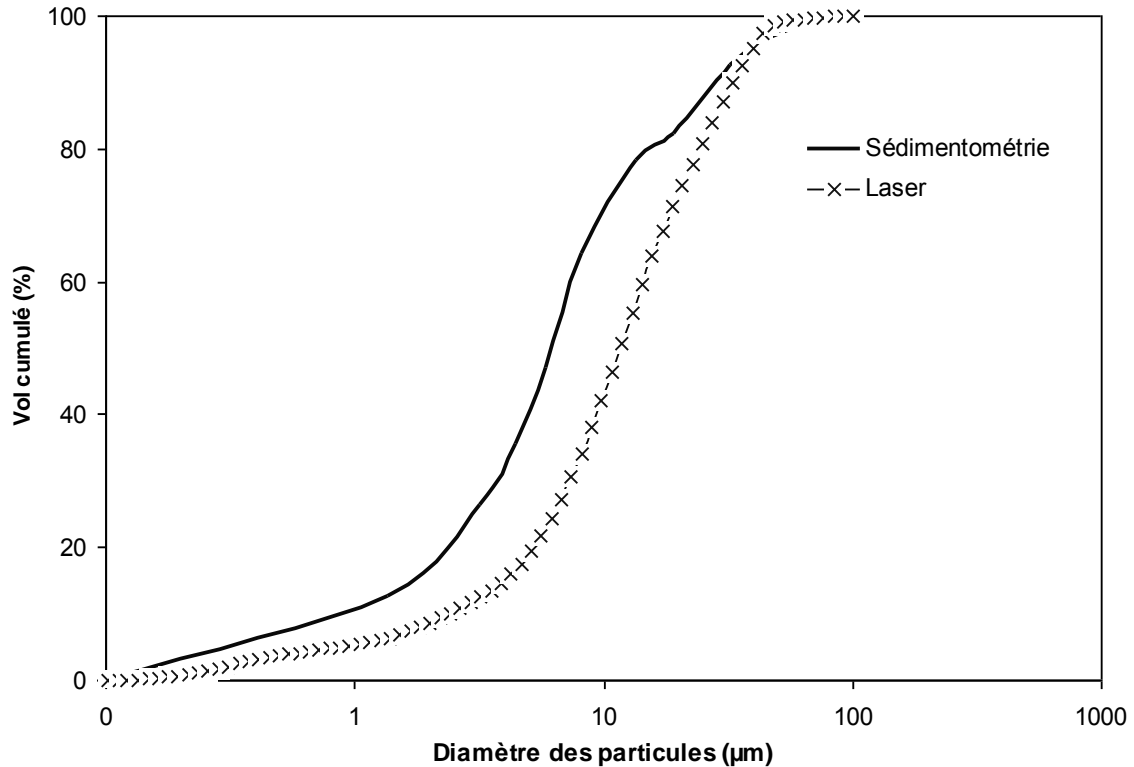


Figure 2.6: Distribution granulométrique par sédimentométrie et par laser du sédiment S1

Il apparaît une bonne concordance entre les résultats issus de ces deux techniques. Il est toutefois important de signaler que les études sur d'autres sédiments ne concordent pas aux mêmes conclusions.

2.1.1.5 Argilosité

L'argilosité des sédiments est appréciée par l'essai à la tache au bleu de méthylène (VBS) selon la norme : NF P 94-068. Cet essai définit globalement la fraction argileuse dans le sédiment pour laquelle l'adsorption du matériau est plus ou moins importante.

Sur le Tableau 2.11, les résultats relatifs aux essais réalisés sur les sédiments S1 et S2 sont reportés.

Echantillon \ Sédiment	S1	S2
E1	4,22	3,11
E2	4,11	3,51
E3	3,9	3,12
Moyenne	4,08	3,25

Tableau 2.11: Valeurs VBS mesurées sur les sédiments S1 et S2

En se basant sur la classification [GTR, 2000], les résultats obtenus permettent de classer les deux sédiments comme un limon de plasticité moyenne dont la VBS est comprise entre 2,5 et 6.

Pour les deux sédiments S1 et S2, la valeur moyenne de VBS enregistrée (Tableau 2.11) montre l'existence d'une fraction argileuse relativement active. Dans la perspective de

la valorisation du matériau dans un domaine tel que les techniques routières, un traitement préalable au liant hydraulique et/ou correcteurs granulométriques est nécessaire.

2.1.1.6 Masse volumique des grains solides

La masse volumique des particules solides est déterminée à l'aide d'un pycnomètre à hélium de type Accupyc 1330. Il s'agit de déterminer le volume des grains contenus dans le pycnomètre à partir d'un échantillon sec dont la masse est connue.

La masse volumique est donnée par le rapport de la masse sur le volume mesuré.

$$\rho_s = \frac{M_{ech}}{V_{ech}} \quad \text{Eq. 2-2}$$

A chaque essai, pour chaque sédiment, plusieurs mesures sont réalisées. Les résultats présentés sur la Figure 2.7 correspondent aux valeurs mesurées sur les sédiments S1 et S2 séchés à deux températures différentes. Les premiers échantillons ont été séchés par étuvage à 40 °C avant l'essai au pycnomètre, les autres l'ont été à 105°C. La variation de température d'étuvage avant l'essai permet d'apprécier l'effet de la préparation de l'échantillon sur la valeur de la masse volumique absolue mesurée. En fonction de la température d'étuvage, une variation de la quantité de la matière organique contenue dans le sédiment peut influencer la valeur de la masse volumique enregistrée.

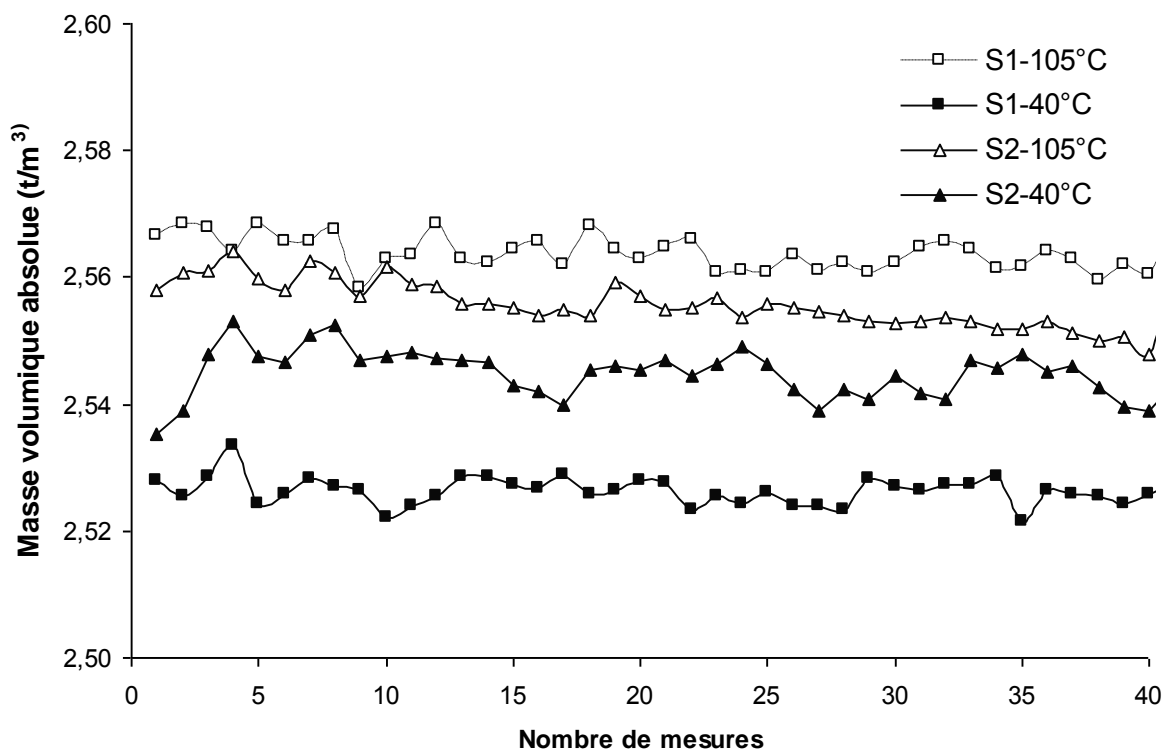


Figure 2.7: Mesure de la masse volumique absolue.

On remarque que le sédiment séché à 105°C présente une masse volumique absolue supérieure au même matériau séché à 40°C. Cette différence est due à l'effet de la matière organique probablement altérée entre 40 et 105°C.

Les valeurs moyennes de la masse volumique absolue enregistrées, sont reportées dans le Tableau 2.12.

Température	40°C		105°C	
Sédiment	S1	S2	S1	S2
ρ_s (t/m ³)	2,52	2,54	2,56	2,56
Moyenne (t/m ³)	2,54		2,56	

Tableau 2.12: Masse volumique absolue des sédiments S1 et S2

A partir des résultats du Tableau 2.12, on remarque que la technique de préparation est importante. La différence enregistrée est plus importante dans le sédiment S1 que le dans le sédiment S2. Ceci provient de la présence plus importante de la matière organique dans le sédiment S1.

2.1.1.7 Limites d'Atterberg

La mesure des limites d'Atterberg a été réalisée selon la norme Française Sols : NF P 94-051.

L'essai s'effectue en deux phases :

- Détermination de la teneur en eau pour laquelle une rainure pratiquée dans le sol placé dans la coupelle de Casagrande, se ferme lorsque le dispositif est soumis à 25 chocs répétitifs. C'est la limite de liquidité, noté w_L
- Détermination de la teneur en eau pour laquelle, un rouleau de 10 cm de longueur environ, se fissure lorsque son diamètre atteint 3mm. C'est la limite de plasticité, noté w_P

a. Limite de liquidité

Cet essai consiste à subir l'échantillon des chocs répétitifs jusqu'à la fermeture de la rainure. Plus la teneur en eau diminue, plus la fermeture nécessite plus de coups. La limite de liquidité est obtenue par l'ordonnée qui correspond à l'abscisse de 25 coups. Les courbes des teneurs en eau en fonction du nombre de chocs nécessaires des deux sédiments S1 et S2 est représentée sur la Figure 2.8.

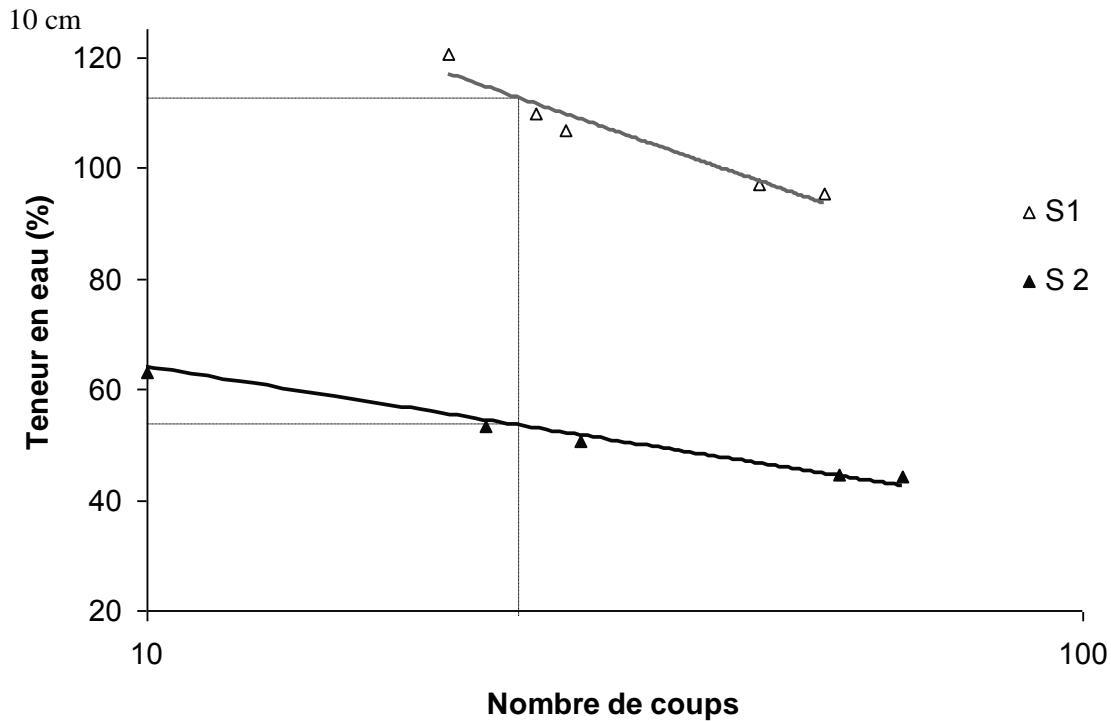


Figure 2.8: Limite de liquidité des sédiments S1 et S2.

A partir de la Figure 2.8, il apparaît que le sédiment S1 possède une limite de liquidité plus importante que le sédiment S2. Le sédiment S1 contient plus de matière organique que le sédiment S2. Cette différence agit sur le comportement du sédiment S1 qui présente une capacité de rétention d'eau plus importante que le sédiment S2.

b. Limite de plasticité

La limite de plasticité désigne la teneur en eau du sédiment en état de transition de l'état plastique à l'état solide (Norme NF P94-051). Ce paramètre a été déterminé sur trois mesures (Tableau 2.13). On donne dans le tableau suivant les valeurs de la limite de plasticité des deux sédiments étudiés :

Echantillon \ Sédiment	S1	S2
Ech1	50,00	26,96
Ech2	48,57	27,08
Ech3	50,77	26,91
Moyenne	49,78	26,98

Tableau 2.13: Limites de plasticité pour les sédiments S1 et S2

La limite de plasticité du sédiment est la moyenne arithmétique des trois valeurs soit : $w_p=49,78\%$ pour S1 et $26,98\%$ pour S2. La transition de l'état plastique à l'état solide est différente entre les deux sédiments. Le sédiment S1 devient solide avec environ de 50% de teneur en eau. Le sédiment S2 restera plastique jusqu'à 26% de teneur en eau. La différence entre les deux sédiments réside dans le taux de la matière organique. A partir de cette étude,

on remarque que l'effet de la matière organique est important sur les limites d'Atterberg des sédiments [Zentar et Al, 2008].

c. Indice de plasticité & indice de consistance

L'indice de plasticité est défini par la différence entre la limite de liquidité et la limite de plasticité.

$$I_p = w_L - w_p \tag{Eq. 2-3}$$

L'indice de consistance est un indicateur de l'état du matériau aux limites de consistance. Ce paramètre est défini par :

$$I_c = \frac{w_L - w}{I_p} \tag{Eq. 2-4}$$

La valeur de consistance négative ou proche de zéro démontre le manque de consistance des sédiments S1 et S2 à l'état initial comme présenté dans le Tableau 2.14.

Indice	S1	S2
I_p	62,85	31,11
I_c	-1,64	-1,44

Tableau 2.14: Etat de plasticité des sédiments

D'après le Tableau 2.14, le sédiment S1 est classé comme très plastique. Le sédiment S2 est dans la classe plastique.

La présentation dans l'abaque de plasticité de Casagrande des différents résultats obtenus sur les sédiments de PAD à partir des travaux réalisés dans le cadre des travaux de Dubois, 2006 et Tran, 2009 ainsi que de ce travail (Figure 2.9) montre un alignement autour de la diagonale.

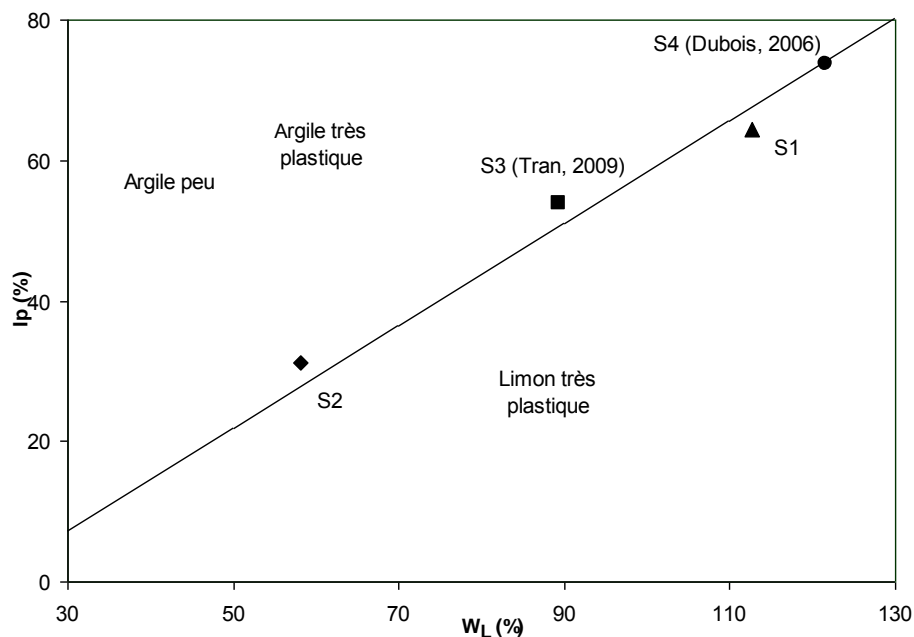


Figure 2.9: Relations I_p-w_L dans l'abaque de Casagrande

On remarque que les quatre sédiments disposés sur l'abaque de Casagrande sont alignés sur une même droite. Cette droite correspond à un comportement très plastique. Les sédiments sont situés entre des argiles et des limons par rapport des résultats de plasticité. Ces derniers résultats correspondent à l'état initial des sédiments après dragage. Ils sont essentiellement chargés en matières organiques et en sels marins. Ceci peut influencer les résultats de plasticité.

2.1.1.8 Comparaison des caractéristiques physiques avec des valeurs mesurées dans des études antérieures

Sur le Tableau 2.15, un récapitulatif des valeurs mesurées dans cette étude et des études de Dubois (2006) et Tran (2009) sont présentés.

Etude		DUBOIS (2006)	TRAN (2006)	Etude actuelle	
				S1	S2
Granulométrie (%)	<2 μm	5,50	7,36	8,52	7,65
	2 μm -->63 μm	59,10	73,51	90,24	90,20
	63 μm -->80 μm	35,40	19,13	1,15	2,1
Limites d'Atterberg (%)	w _L	121,60	89,42	112,63	58,13
	W _P	47,80	35,46	49,29	27,02
	I _P	73,80	53,93	64,34	31,11
	I _c	-0,44	-1,72	-1,64	-1,44
Perte au feu (%) à 550°C		15,60	13,44	16,36	10,12
COT(%)		2,40	-	1,23	1,90
Teneur en eau initiale (%)		154,30	182,07	217,86	103,00
VBS		3,51	3,40	4,08	3,25

Tableau 2.15: Etude comparative des caractéristiques physiques sur des sédiments de Dunkerque

D'après les résultats cités ci-dessus, les deux sédiments de cette étude se classent en sols fins. Du point de vue granulométrique, et plasticité, les deux sédiments S 1 et S2 se situent précisément et respectivement dans les classes A4 et A3 du GTR, 2000 (Figure 2.10).

Les sédiments des travaux de Dubois (2006) et Tran (2009) sont également classés en A2 et A4.

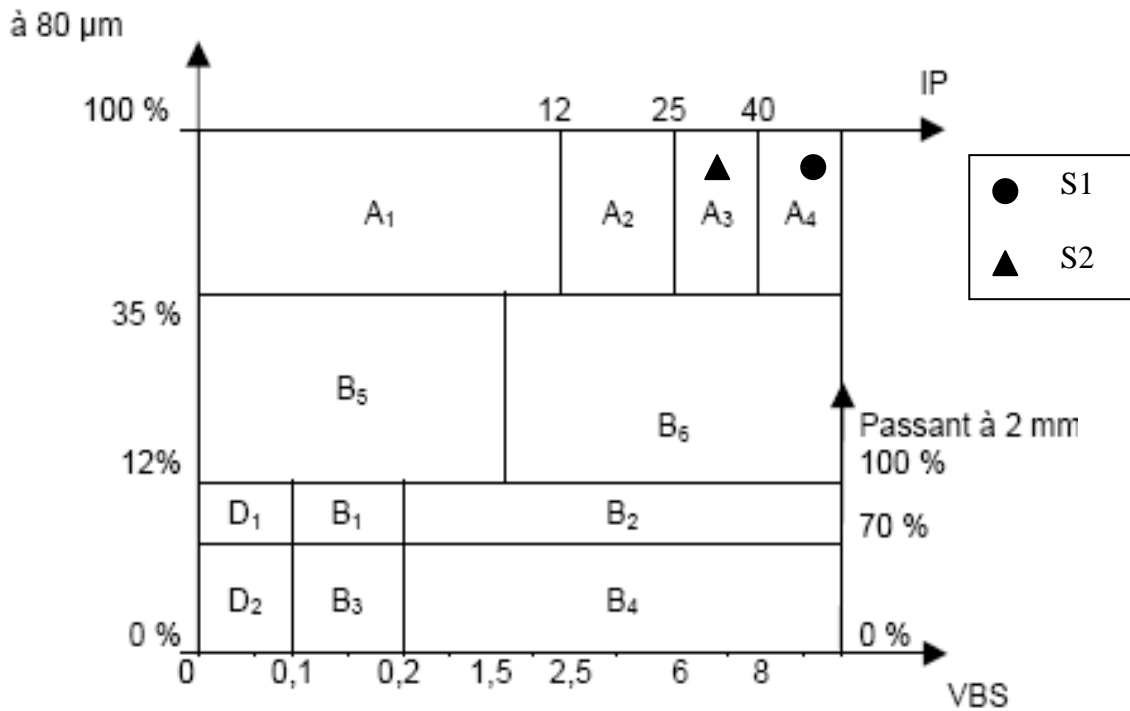


Figure 2.10 : Classement des sédiments S1 et S2

2.1.1.9 Résistance au cisaillement

a. Essai scissométrique

L'essai au scissomètre, est un essai de reconnaissance immédiate d'un sol selon la norme NF P 94 072. La rotation du moulinet, auquel on applique un moment de torsion, cisaille le sol suivant une surface cylindrique circonscrite au moulinet.

Dans cette étude, un diagramme représentant les contraintes de cisaillement, mesurés par un couplemètre, en fonction des teneurs en eaux des échantillons étudiés est présenté sur la Figure 2.11.

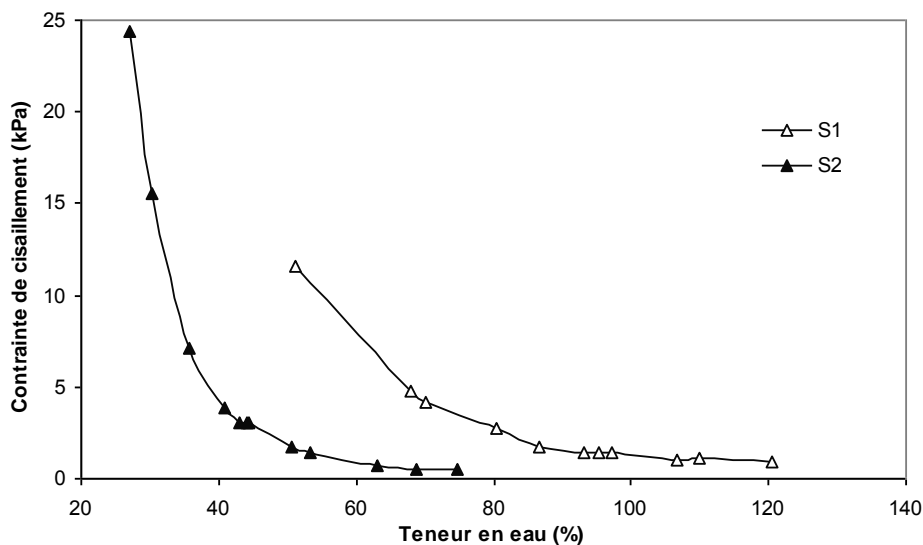


Figure 2.11 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de w (%)

D'après la figure précédente, on remarque que la contrainte de cisaillement décroît inversement à la teneur en eau. Au voisinage de la limite de plasticité w_P , la contrainte de cisaillement augmente considérablement. Près de la limite de liquidité w_L , la contrainte décroît jusqu'à une limite où elle devient constante (Figure 2.11). Ce résultat est très important pour comprendre la résistance au cisaillement des sédiments. Cela permet de conjuguer ce résultat avec l'évolution du séchage dans le chapitre 3 présentée par la teneur en eau en fonction du temps. On peut lier la résistance du cisaillement du sédiment en fonction du temps du séchage.

b. Essai fall cone

Cet essai consiste à placer un moule d'échantillon, sous un cône fixé à une tige. Dans notre cas, les sédiments ont été passés au tamis de 400 μm , et aucun refus n'a été remarqué vu la granulométrie fine des sédiments. Le cône est placé juste en surface de l'échantillon, et la mesure d'enfoncement est réalisée après avoir fait chuter l'ensemble tige - cône, et après avoir attendu 5 secondes de stabilisation. Cet essai est initialement employé pour déterminer la résistance au cisaillement des sols, puis a été utilisé pour déterminer la limite de liquidité, comme la coupelle de Casagrande. Dans la norme française NF P 94-052-1, la limite de liquidité correspond à un enfoncement du cône dans l'échantillon, de 17 mm.

Dans la Figure 2.12, l'évolution de la teneur en eau en fonction de la pénétration du fall cône est présentée.

La lecture sur la courbe, donne une limite de liquidité de l'ordre de 96% contre 112,63% par la méthode conventionnelle et une limite de plasticité évaluée à 38% contre 49,29% pour S1. Pour le sédiment S2, la limite de liquidité est estimée à 55% contre 58,13% par la méthode de la coupelle de Casagrande et sa limite de plasticité est de l'ordre de 25% contre 27,02 % par la méthode conventionnelle. La limite de plasticité, correspondant à un enfoncement de 2 mm, est déterminée à partir de la Figure 2.12 par prolongation de la droite pour les deux sédiments.

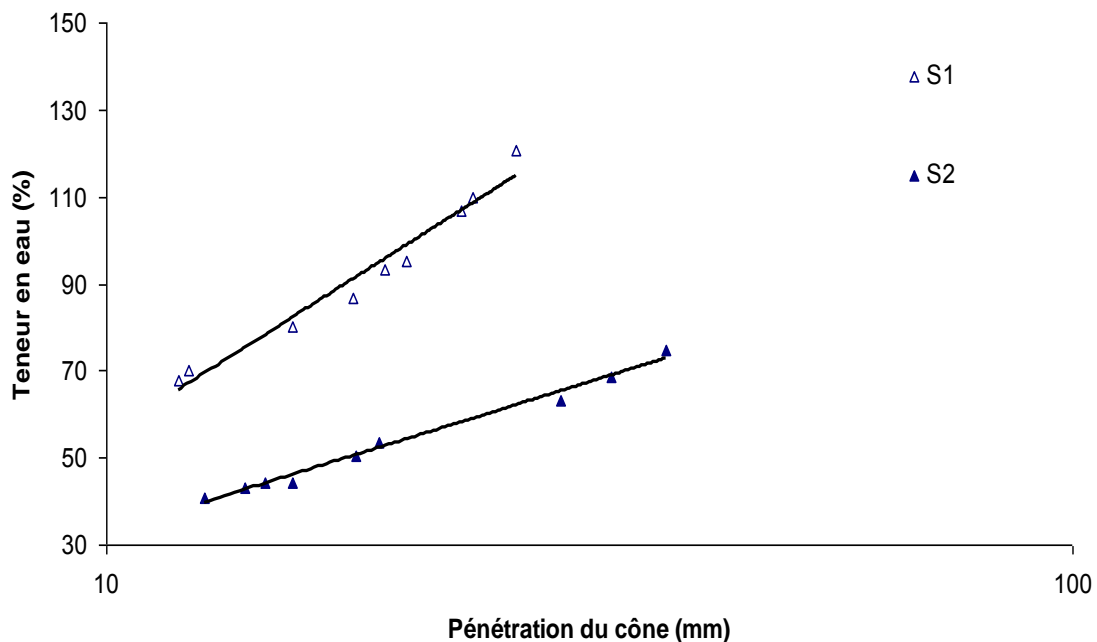


Figure 2.12: Mesure de la pénétration dans les deux sédiments

2.1.2 Caractérisation de portance et de compactage

Dans cette partie, nous étudions l'évolution de la densité sèche et l'Indice Portant Immédiat (IPI) en fonction de la teneur en eau. L'emploi des sédiments dans les couches de route doit satisfaire des conditions minimales de portance [GTR, 2000]. Dans cette partie, les travaux réalisés ont concerné le sédiment S1, utilisé dans le cadre de la thèse pour le développement de formulations.

2.1.2.1 Essai Proctor

La densité apparente finale d'un sol compacté dépend de la nature de celui-ci, de la teneur en eau et de l'énergie de compactage. Le compactage permet de resserrer la texture du sol, de réduire ses déformations, d'améliorer sa portance et sa résistance. Pour un sol donné et pour un mode de compactage déterminé, il existe une seule teneur en eau correspondant à la densité maximale. Pour une couche de forme, la teneur en eau optimale et la densité correspondante sont déterminées par l'essai Proctor selon la norme NF P 94-093.

Dans cette étude, les résultats de cet essai sur le sédiment S1 sont présentés sur la Figure 2.13.

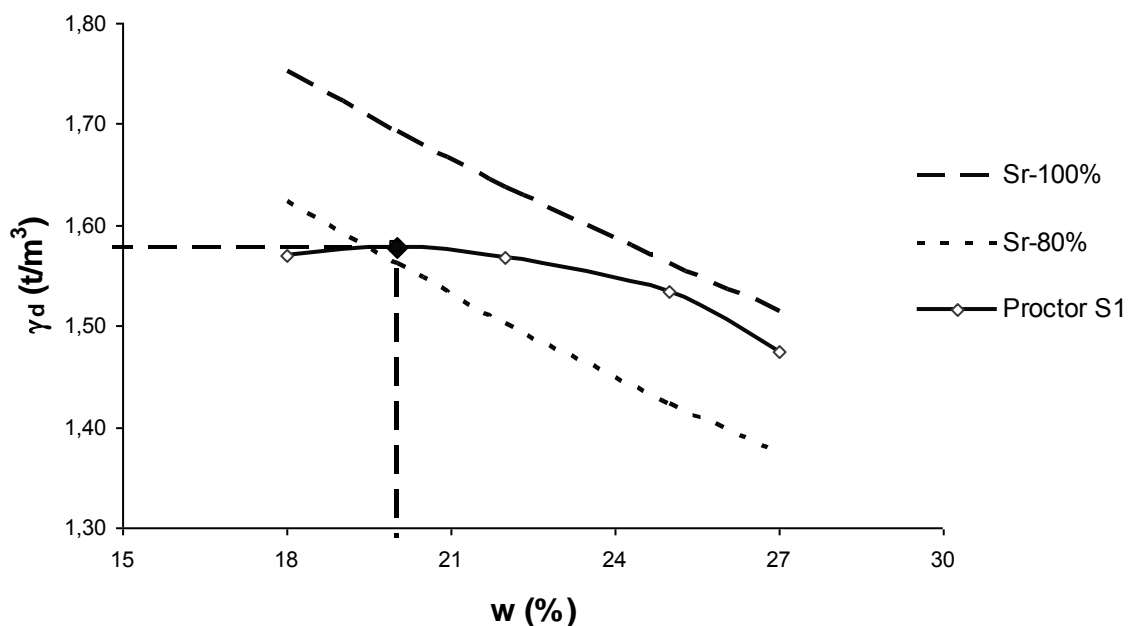


Figure 2.13 : Essai Proctor modifié des sédiments bruts

D'après cette la Figure 2.13, le sédiment brut présente une masse volumique du sol sec de $1,58 \text{ t/m}^3$ pour une teneur en eau $w_{OPM} = 20\%$.

2.1.2.2 Indice Portant Immédiat (IPI)

Cet essai est réalisé selon la norme NF P 94-078 pour déterminer la portance du matériau. L'indice portant immédiat IPI, qui décrit la capacité du matériau à supporter les charges engendrées par les engins de chantiers pendant les travaux, est défini par le rapport

entre la force mesurée pour l'enfoncement d'une tige cylindrique dans le matériau étudié et la force donnée par rapport à un matériau de référence.

Les résultats des essais réalisés sur les sédiments sont reportés sur la Figure 2.14 :

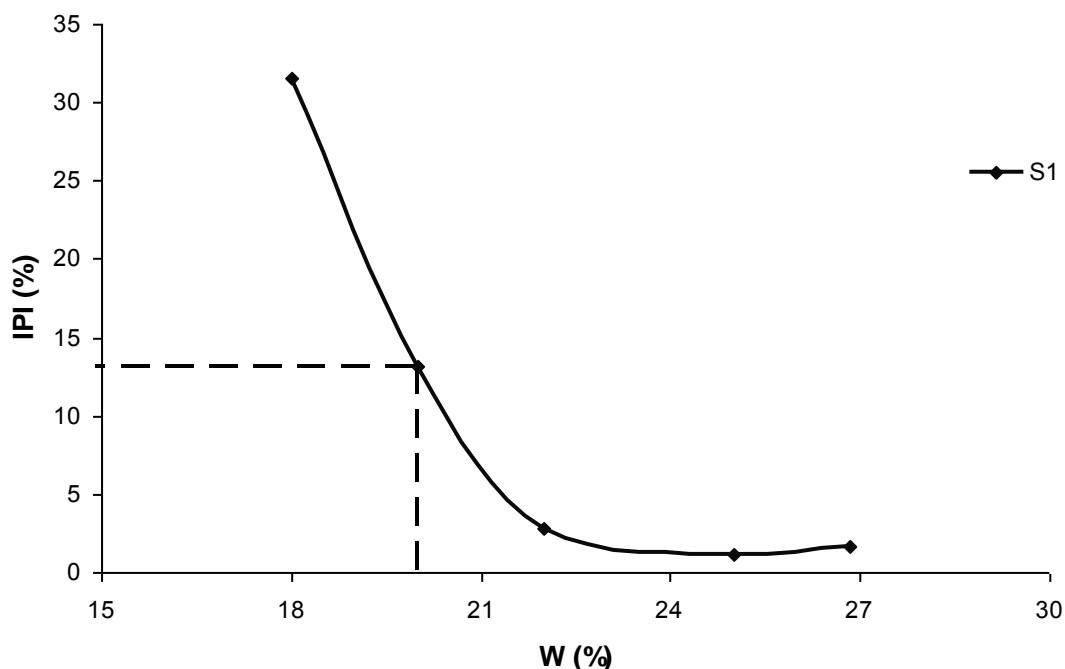


Figure 2.14 : Indice portant immédiat des sédiments bruts

A la teneur en eau optimale, l'indice portant immédiat est de l'ordre de 13,5%. Cette valeur correspond à 13,5% comparé par un matériau standard [NF P 94-078]. A partir de ces performances, le sédiment ne peut pas répondre aux exigences de dimensionnement d'une couche de chaussée. Selon le GTR, 2000, la conception des couches d'assises exigent un IPI de l'ordre de 50%.

Dans le Tableau 2.16, on compare l'étude actuelle par rapport aux travaux de thèse sur les sédiments de Dunkerque de Tran [2009] :

Matériau	w_{opm} (%)	ρ_d (g/cm ³)	IPI à w_{opm} (%)
(Tran, 2009)	21	1,62	21
Etude actuelle	20	1,58	13,5

Tableau 2.16 : Comparaison des résultats de compactage de différentes études sur les sédiments du port de Dunkerque

On remarque que les résultats entre les deux études sont assez comparables. Ceci prouve le caractère homogène des sédiments. Ainsi, il est nécessaire de trouver un matériau qui, ajouté au sédiment, permet d'augmenter les caractéristiques mécaniques du mélange.

2.1.3 Caractérisation minéralogique

L'analyse minéralogique des sédiments a consisté en une caractérisation par deux méthodes d'analyse. La première est une analyse par spectrométrie de fluorescence X, pour déterminer la composition élémentaire du sédiment. La seconde est une caractérisation de

phases dans le sédiment par diffraction des rayons X. Enfin, une analyse quantitative associant les deux techniques de caractérisation a été tentée.

Pour mieux appréhender les effets d'un traitement thermique sur les sédiments, des analyses sont réalisées à différents états de calcination. Ainsi, la connaissance des proportions des constituants des sédiments est très utile pour la prise de décision pour les voies de valorisations des sédiments. En effet, le quartz et la calcite sont des phases essentielles pour la formation de certains matériaux en génie civil (briques, ciments,...).

Le traitement thermique appliqué aux sédiments est constitué d'une montée en température de $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ jusqu'à la température souhaitée. Dans cette étude nous avons fixé quatre températures caractéristiques pour définir les paliers ; 450°C , 550°C , 750°C et 900°C . La plage $450\text{-}550^{\circ}\text{C}$ correspond à la consommation totale de la matière organique. Cette méthode nous permet de caractériser la matière organique. La plage $550\text{-}750^{\circ}\text{C}$ correspond à la transformation de la calcite en chaux en dioxyde de carbone. Les variations massiques peuvent exprimer la quantité de calcite contenue dans les sédiments. La dernière plage de température, 750°C - 900°C est destinée essentiellement à déterminer le potentiel de transformations des phases présentes dans les sédiments. Cette partie peut renseigner sur les principales phases réactives qui peuvent naître à partir d'un traitement thermique. Pour les quatre températures utilisées (Figure 2.15), nous avons réalisé un palier à température constante pendant 2 heures. Ensuite, une descente jusqu'à la température de 105°C suivi d'un refroidissement au dessiccateur jusqu'à la température ambiante (20°C) est opérée.

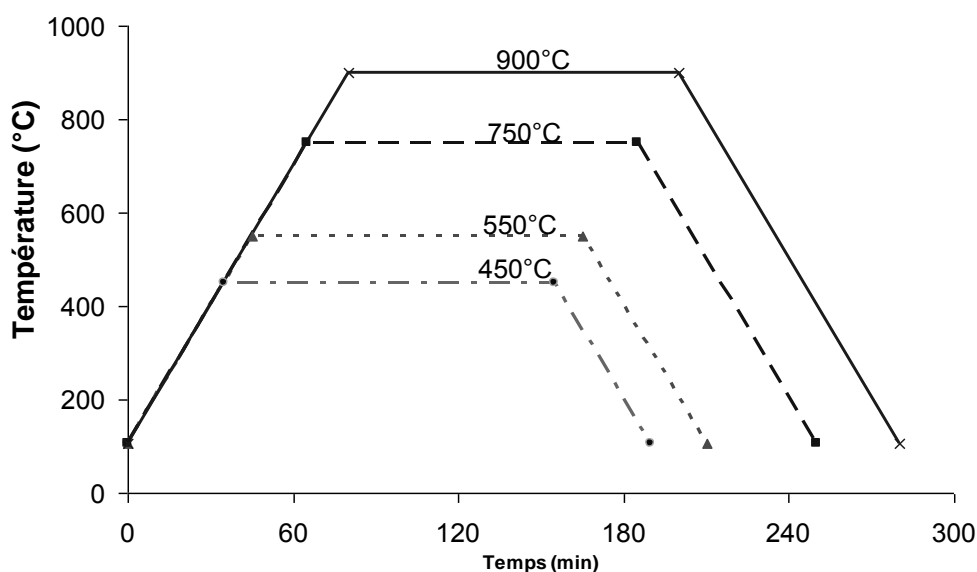


Figure 2.15: Traitement thermique des sédiments

Nous avons déterminé la perte de masse enregistrée sur les quatre séries d'échantillons en fonction de la température de calcination. Dans la Figure 2.16, la perte de masse en fonction de la température de la calcination est présentée.

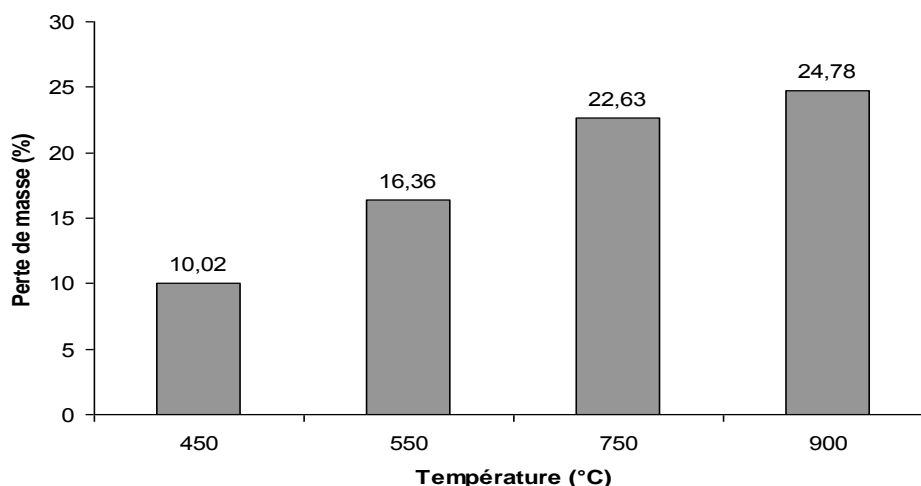
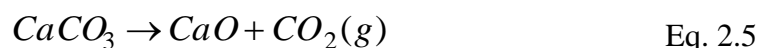


Figure 2.16 : Perte de masse dans le sédiment S1

Le but des essais réalisés est de déterminer les températures de décomposition de la partie minérale, et en particulier la calcite. C'est une perspective pour la valorisation des sédiments dans l'industrie cimentaire peut être envisagée.

Après des cuissons à basse température pour l'élimination de la matière organique (voir §3 ci-avant), à partir de 550°C, une montée en température est réalisée jusqu'à 750°C. À partir de cette température, on a réalisé également une nouvelle rampe en température jusqu'à 900°C. Cette montée est accompagnée par une perte de masse non négligeable, évaluée à 8,14%. Sur un palier de température fixée à 900°C ; 1,43% de perte de masse est enregistré. Cette perte correspond à la décomposition des carbonates en monoxydes de calcium (la chaux) et en dioxyde de carbone selon la réaction suivante.



A cette température, la majorité des carbonates (la calcite) est consommée (Eq 2.5). A partir de ce dernier traitement, on peut mettre en évidence la quantité de chaux produite dans un sédiment.

2.1.3.1 Analyses par spectrométrie de fluorescence X

La spectrométrie de fluorescence X, est une méthode d'analyse chimique élémentaire utilisant une propriété physique de la matière : la fluorescence.

Lorsque l'on irradie de la matière avec des rayons X, la matière réémet de l'énergie sous la forme, entre autres, de rayons X ; c'est la fluorescence X, ou émission secondaire de rayons X,

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

L'analyse de spectrométrie par fluorescence est réalisée sur quatre échantillons à différents états de traitement thermique. Le premier échantillon est à l'état brut. Les suivants

sont calcinés respectivement à des températures de 550, 750 et 900°C. Le résultat de l'essai est étudié en éléments et en oxydes.

On résume dans Figure 2.17, les résultats de la composition élémentaire des quatre échantillons analysés.

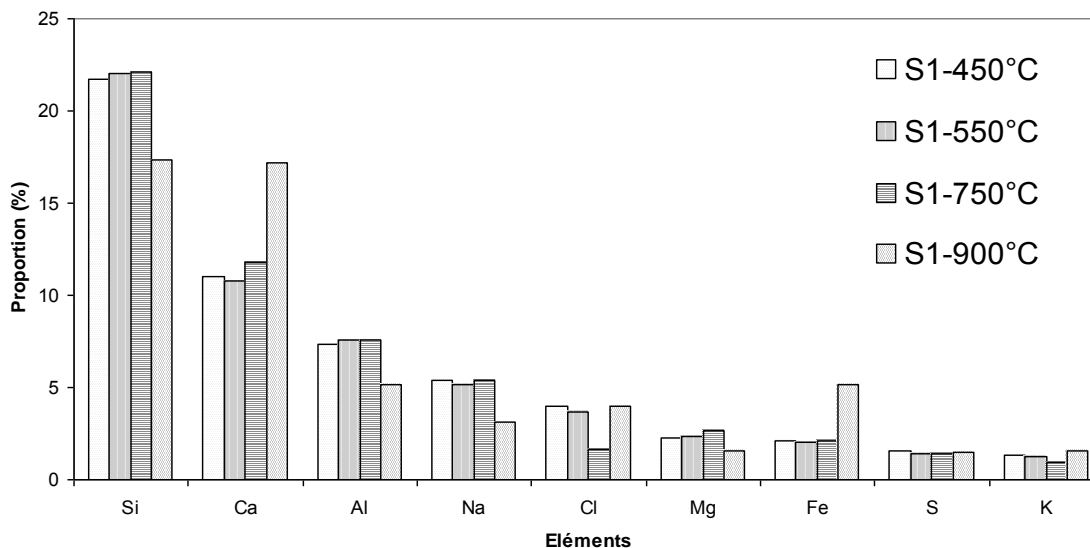


Figure 2.17 : Evolution de la composition élémentaire d'un sédiment traité

La température 105°C présente dans l'étude actuelle l'état brut du sédiment. La température 550°C reflète le matériau sans matière organique. Pour la température 750°C, les carbonates contenus dans le sédiment commencent à se décomposer selon l'Eq. 2.5. Enfin, à la température 900°C, la totalité des carbonates sera consommée. On remarque que pour les différents traitements subis, le pourcentage élémentaire est le même pour les trois premières échantillons traités à 105, 550 et 750°C. La température de 900°C, on remarque une légère variation de la distribution des éléments majeurs dans la composition de l'échantillon.

On présente la composition détaillée des échantillons après traitements dans le Tableau 2.17.

Elément	Z	Pourcentage massique (%)			
		450°C	550°C	750°C	900°C
C	6	6,420	1,600	0,000	0,000
O	8	42,830	43,110	39,900	42,850
Na	11	2,700	2,800	3,090	3,200
Mg	12	1,200	1,400	1,550	1,700
Al	13	4,300	4,907	5,170	5,334
Si	14	14,200	16,360	17,360	17,860
P	15	0,100	0,128	0,150	0,151
S	16	1,300	1,473	1,480	1,608
Cl	17	3,600	3,996	3,960	1,930
K	19	1,400	1,657	1,570	1,302
Ca	20	12,900	15,460	17,150	17,830
Ti	22	0,200	0,291	0,320	0,321
Cr	24	Traces*	0,024	0,020	0,026
Mn	25	Traces	0,060	0,070	0,070
Fe	26	3,700	4,585	5,130	5,322
Ni	28	Traces	0,006	0,007	0,009
Cu	29	Traces	0,079	0,086	0,044
Zn	30	0,100	0,176	0,196	0,188
As	33	Traces	Traces	Traces	Traces
Br	35	Traces	0,030	0,026	0,006
Rb	37	Traces	0,009	0,009	Traces
Sr	38	Traces	0,058	0,058	0,069
Zr	40	Traces	0,016	0,012	0,019
Ba	56	Traces	0,025	0,025	0,035
Pb	82	Traces	0,060	0,019	0,008
Total des		98,950	99,310	97,358	99,883

* : Sont désignées comme traces, les pourcentages inférieurs à 0,001%

Tableau 2.17: Composition élémentaire des sédiments (%)

En observant, les résultats des analyses fluorescence X, on remarque que la présence des éléments est très stable dans les trois échantillons, à l'exception du carbone, qui se dégage en CO₂ gazeux.

D'après le Tableau 2.17, deux pics majoritaires pour le calcium et le silicium existent respectivement dans la chaux (CaO) et dans le quartz (SiO₂). D'autres éléments sont présents également en proportions non négligeables. On trouve essentiellement l'aluminium et le fer. Ces deux derniers éléments sont présents dans les oxydes de fer et dans l'alumine. Cette composition est favorable à la formation d'éléments réactifs à haute température. Outre ces éléments, on observe une présence importante de sodium et de potassium.

Enfin, des métaux lourds comme le titane (Ti) sont minoritairement présents dans les minerais d'ilménite (FeTiO₃), de rutile (TiO₂). Ou encore le manganèse (Mn), qui se trouve dans les minerais de pyrolusite (MnO₂), psilomélane [(Ba,H₂O)₂Mn₅O₁₀] et rhodochrosite (MnCO₃). On trouve enfin d'autres éléments minoritaires et/ou en traces, comme le zinc (Zn), le baryum (Ba), le plomb (Pb) ou le cuivre (Cu).

2.1.3.2 Analyse par diffraction des rayons X

Les analyses par diffraction X consistent à déterminer les phases présentes dans un matériau. En plus de la température de séchage initial (105°C), l'analyse par DRX est réalisée sur les températures supposées de la fin du processus de décomposition de la matière

organique (550°C), la fin de la transformation de la calcite et à la température maximale utilisée dans cette étude (750°C). Les résultats sont logiquement très liés au traitement suivi comme indiqué sur la Figure 2.18.

Pour l'analyse du matériau brut (Tableau 2.18), on a relevé la présence majoritaire de deux phases principales : Le quartz et la calcite.

Une cuisson à 550°C a montré le début de la consommation de la calcite. La montée de température à 900°C pendant 2h a été suffisante pour la décomposition totale des carbonates initialement majoritaires. On remarque l'apparition importante de chaux (CaO), alors que la quantité de quartz est stable.

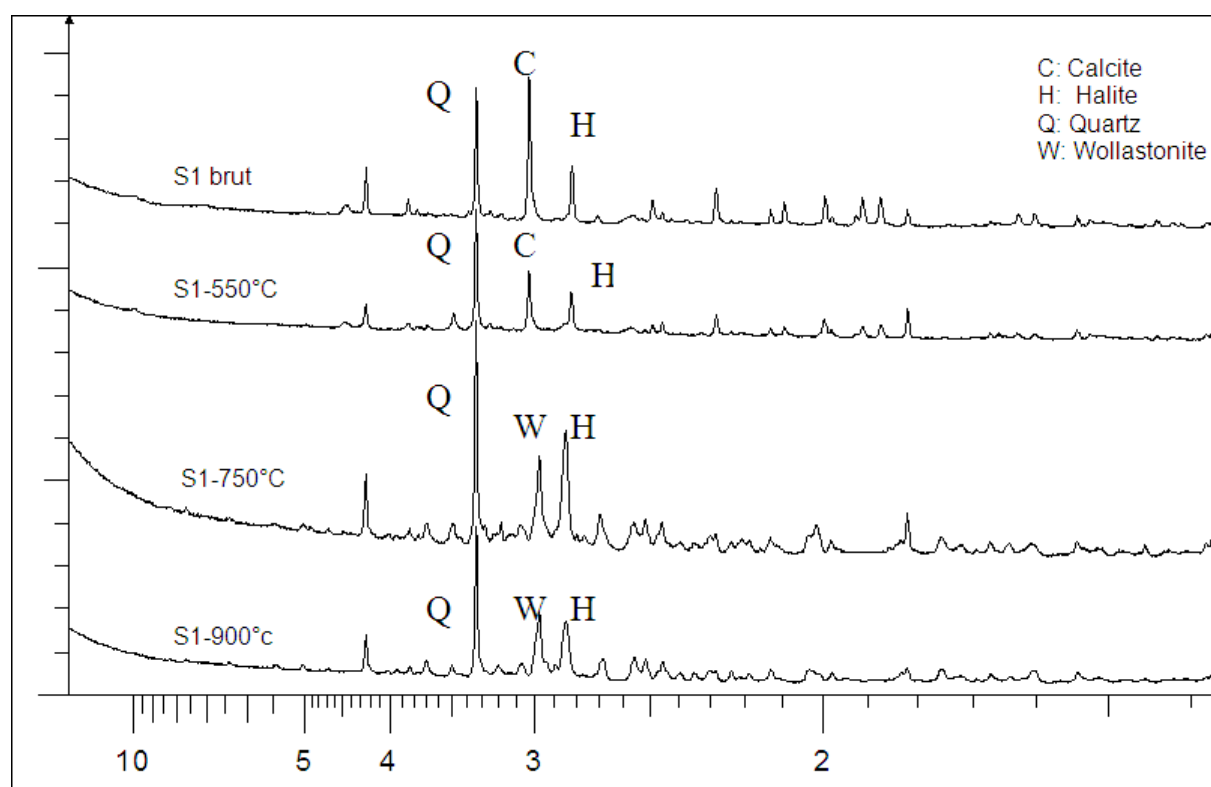


Figure 2.18: Evolution des phases du sédiment pendant le traitement thermique

2.1.3.3 Analyse semi quantitative, Combinaison des DRX à la fluorescence X

Dans le Tableau 2.18, on présente les composés contenus dans les échantillons traités. Ils peuvent être sous formes d'oxydes libres ou liés comme indiqué dans le Tableau 2.18.

Composés	S1 brut (%)	S1-550 (%)	S1-750 (%)	S1-900 (%)
SiO ₂	46,39	47,12	47,27	49,41
CaO	15,46	15,14	16,48	13,33
Al ₂ O ₃	13,86	14,31	14,37	15,69
Na ₂ O	7,31	6,69	7,267	8,61
Cl	3,962	3,67	1,63	1,55
SO ₃	3,858	3,59	3,56	3,29
MgO	3,78	3,93	4,46	4,72
Fe ₂ O ₃	2,991	2,91	3,04	3,26
Total	97,611	97,36	98,077	99,86

Tableau 2.18: Analyse semi quantitative

Pour l'échantillon du sédiment brut, on retrouve la présence du quartz, de la calcite et du sel. A partir de la température 450°C, le pic des carbonates diminue. On remarque également l'apparition d'un pic de la chaux à faible intensité à cette température. Puis, à la température 750°C, la wollastonite, un silicate non réactif apparaît. A cette température, ce minéral se forme en réaction directe entre le carbonate et le quartz à haute température. Il y a une similitude entre le traitement à 750°C et 900°C. La température 750°C paraît suffisante pour la consommation de la totalité des carbonates. La synthèse des silicates non réactifs est générée essentiellement par la faible température de cuisson, mais également à cause de la technique de refroidissement suivi. En effet, pour former des silicates réactifs susceptibles de former des liants hydrauliques, il est nécessaire d'augmenter la température de cuisson et appliquer un refroidissement rapide afin de former des phases hydrauliques à savoir les silicates bicalciques C₂S.

2.1.4 Potentiel de pollution

Les principaux polluants potentiellement contenus dans un sédiment marin sont essentiellement les PCBs, les métaux lourds, les hydrocarbures, les fluorures [Karl, 2004]. Pour déterminer leurs caractéristiques environnementales, nous avons réalisé des analyses de polluants totaux sur les sédiments. Ensuite, afin de comparer aux seuils définis par les différentes législations (voir chapitre 1), nous avons réalisé également des tests de lixiviation sur les sédiments. Dans le présent paragraphe on rapporte les résultats des polluants totaux ainsi que les résultats du test de lixiviation sur le sédiment brut. Le test de lixiviation a été réalisé selon la norme NF EN 12457-2. L'essai est intitulé : Essai de bûchée unique avec un rapport liquide-solide de 10 l/kg et une granularité inférieure à 4mm sur des sédiments séchés à 40°C. À partir de ces essais, on a déterminé les concentrations en principaux métaux souvent existants dans les sédiments de dragage (As, Ba, Cd, Cr, Cu, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Zn). On a également suivi la conductivité et le potentiel hydrogène des sédiments pendant le test de lixiviation. Des essais par chromatographie ont été réalisés pour déterminer les concentrations en chlorures, en sulfates et en fluorures. Enfin, les analyses des hydrocarbures, des PCBs, et des HAP ont été faites.

Dans le Tableau 2.19, il est reporté les analyses issues d'une attaque acide sur les sédiments. Ce résultat permet de mesurer la concentration totale des polluants dans le sédiment.

Eléments	S1	S2
As	14,00	24,40
Ba	194,40	205,20
Cd	< 4	< 4
Cr	51,20	69,20
Cu	63,60	78,00
Mo	< 4	< 4
Ni	18,40	23,20
Pb	25,20	515,20
Sb	< 4	7,60
Se	< 4	< 4
Zn	110,00	476,00

Tableau 2.19 : Résultats des analyses au micro onde (mg/kg de MS).

Les résultats de lixiviation sur le sédiment S1 utilisé pour la formulation de matériau routier sont détaillés dans le Tableau 2.20.

Paramètres	Unité	Ech1	Ech2	Ech3	Moyenne	
PH	PH	8,3	8,48	8,49	8,4	
Conductivité	σ	$\mu\text{S/cm}$	4,85	4,66	4,77	4,8
Métaux lourds	Arsenic As	mg/kg sec	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
	Barium Ba	mg/kg sec	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
	cadmium Cd	mg/kg sec	<0,004	<0,004	<0,004	<0,004
	Crome Cr	mg/kg sec	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
	Cuivre Cu	mg/kg sec	0,659	0,607	0,633	0,633
	molybdène Mo	mg/kg sec	0,913	0,899	0,889	0,900
	Nickel Ni	mg/kg sec	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04
	Plomb Pb	mg/kg sec	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
	Antimoine Sb	mg/kg sec	<0,004	<0,004	<0,004	<0,004
	Sélénium Se	mg/kg sec	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
	Zinc Zn	mg/kg sec	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
	Mercure Hg	mg/kg sec	<0,001	<0,01	<0,01	<0,01
Eléments solubles	Chlorures	mg/kg sec	18050	16710	16820	17193
	Cyanures	mg/kg sec	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
	Fluorures	mg/kg sec	0,061	0,061	0,06	0,061
	Sulfates	mg/kg sec	1980	2070	1970	2007
Produits organiques	TBT	mg/kg sec	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002
	MBT	mg/kg sec	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002
	DBT	mg/kg sec	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002

Tableau 2.20: Dosages en polluants sur éluats sur le sédiments S1

Les analyses ont montré la présence de cuivre (Cu) et de molybdène (Mo). Les autres éléments sont présents en quantités limitées à des traces. On peut noter les valeurs importantes en chlorures de l'ordre de 17g/kg de sédiment sec. Cette valeur place le sédiment en déchets dangereux à traiter avant son stockage au sens de la décision européenne 2003/33/CE.

Néanmoins, les chlorures sont toujours en grandes quantités dans le sédiment vu l'origine marine de ce dernier.

Des essais sur la partie solide du matériau lors de l'essai de lixiviation ont été également réalisés. Ces essais ont permis de relever des concentrations importantes en hydrocarbures et en carbone organique total (Tableau 2.21).

Paramètres	Unité	Valeur
COT	mg/kg	19000
HAP	mg/kg	9,09
hydrocarbures	mg/kg	440
Benzène-Toluène	mg/kg	<5

Tableau 2.21: Dosages en polluants sur solide dans le sédiment S1

Les analyses sur éluats ne montrent pas de polluants organiques remarquables. Ceci amène à mettre en évidence les liaisons matricielles entre la chaîne organique et la matrice sédimentaire.

Du point de vue mécanique, les sédiments sont des matériaux à faibles performances mécaniques. En effet, à l'état brut, les sédiments ne possèdent pas les exigences nécessaires pour un matériau de remblai [GTR, 2000]. Ils contiennent des phases de quartz et de silice peu réactives (Figure 2.18). Enfin, une analyse de lixiviation montre une forte concentration en sels, conformément à leur origine marine.

Pour employer les sédiments de dragage, donc, en techniques routières, il est opportun d'agir sur la composition (matière organique, sels, polluants,..) par traitements aux liants hydrauliques. Pour améliorer la texture du mélange et sa granulométrie, l'ajout de matériaux granulaires est à envisager. Pour cela, un autre déchet, les laitiers d'aciérie, de plus en plus en abondance, a été utilisé pour être incorporé dans les sédiments pour la formulation d'un matériau routier.

Dans le paragraphe suivant, nous détaillons les caractéristiques des laitiers utilisés.

2.2 Caractérisation des laitiers

Comme discuté dans le paragraphe suivant, les sédiments ont des faibles performances mécaniques vis-à-vis les exigences en techniques routières. Un traitement aux laitiers d'aciéries est envisagé.

Nous avons donc caractérisé deux laitiers utilisés dans la formulation de matériau routier. Ils seront notés LD1 et LD2. On détaillera tout d'abord, les caractéristiques physiques, à savoir, la granulométrie, la teneur en eau et la masse volumique. Ensuite, la minéralogie et la composition chimique des deux types de laitiers seront étudiées. Enfin, la qualité environnementale des deux laitiers sera abordée.

Les deux laitiers utilisés dans cette étude sont issus de deux processus sidérurgiques différents en fonction de la qualité des produits finaux. Les deux laitiers sont différents de par leur granulométrie et leur teneur en chaux, le premier contenant une quantité faible de chaux par rapport au second. Il sera noté LD1 tout au long de l'étude. Le laitier riche en chaux sera noté LD2.

2.2.1 Caractérisation physique

2.2.1.1 Distribution granulométrique

Les laitiers étudiés ont une distribution granulométrique proche d'un gravier comme montré dans la Figure 2.19.

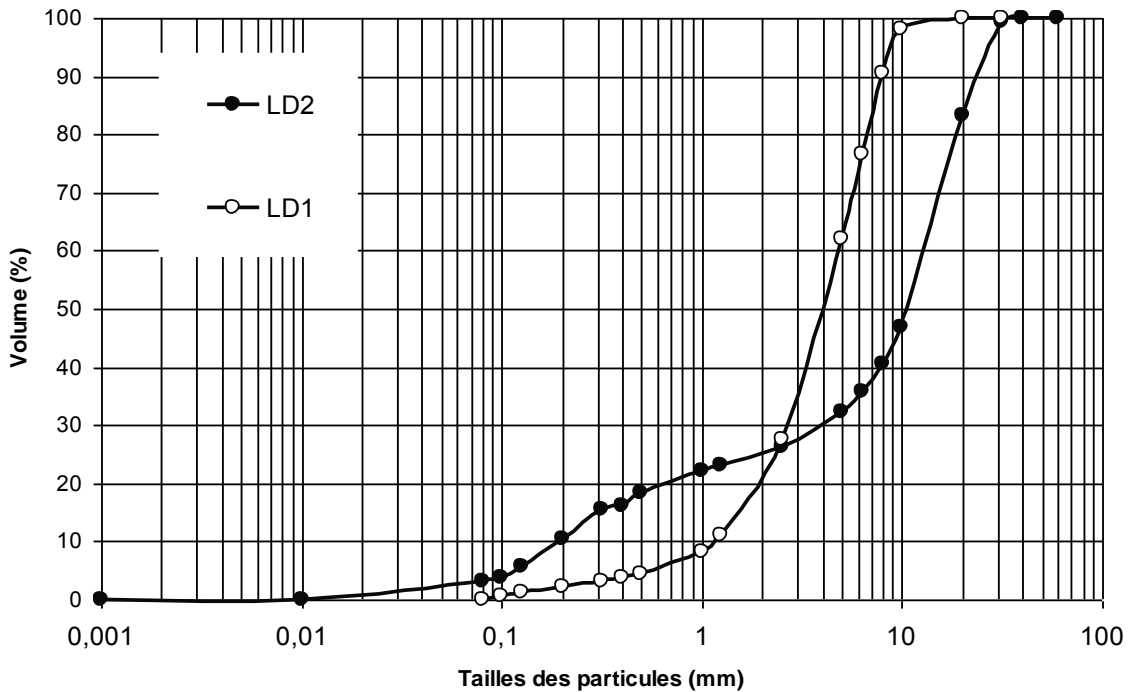


Figure 2.19: Distributions granulométriques des laitiers d'aciérie

Dans le Tableau 2.22, on résume les paramètres essentiels de la granulométrie des deux laitiers.

Paramètres	LD1	LD2
d_{10} (%)	1,2	0,29
d_{30} (%)	2,7	4
d_{50} (%)	4,1	11
d_{60} (%)	4,9	15
C_c	1,24	3,68
C_u	4,08	51,72

Tableau 2.22: Caractéristiques granulométriques des laitiers

La distribution granulométrique des laitiers LD2 est plus étalée que celle des laitiers LD1. Cependant, ces derniers ont une distribution granulométrique plus uniforme. Le laitier LD1 possède une fraction 0/10, contre une distribution plus large de 0/30mm pour LD2. le laitier LD2 rentre dans la catégorie des cailloux, selon le GTR, 2000. Les deux laitiers possèdent la majorité des particules entre 2 et 20mm, soit 75 % de gravier dans LD1 et plus de

50% de gravier dans le laitier LD2. La dernière fraction qui est inférieure à 2mm est constituée essentiellement de sable pour les deux laitiers. Elle représente 20% environ pour les deux laitiers. Il paraît également que la partie fine (<80 μ m) est négligeable dans les laitiers étudiés.

2.2.1.2 Teneur en eau

Les laitiers sont récupérés et séchés à la sortie du processus de fabrication d'acier. L'eau contenue dans ces matériaux est issue du processus de refroidissement et ensuite pendant le processus du murissement. Les travaux de formulation sont livrés après une période de murissement, ainsi, ils peuvent contenir de faible quantité d'eau. Nous avons mesuré la teneur en eau dans une étude réglée à 105°C selon la norme NF P 94-050. Dans le Tableau 2.23, on reporte la moyenne de 3 valeurs mesurées sur trois échantillons de laitiers LD1 & LD2.

Laitiers	w _{moy} (%)	Ecartype (%)
LD1 (%)	0,45	0,05
LD2 (%)	3,23	0,34

Tableau 2.23: Teneur en eau des laitiers utilisés

Il apparaît que la teneur en eau est inférieure à 0,5% pour LD1 et inférieure à 3% pour LD2. Les laitiers sont initialement secs, cependant, durant la période de murissement peuvent retenir une faible quantité d'eau. Pour le laitier LD1 qui contient moins de fines que LD2 le potentiel de rétention d'eau est plus faible.

2.2.1.3 Masse volumique apparente et porosité des granulats

La porosité des granulats semblent influencer la stabilité mécanique des granulats dans des mélanges granulaires sous chargement. Ce paramètre est évalué donc conformément à la norme NF EN 1097-6. Les résultats de cette analyse sont reportés dans le Tableau 2.24.

N° ech	Masse vol. réelle (t/m ³)	Masse vol. absolu (t/m ³)	Volume des vides	Coef. d'adsorption d'eau (%)	Masse vol réelle imbibée (t/m ³)	Porosité (%)	Moyenne	
LD1	1	3,59	4,67	19,70	1,67	4,74	6,37	6,31
	2	3,74	4,69	20,50	1,78	4,77	6,19	
	3	3,35	4,63	21,14	1,77	4,71	6,39	
LD2	1	3,24	3,52	58,50	1,44	3,57	4,72	5,22
	2	3,20	3,50	64,30	1,67	3,56	5,44	
	3	3,25	3,52	55,20	1,45	3,58	5,50	

Tableau 2.24: Paramètres de porosité des laitiers

La porosité des deux laitiers est assez comparable. Le laitier LD1 est légèrement plus poreux à l'eau vu la présence de partie fine moins importante que dans le laitier LD2.

2.2.1.4 Masse volumique absolue

La masse volumique absolue est déterminée également à l'aide d'un pycnomètre à hélium de type Accupyc 1330. Les résultats sont reportés dans le Tableau 2.25:

Laitier	Moyenne (t/m ³)
LD1	3,56
LD2	3,23

Tableau 2.25: Masse volumique absolue

Du point de vue masse volumique absolue, il apparait une valeur plus importante pour le laitier LD1 en comparaison du laitier LD2. Ceci traduit que la porosité intragranulaire des laitiers LD1 est moins importante que pour les laitiers LD2.

On remarque également que la mesure de la masse volumique absolue dépend de la technique utilisée. En fonction du fluide utilisée que ce soit l'eau (Tableau 2.24) ou l'hélium (Tableau 2.25), la différence est due à une consommation d'eau des granulats de laitiers due à leur composition riche en chaux (Tableau 2.26).

2.2.2 Caractérisation chimique

2.2.2.1 Dosage de la chaux

Les laitiers comportent une proportion importante de chaux vive. Il est indiqué dans le tableau suivant les pourcentages de chaux dans les deux laitiers. Durant cet essai, le processus Leduc a été utilisé. Les pourcentages de chaux sont reportés dans le Tableau 2.26.

	Echantillon	% CaO	% moy
LD1	1	6,15	6,60
	2	6,66	
	3	6,99	
	4	12,72	
LD2	5	14,54	13,86
	6	14,33	

Tableau 2.26: Proportion de la chaux CaO dans les deux laitiers

A partir du Tableau 2.26, on observe une nette différence en pourcentage de chaux entre les deux laitiers étudiés LD1 et LD2. Cette quantité de chaux réagit en présence de l'eau et peut générer une expansion volumique. Ce comportement est problématique pour la stabilité lors d'une utilisation en couches routières. Cependant, le mélange des laitiers avec des sédiments peut être un meilleur compromis. La quantité de chaux en excès sera utilisée pour la stabilisation et la solidification des sédiments. Ceci pourra optimiser le mélange avec les sédiments marins.

2.2.2.2 Caractérisation minéralogique

Les analyses minéralogiques ont été réalisées afin d'identifier les phases cristallines en présence dans les deux laitiers LD1 et LD2. Tout d'abord nous avons réalisé une analyse élémentaire par fluorescence X. Ensuite, nous avons identifié la composition minérale des laitiers par diffraction des rayons X.

a. Analyse par fluorescence X

Le résultat des analyses élémentaires effectuées sur les deux laitiers sont résumées dans le Tableau 2.27.

Elément	LD1 (%)	LD2 (%)
O	38,97	41,43
Ca	31,09	32,45
Fe	15,66	15,07
Si	6,29	4,82
Mg	2,53	1,66
Mn	2,14	1,79
Al	1,77	1,37
P	0,55	0,59
Ti	0,50	0,38
Cr	0,18	0,13
V	0,04	0,01
Na	0,01	0,01
S	0,01	0,01
Cl	0,01	0,01
K	0,01	0,01
Cu	0,01	0,01
Sr	0,01	0,01
Total	99,74	99,72

Tableau 2.27 : Composition élémentaire des laitiers étudiés

Le pourcentage d'oxygène est estimé par stœchiométrie. Ainsi, à partir des éléments en présence, on calcule la quantité nécessaire d'oxygène pour la formation des oxydes formés à partir des éléments alcalinoterreux du Tableau 2.27.

Les laitiers contiennent une importante quantité de calcium et de silicium. Ces deux éléments se trouvent essentiellement dans des phases minérales siliceuses qui permettent d'avoir une dureté importante dans les laitiers. Ils contiennent également un taux important de fer. A titre comparatif, la composition des deux laitiers est présentée à la Figure 2.20, mis à part l'oxygène O, les éléments importants des deux laitiers étudiés.

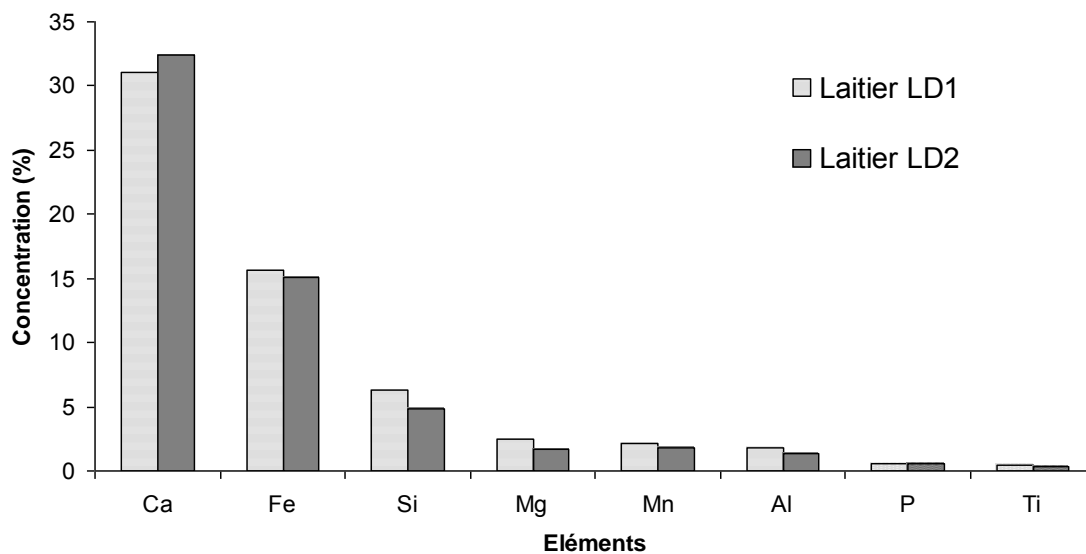


Figure 2.20 : Comparaison de la composition des laitiers étudiés

La composition des deux laitiers est globalement similaire. Une légère variation au niveau de la concentration des éléments dans les deux laitiers. Cette différence revient essentiellement à la nature des phases en présence composés par les éléments détaillés dans la Figure 2.20. Pour cela, une identification par DRX a été réalisée

b. Diffraction des rayons X

Dans la Figure 2.21, on présente les spectres DRX des deux laitiers étudiés.

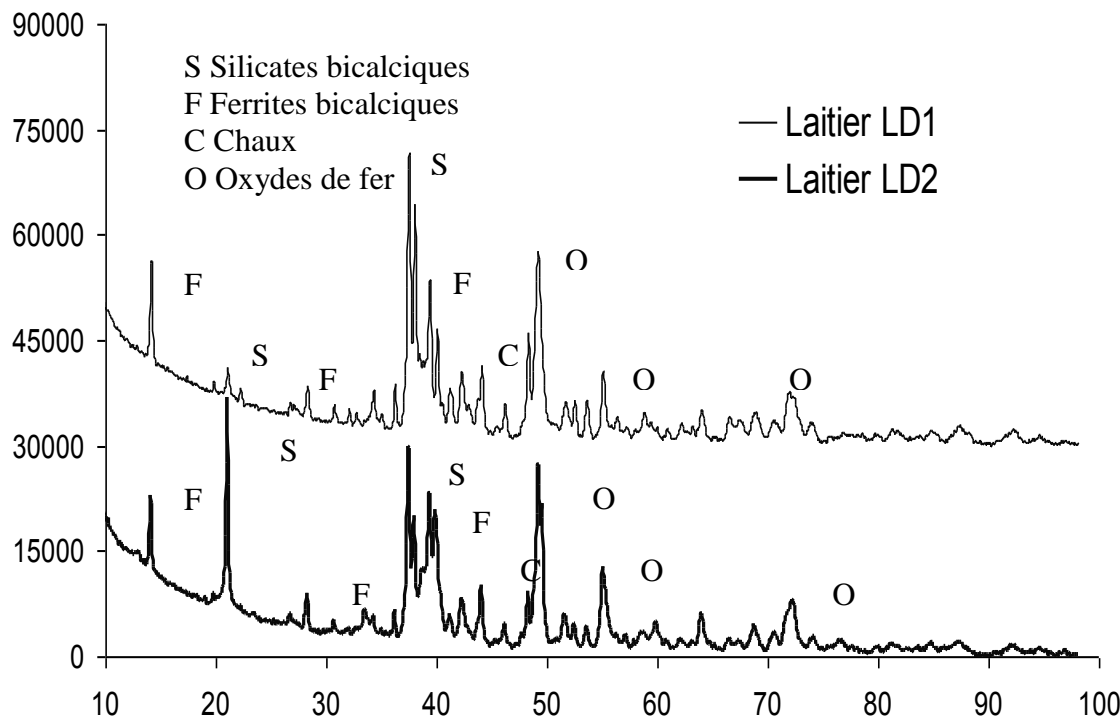


Figure 2.21: Spectres des laitiers LD1 & LD2 issus de DRX

On remarque la présence de 4 phases minérales : les silicates bicalciques sous forme de larnite, les silicates ferrites, la chaux et les oxydes de fer. Ces phases sont formées essentiellement durant la phase de calcination à hautes températures de la chaux en présence du quartz. Les formes des silicates (β -C₂S) sont liés au processus du refroidissement plus au moins lent.

2.2.3 Comportement mécaniques des laitiers utilisés

2.2.3.1 Essai Proctor

On présente dans la Figure 2.22, la courbe Proctor modifié est réalisée sur les deux laitiers LD1 et LD2. Pour le laitier LD1, la courbe Proctor est plate. La détermination de la teneur en eau correspondante à la masse volumique du sol sec maximale dépend sensiblement de l'appréciation. Ainsi, cette masse volumique est atteinte sur une large plage de teneur en eau. Contrairement au laitier LD1, le laitier LD2 présente une courbe de densité « en cloche ». La masse volumique maximale est atteinte sur un intervalle de teneur en eau limité par rapport aux laitiers LD1. La teneur en eau optimale est plus simple à déterminer que pour le laitier LD2

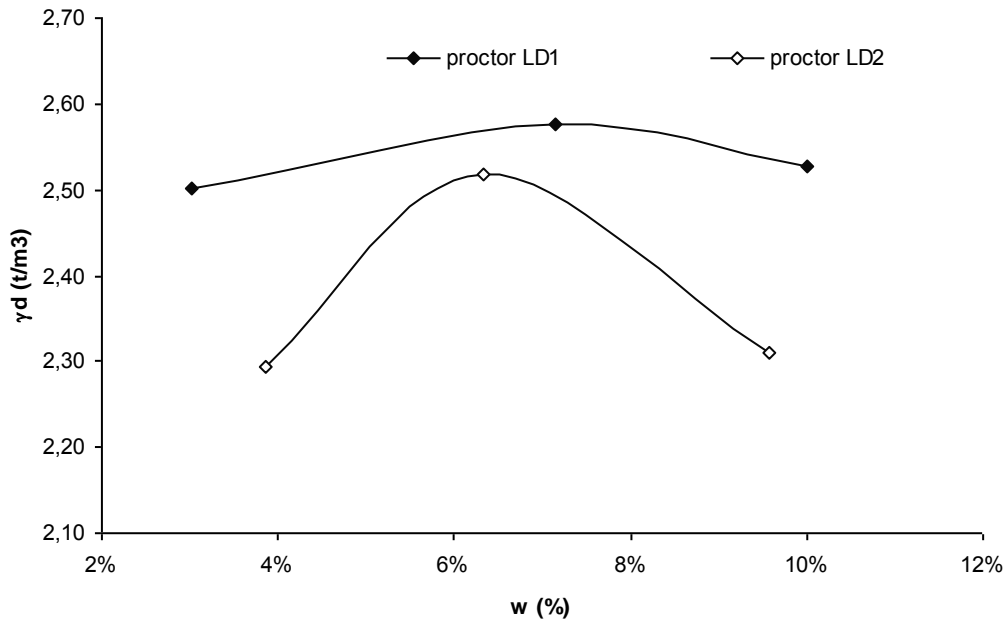


Figure 2.22: Courbes Proctor des laitiers utilisés

Par conséquent, le laitier LD2 est plus sensible à l'eau que le laitier LD1.

En termes d'optimum Proctor, on remarque que le laitier LD1 possède une masse volumique du matériau sec de l'ordre de $2,57\text{t/m}^3$ avec une teneur en eau optimale de 7,5%. Pour le laitier LD2, la masse volumique du matériau sec est de l'ordre de $2,51\text{ t/m}^3$ et la teneur en eau optimale est de 6,5% pour le laitier LD2.

2.2.3.2 Indice portant immédiat

L'indice portant immédiat IPI est étudié pour les deux types de laitier : LD1 et LD2. Les résultats obtenus sont reportés dans la Figure 2.23.

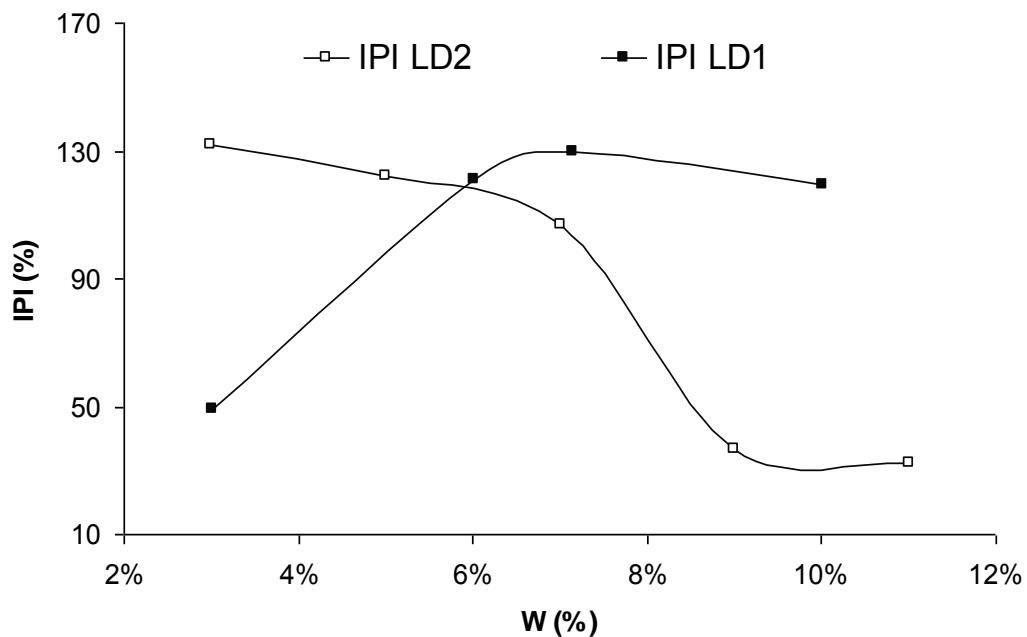


Figure 2.23 : Indice portant immédiat des laitiers étudiés

Les laitiers d'aciérie possèdent une portance immédiate très élevée. A la teneur en eau optimale, l'IPI est de 130% pour LD1 et de 120% pour le laitier LD2. Du point de vue comportement mécanique à court terme, les laitiers d'aciérie répondent largement aux exigences établies pour leur utilisation comme matériaux routiers.

2.2.4 Potentiel de pollution

Dans ce paragraphe, nous allons discuter sur les polluants existants dans les laitiers. Cette analyse permet de suivre et contrôler le rejet des laitiers durant leur utilisation en couche de chaussée. D'abord, une analyse des polluants totaux a été abordée afin de connaître la charge maximale en polluants des laitiers. Des essais ont été réalisés par lixiviation selon la norme X30402-2 avec un rapport L/S égal à 10.

Les résultats de l'essai de lixiviation et de concentration totale sont détaillés dans le Tableau 2.28:

Eléments/Paramètres	Unité	Polluants totaux	Lixiviation	% d'extraction
PH			12,9	-
Conductivité	µS/cm		7388	-
Potentiel redox	mV		144	-
Température	°C		20,9	
Arsenic As	mg/kg MS	<2	<0,1	5
Barium Ba	mg/kg MS	128	3,33	2,60
cadmium Cd	mg/kg MS	<1	<0,005	0,50
Crome Cr	mg/kg MS	910	<0,1	0,00
Cuivre Cu	mg/kg MS	2,7	<0,1	<3,70
molybdène Mo	mg/kg MS	4	<0,1	<2,5
Nickel Ni	mg/kg MS	4	<0,1	<2,5
Plomb Pb	mg/kg MS	5,7	0,58	10,18
Antimoine Sb	mg/kg MS	-	<0,1	-
Sélénium Se	mg/kg MS	-	<0,1	-
Zinc Zn	mg/kg MS	<6	0,4	6,67
Mercure Hg	mg/kg MS	<0,2	<0,01	5,00
Chlorures	mg/kg MS		8,8	-
Cyanures	mg/kg MS	0,213	<0,05	<23,47
Fluorures	mg/kg MS	-	<1	-
Sulfates	mg/kg MS	-	19,15	-

Tableau 2.28 : Caractérisation environnementale des laitiers d'aciérie

A partir du Tableau 2.28, il apparaît que les laitiers ne sont pas pollués en se référant à la réglementation des mâchefers (2003/33/CE). En termes d'utilisation en techniques routières les laitiers sont des matériaux non pollués. Cependant, en termes de polluants totaux, extraits à l'acide, les laitiers contiennent essentiellement du baryum et du chrome. Le suivi du potentiel de largage en fonction des conditions climatiques peut s'avérer nécessaire.

2.3 Conclusion

Les laitiers d'aciérie présentent de bonnes caractéristiques physiques, mécaniques et minéralogiques susceptibles d'agir sur la composition d'un mélange entre un sédiment de dragage et des laitiers d'aciérie. Cependant, les sédiments sont souvent sous forme de vase à l'état initial. Avec l'ajout de laitier, la teneur en eau optimale aura une tendance à baisser. Il est donc important de diminuer la quantité initiale d'eau pour garder le comportement mécanique des laitiers à l'OPM Proctor. En plus, l'eau contenue dans les sédiments est chargée en sels. Afin d'étudier les mécanismes de séchage et de définir les méthodes les plus rapides, efficaces et économique, nous discutons de la problématique de l'excès en eau des sédiments dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 3
**PRÉTRAITEMENT ET SÉCHAGE DES SÉDIMENTS DE
DRAGAGE**

Chapitre 3 Prétraitement et séchage des sédiments de dragage

3.1 Introduction

Les sédiments fins contiennent une quantité considérable d'eau. Ils ont une teneur en eau initiale qui varie entre 150% et 200%. Cette quantité d'eau augmente le volume du sédiment solide et pose un problème de transport et lors de certains types de valorisation. Du point de vue granulométrique (voir chapitre 2), les sédiments sont très fins, ils contiennent plus de 90% de particules inférieures à 80 μ m. Ce sont des matériaux de type argilo-limoneux. Ils ont une capacité de rétention d'eau importante. De plus, les sédiments peuvent contenir des polluants organiques ou inorganiques comme des métaux lourds. Ainsi, leur transport doit, dans certains cas, respecter des conditions particulières de sécurité.

Pour diminuer la teneur en eau des sédiments, plusieurs techniques industrielles de séchage existent (voir chapitre 1). Cependant, ces techniques nécessitent des moyens énergétiques et s'avèrent onéreuses.

Dans la présente étude, nous chercherons à explorer l'opération de déshydratation des sédiments par des procédés naturels. Ceci afin de réduire leur poids et faciliter leur transport en bennes ouvertes. Dans ce chapitre, nous allons étudier le séchage naturel par drainage et/ou évaporation. Ces méthodes sont celles nécessitant le moins d'énergie. Il nécessite cependant une surface plus importante. Plusieurs zones portuaires en France peuvent répondre à ces moyens d'espace. Ils sont généralement dans des vastes zones industrielles (Port de Dunkerque).

Pour le séchage par drainage, l'eau se dégage par percolation. Dans ce cas, la capacité du sédiment à laisser passer l'eau entre les particules est essentielle. Ce phénomène est contrôlé par la porosité connectée du sédiment. Pour l'évaporation, en plus de la structure du matériau, les conditions environnementales (température et humidité relative) sont essentielles.

Dans cette étude, les effets de plusieurs paramètres sur le processus de déshydratation ont été étudiés. Parmi ces paramètres : la teneur en eau initiale, la nature du sédiment et le traitement par un liant hydraulique. Dans ce travail, en plus d'explorer la réduction de la teneur en eau, le potentiel de pollution en fonction de l'état hydrique et le procédé du séchage sont explorés.

Un dispositif expérimental, pour étudier les deux phénomènes (drainage et évaporation) séparément ou combinés en fonction de ces derniers paramètres, est développé.

3.2 Essais réalisés

3.2.1 Dispositif et programme expérimental

Le dispositif expérimental mis en place est présenté en Figure 3.1. Pour l'étude de l'évaporation, les sédiments sont exposés à l'air libre comme dans la Figure 3-1-a. Pour l'étude du drainage, les éprouvettes cylindriques sont étanches en haut et munies de trous en bas. Les éprouvettes sont posées sur un bac de récupération d'eau comme dans la Figure 3-1-b. Pour l'étude de l'évaporation et le drainage, les éprouvettes sont comme illustré en Figure 3-1-c.

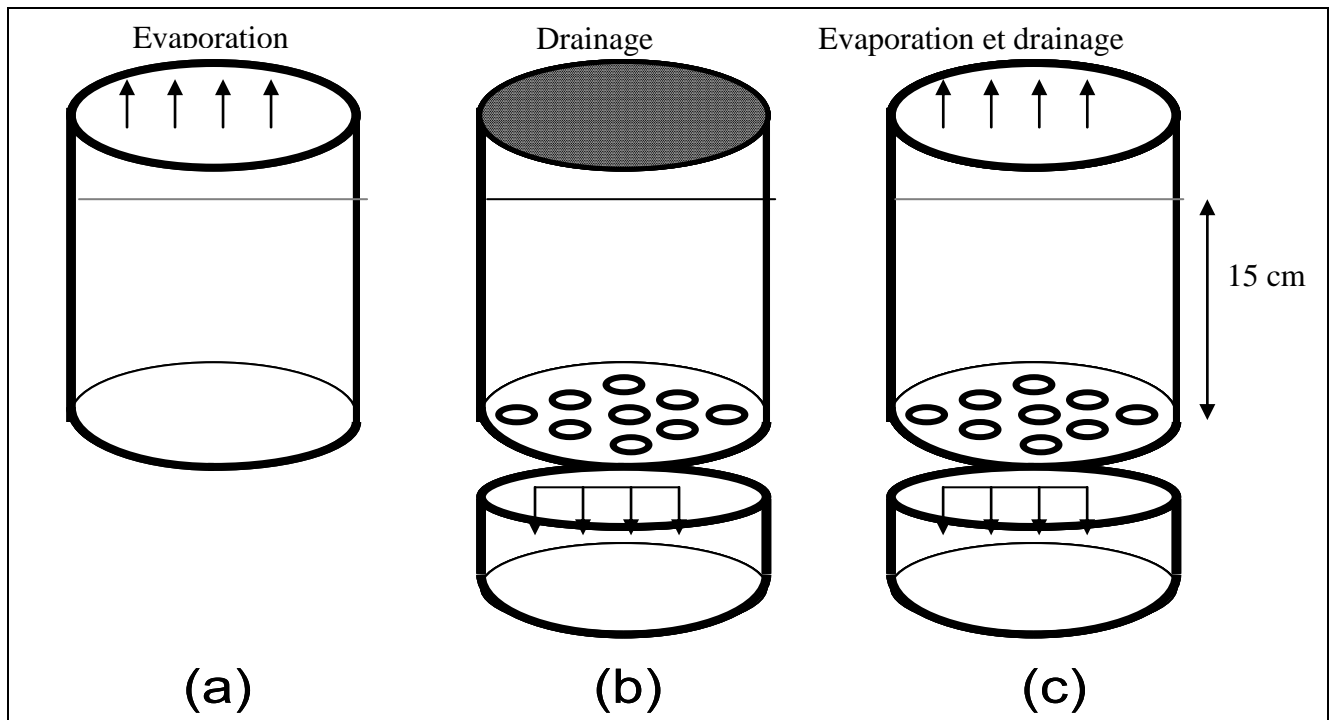


Figure 3.1: Protocole expérimental

Pour chaque dispositif, nous avons utilisé deux diamètres d'éprouvettes 70 mm et 110 mm. La hauteur de remplissage de sédiments dans les éprouvettes est maintenue fixe et égale à 15 cm.

Pour l'étude de l'évaporation, en plus de l'étude sur les sédiments (dénommés S1 et S2), des expériences dans les mêmes conditions ont été réalisées sur l'eau de mer. Enfin des essais de séchage sur les sédiments avec un traitement préalable à la chaux de 3% et 6% ont été réalisés. Les différentes configurations étudiées dans ce chapitre sont détaillées dans le tableau suivant (Tableau 3.1). Il est néanmoins important de souligner que, plusieurs essais préalables ont été nécessaires pour mettre au point la méthodologie proposée.

Type de matériau	S1 brut, S1 traité et S2		Eau de mer	
Diamètre des échantillons (mm)	70	110	70	110
Configuration	a	a	a	a
	b	b	-	-
	c	c	-	-

Tableau 3.1 : Programme expérimental de l'étude du séchage par drainage et par évaporation.

3.2.2 Conditions de mesures

Les essais ont été réalisés dans une salle fermée où la température est maintenue fixe. Tout au long des essais, les paramètres climatiques à savoir la température et l'humidité relative ont été enregistrés (Figure 3.2). La température moyenne enregistrée pendant la période d'essai est de 20,5°C avec un écart type de 1,7°C et l'humidité relative moyenne est de 47% avec un écart type de 5,7% (Figure 3.2).

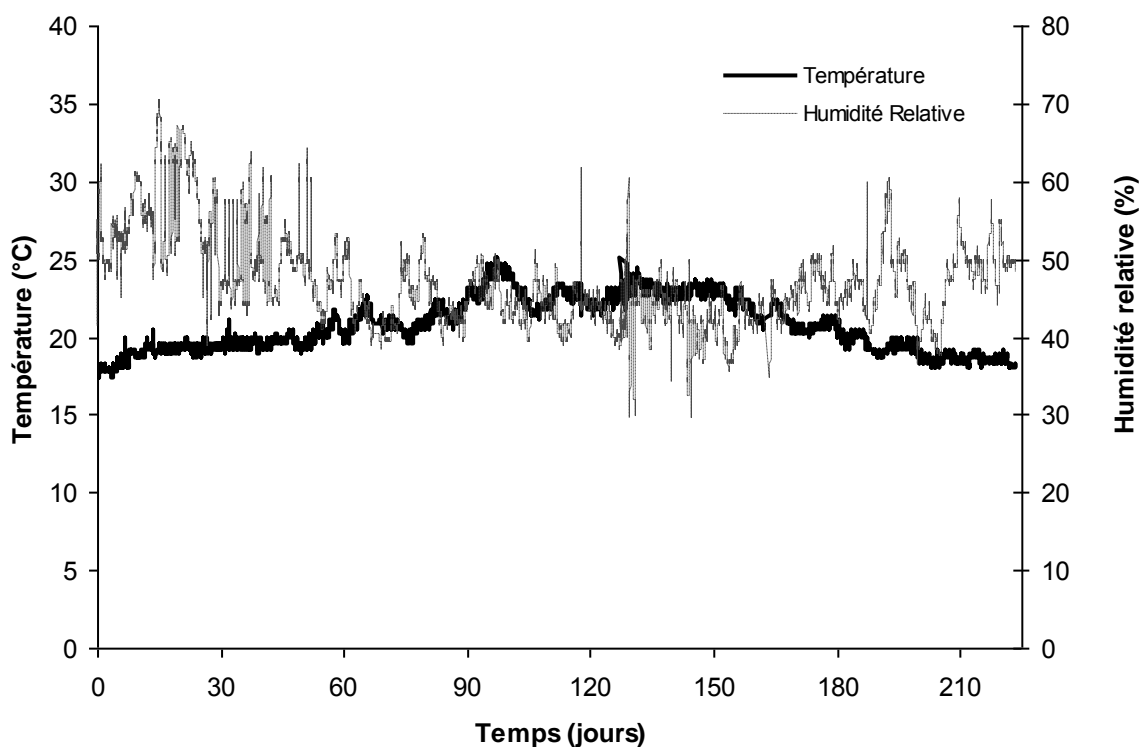


Figure 3.2 : Evolution de la température et de l'humidité relative, pendant l'essai

3.3 Exploitation des résultats

Les résultats ont été traités selon la teneur en eau, la masse d'eau dégagée et le potentiel d'évaporation et/ou de drainage. Ce dernier est défini par le rapport du volume d'eau dégagée par évaporation et/ou par drainage sur la surface initiale exposée à l'évaporation et/ou exposée au drainage. La teneur en eau $w(t)$ est estimée à partir de la masse totale de

l'échantillon à l'instant t , de la quantité d'eau initiale dans les sédiments et de la perte de masse due à l'évacuation d'eau. Elle est égale au rapport de la masse d'eau dans les sédiments sur la masse du sédiment sec. La masse d'eau dans le sédiment est estimée à partir de la variation de la masse totale de l'échantillon par rapport à l'état initial. Cette quantité d'eau correspond à la perte en eau par drainage et/ou évaporation. Dans le cas de drainage et d'évaporation combinés, la variation de la masse d'eau correspond à la perte totale par évaporation et par drainage. Pour cela, à chaque mesure, la quantité d'eau drainée par le bas est pesée. Cette méthode est simple et ne nécessite pas l'utilisation de capteurs de mesure spécifique. Toutefois, la teneur en eau ainsi mesurée correspond à une valeur moyenne dans tout l'échantillon. Il est clair que, la partie supérieure des échantillons est la plus déshydratée. Pour vérifier la reproductibilité des résultats, les mesures ont été répétées sur trois éprouvettes pour chaque type d'essai. L'analyse des résultats porte sur la moyenne des trois valeurs enregistrées. La moyenne des trois valeurs des échantillons étudiés.

3.3.1 Evaporation

Avant d'aborder l'étude de l'évaporation à partir des sédiments de dragage, dans un premier temps, une étude sur la base de l'eau de mer a été réalisée. Les résultats de l'évaporation de l'eau de mer sont présentés sur la Figure 3-3.

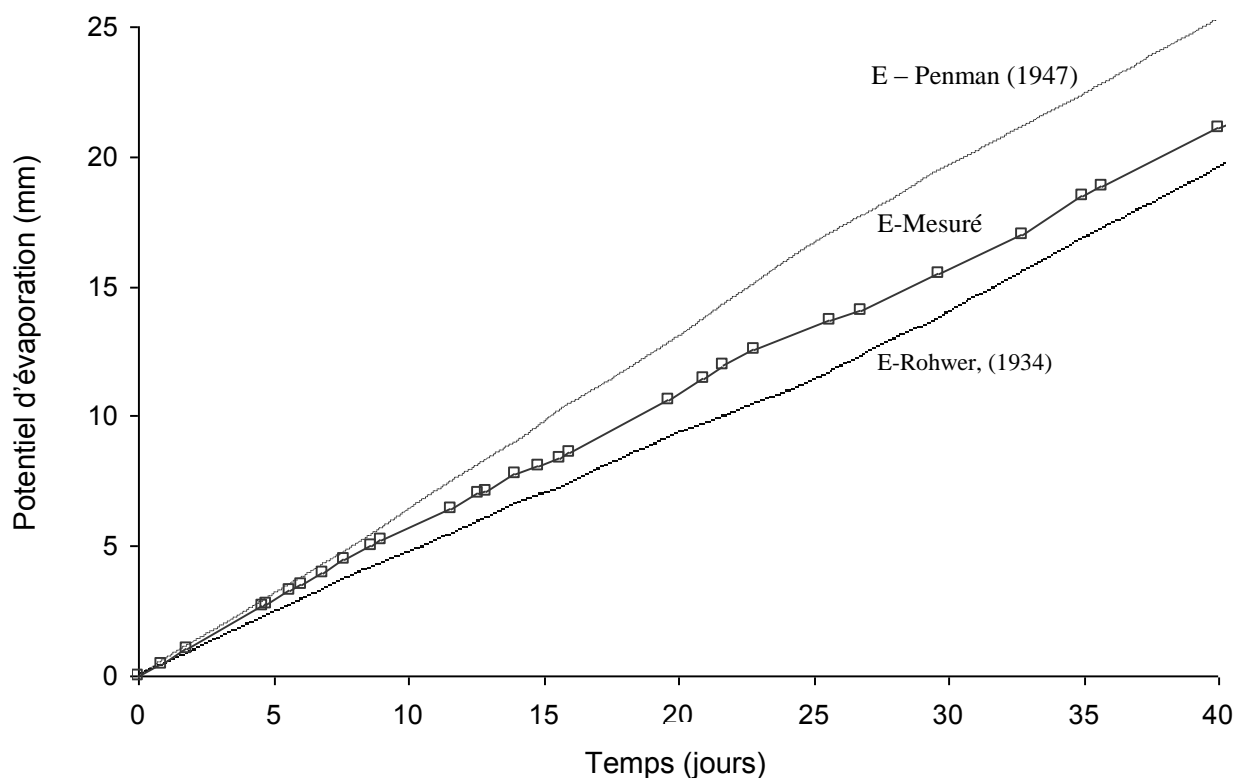


Figure 3.3: Comparaison entre des modèles de prédiction et l'évaporation mesurée

A partir de cette figure, on observe une variation quasi-linéaire du potentiel d'évaporation de l'eau de mer (E-Mesuré) en fonction du temps. Ce résultat est dû aux conditions d'essai quasi-stables en termes de température et d'humidité.

Ensuite, les mesures du potentiel d'évaporation dans les sédiments sont comparées avec des prédictions par deux modèles souvent utilisés dans l'estimation de l'évaporation d'eau sur une surface par évaporation. Sur la base des équations.1.8 et 1.12 du Chapitre 1, sur la même figure, la prédiction du potentiel de l'évaporation par les modèles de Rohwer, 1934 et de Penman, 1947 sont reportés (Figure 3.3). Pour le modèle de Rohwer, seules les valeurs de température et d'humidité sont nécessaires. Pour le modèle de Penman, les valeurs adoptées pour les paramètres de l'équation 1-12 sont présentées dans le Tableau 3.2.

Paramètres	Notation et unité	Valeurs adoptées
Irradiance	R_n (Wm^{-2})	0,000
Pente de la courbe de la pression de vapeur saturante	W ($Pa K^{-1}$)	2,043
Densité de l'air	ρ_a	1,012
Conductance atmosphérique	g_a ($m.s^{-1}$)	0,109
Capacité thermique de l'air	C_p air ($J kg^{-1} K^{-1}$)	4,181
Energie de vaporisation	λ_v ($kJ.kg^{-1}$)	2,256
Constante psychrométrique	γ ($Pa.K^{-1}$)	66,000

Tableau 3.2: Paramètres du modèle de Penman (1948)

L'analyse des résultats de la Figure 3.3 montre que le modèle de Penman surestime légèrement le potentiel d'évaporation. Au même moment, celui de Rohwer sous-estime les valeurs mesurées. Toutefois, dans les deux cas, l'écart journalier est inférieur à 0,1mm/jr soit 10% d'erreur par comparaison à la prédiction due au modèle de Penman et 0,05mm/jr soit 5% par comparaison à la prédiction donnée par le modèle de Rohwer. Cette précision reste largement suffisante dans ce type d'étude.

En complément à cette étude sur l'évaporation de l'eau de mer, dans les mêmes conditions, des essais d'évaporation d'eau de mer à partir de sédiments sont réalisés (sédiment S1). Les résultats de ces essais comparés à ceux de l'eau de mer sont présentés en Figure 3.4.

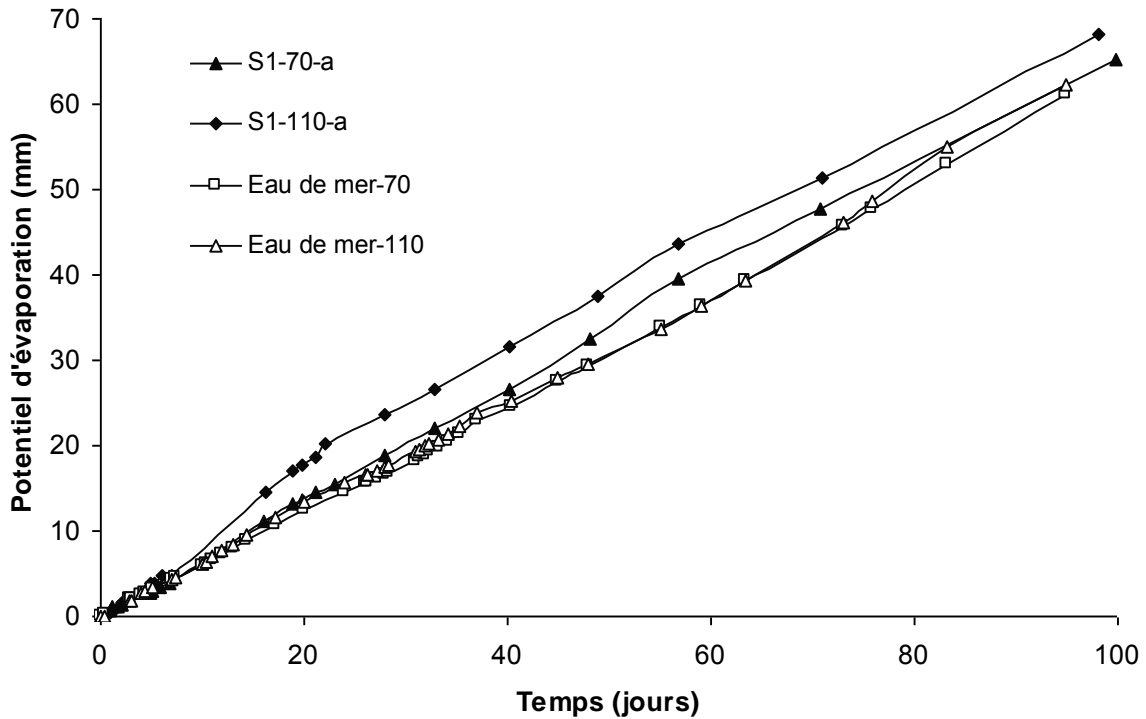


Figure 3.4: Comparaison entre l'évaporation de l'eau dans les sédiments bruts et de l'eau de mer seule

Il apparaît de même une relation linéaire entre le potentiel d'évaporation et le temps d'exposition. On remarque également que le gradient du potentiel d'évaporation dans les sédiments est équivalent à celui obtenu sur la base de l'étude de l'évaporation de l'eau de mer. Aussi le potentiel d'évaporation semble indépendant de la surface exposée.

Le résultat de la Figure 3.4 est présenté en termes de teneur en eau en fonction du temps dans la Figure 3.5.

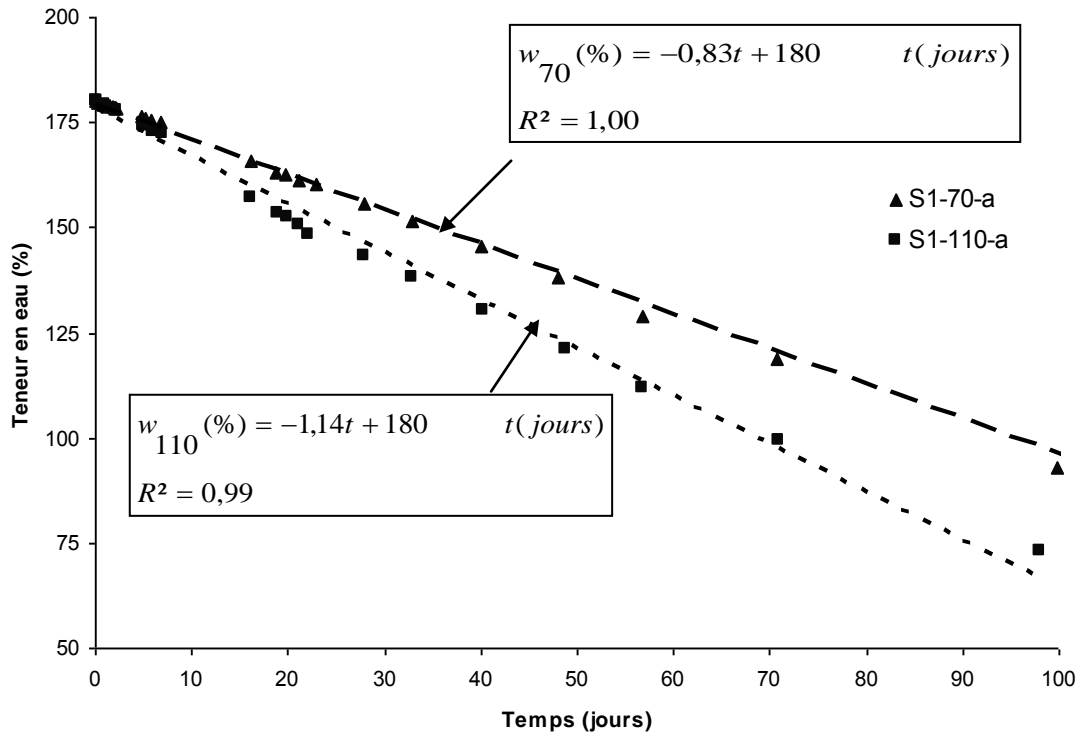


Figure 3.5: Evolution de la teneur en eau en fonction du temps par évaporation

La diminution de la teneur en eau des sédiments suit aussi une variation linéaire en fonction du temps pour les deux types d'éprouvettes en particulier à des teneurs en eau élevées. On remarque que l'échantillon ayant un diamètre de 110 mm présente une cinétique légèrement supérieure à celui dont le diamètre est de 70mm. La surface d'exposition est l'un des paramètres qui influent la cinétique de séchage. Cependant, la différence entre les deux types de diamètres de la Figure 3.5 nécessite des investigations complémentaires pour interpréter le résultat.

Dans la Figure 3.6, on présente la variation de masse dans les sédiments pendant l'évaporation. En effet, la masse présente essentiellement la variation directe en fonction de l'évaporation, contrairement à la teneur en eau, qui essentiellement déduite à partir de la variation de masse.

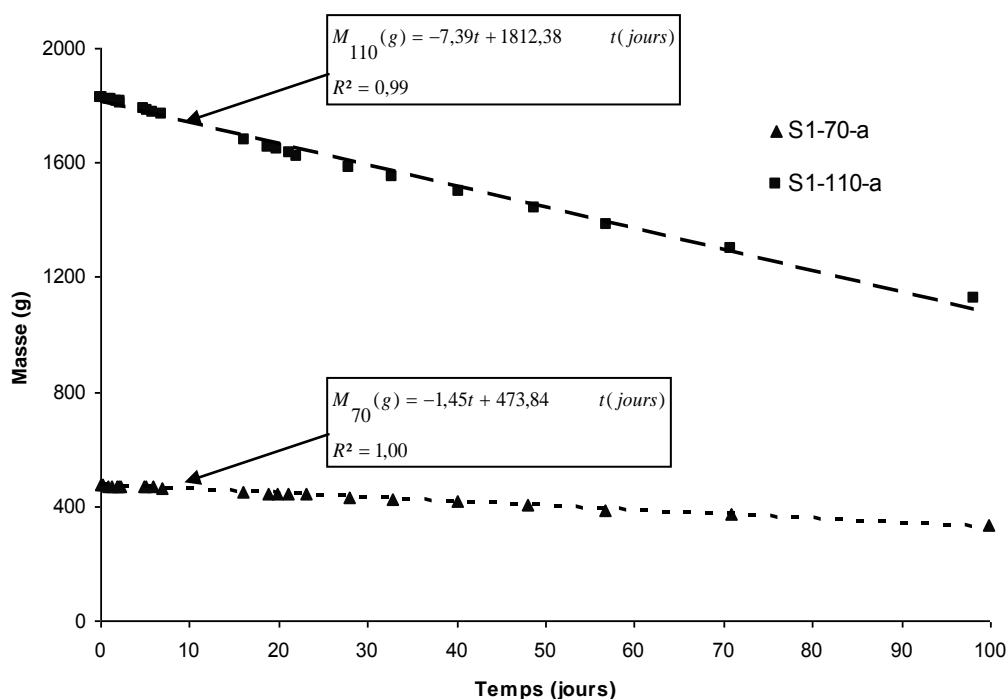


Figure 3.6 : Variation de la masse des échantillons du sédiment S1 durant le séchage par évaporation

La variation de la masse des éprouvettes en fonction du temps est linéaire durant le séchage par évaporation (Figure 3.6). Pour les deux séries, cette variation est constante. Cependant, elle varie entre les deux séries en termes de cinétique (g/jr). En effet, L'évaporation moyenne de l'eau dans les sédiments de la série de diamètre 110mm est de l'ordre de 7,39 g/jr. Pour la série de diamètre 70 mm, l'évaporation ne libère que 1,45 g/jr. Le rapport des cinétiques de variation de masse entre les deux surfaces est de l'ordre de 5 pour un rapport de surfaces exposées de 2,5 environ. Il est à rappeler que si on admet que le potentiel d'évaporation est constant, ceci conduit à trouver une relation directe entre le rapport de

variation de masse $\frac{\Delta m_1}{\Delta m_2}$ et des surfaces exposées $\frac{S_1}{S_2}$ tels que,

$$\frac{\Delta m_1}{\Delta m_2} = \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2, \text{ Avec l'indice 1 correspond au diamètre 70mm et l'indice 2}$$

correspond au diamètre 110 mm dans notre étude.

Afin de tenter d'expliquer cette observation, des essais complémentaires sont réalisés avec des éprouvettes de diamètres différents.

Pour l'étude de l'effet du type de sédiment sur le processus de séchage, sur la Figure 3.7, l'évolution des teneurs en eau pour les deux sédiments (S1 et S2) testés est reportée.

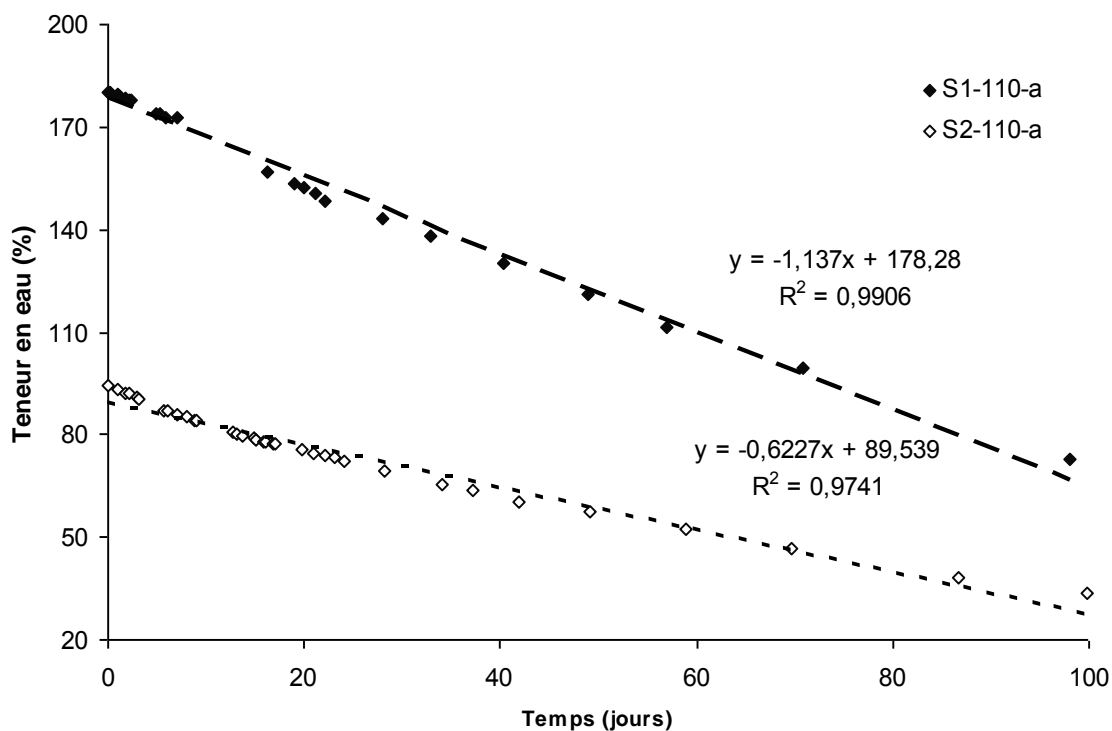


Figure 3.7: Evolution de la teneur en eau en fonction du temps par évaporation pour S1 et S2
Echantillons de diamètre 110mm

A partir de la Figure 3.7, on remarque que la variation de la teneur en eau en fonction du séchage par évaporation du sédiment S1 est plus importante que celle du sédiment S2. Pour le sédiment S1 la variation due à l'évaporation en termes de teneur en eau est de 1,14 % par jour. Le sédiment S2 présente une cinétique de 0,62% par jour. A partir de ce résultat, il apparaît clairement que le séchage par évaporation est lié à la teneur en eau initiale. Ce résultat prédit une variation non linéaire de la teneur en eau avec le temps sur de longues périodes. Egalement, la nature du sédiment peut affecter cette cinétique d'évaporation. Ce constat sera illustré avec des limites de liquidité et de plasticité des sédiments (voir. Chapitre 2).

Le résultat de la Figure 3.7 est présenté sur la Figure 3.8 en termes de variation de masse en fonction du temps.

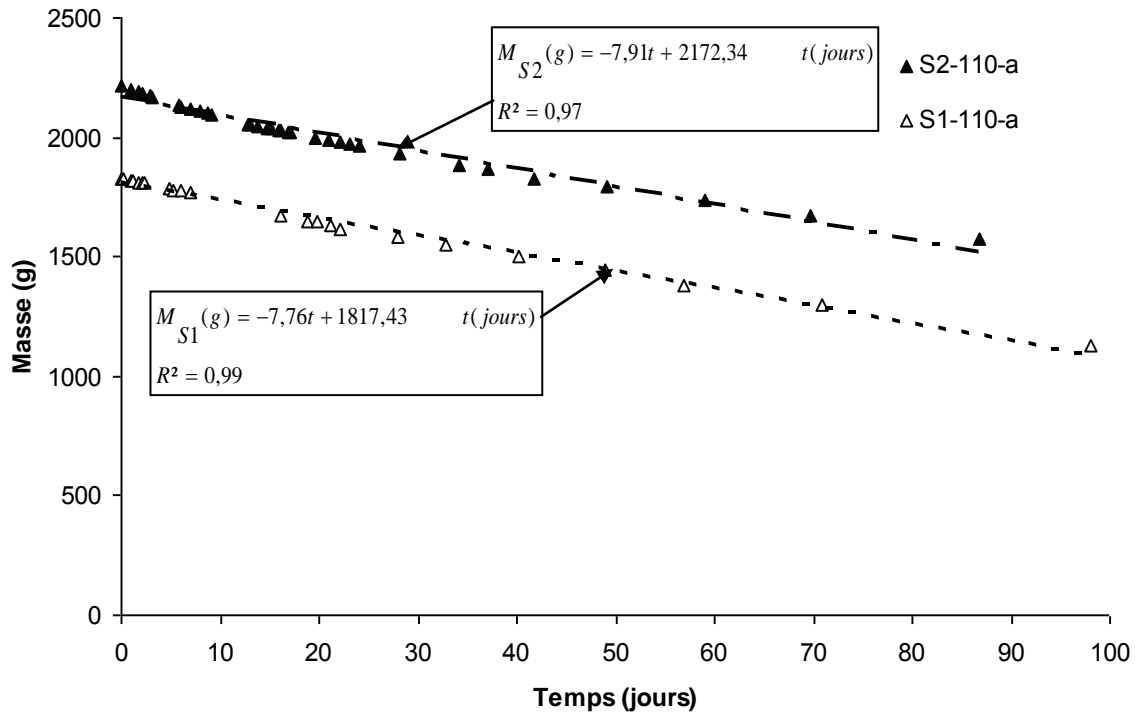


Figure 3.8 : Variation de la masse des échantillons des sédiments S1 et S2 durant le séchage par évaporation

On remarque que la variation de la masse est équivalente entre les deux sédiments S1 et S2. Ceci induit des variations de teneurs en eau avec des cinétiques différentes.

3.3.2 Séchage par drainage

Le drainage exprime l'aptitude de la couche de sédiments à laisser couler l'eau entre ses particules. Ce phénomène est contrôlé spécifiquement par la perméabilité [Van Passen, GAREAU, 2004]. L'objectif premier est de comparer l'efficacité du drainage par rapport à l'évaporation à court terme et à long terme. Ceci permettra d'optimiser par la suite l'opération de séchage. Il est à rappeler que la modélisation du phénomène de drainage dans les conditions de laboratoire ou de site peut nécessiter un modèle complexe. Néanmoins, un modèle simple comme la loi de Darcy peut donner un indicateur rapide sur les quantités d'eau drainées. Toutefois, avec le temps, la désaturation des sédiments entraînera des difficultés supplémentaires. Or, la *loi de Darcy* est basée sur les hypothèses suivantes :

- sol homogène et isotrope,
- sol saturé en eau,
- écoulement permanent à faible vitesse (faible coefficient de Reynolds),
- la vitesse de l'écoulement découle d'un potentiel d'énergie totale.

Pour l'étude de ce phénomène, sur la Figure 3.9 la variation moyenne (sur 3 essais) de la teneur en eau en fonction du temps pour le sédiment S1 est présentée.

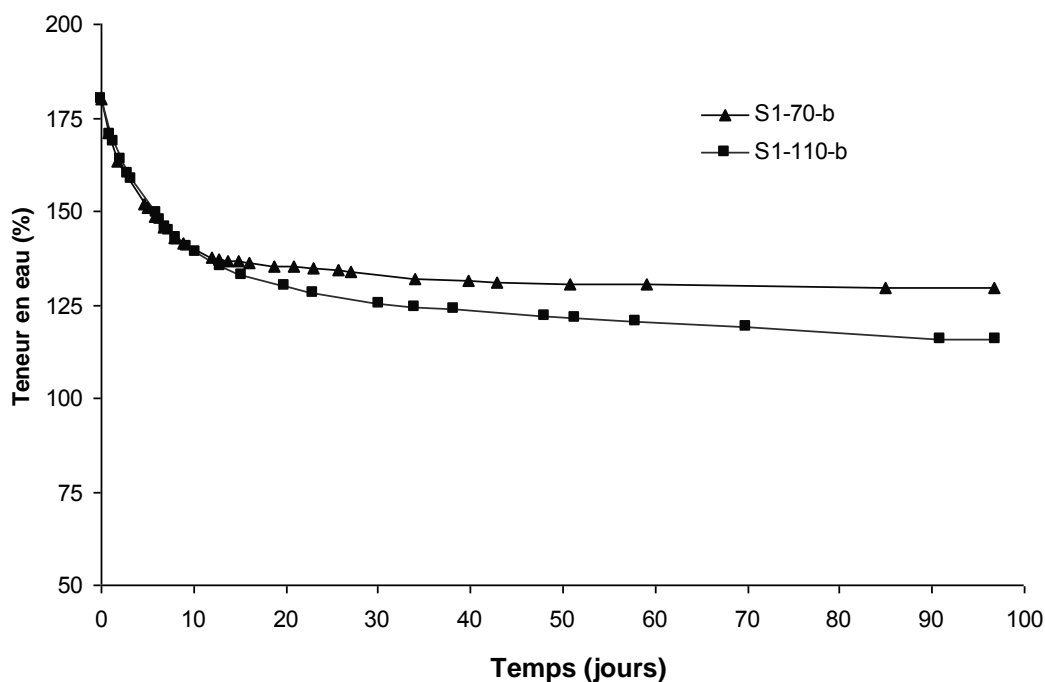


Figure 3.9 : Evolution de la teneur en eau en fonction du temps du drainage du sédiment S1

De ce résultat, il apparaît que l'évolution de la teneur en eau observée peut être approchée par deux segments linéaires. La première partie correspond à l'évolution pendant les dix premiers jours de drainage. Dans cette phase, le drainage est important. Au bout de 10 jours, la variation de la teneur en eau est quasiment nulle. Ce résultat est illustré par les pentes reportées dans le Tableau 3.3.

Configuration	<10 jours (exprimée en %)	>10 jours (exprimée en %)
S1-70-b	4,12	0,07
S1-110-b	4,35	0,16

Tableau 3.3 : Evaluation de la variation de la teneur en eau en fonction du temps du drainage

En termes de variation de masse, on présente dans la Figure 3.10 la variation de la masse due au drainage d'eau en fonction du temps. La variation de la masse est due la percolation d'eau en bas de l'échantillon. Ce mécanisme dépend de la perméabilité du matériau à chaque instant. A l'état initial, le sédiment est à l'état liquide ce qui lui permet un écoulement plus rapide d'eau. Cependant, à l'état plastique, le sédiment devient peu perméable. Le potentiel de drainage doit chuter sensiblement dû aux contraintes appliquées par les particules les unes sur les autres qui diminuent la porosité par rapport à l'état initial. Cette transformation peut, cependant, donner au matériau une résistance de cisaillement plus importante. Le but est d'atteindre une contrainte de cisaillement interne qui permet le transport et la manutention des sédiments avec moins d'eau et avec des techniques moins étanches (bennes ouvertes, camions, pelles,...)

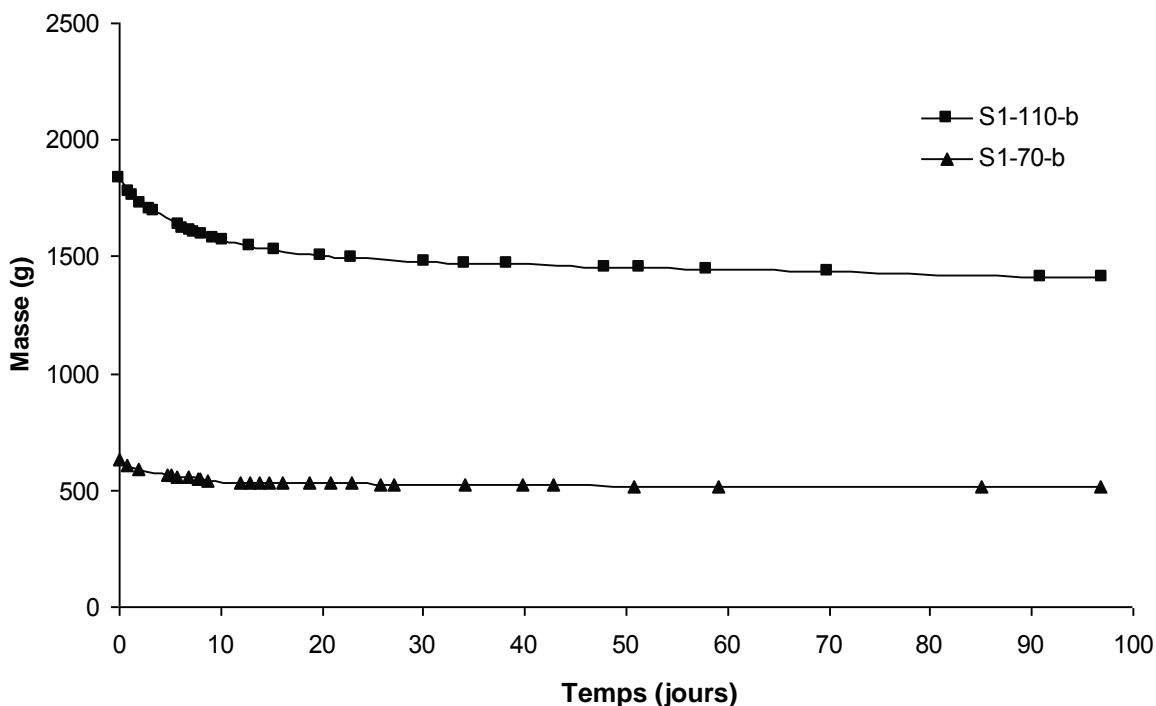


Figure 3.10 : Variation de la masse des échantillons de sédiments S1 durant le séchage par drainage

Effectivement, la variation de masse est importante au début de l'essai, elle dépasse 60% de l'eau totale évacuée pendant la durée de l'essai pour les deux types d'échantillons. La série d'essais avec un diamètre de 110 mm présente une variation massique totale de 423 g environ dont 260 g sur les 10 premiers jours du séchage. Pour la série d'essais avec un diamètre de 70mm, la variation totale moyenne est de 115 g, dont 85 g sur la période initiale.

La Figure 3.11 présente la variation de la teneur en eau en fonction du temps pour les deux sédiments étudiés S1 et S2. Les deux sédiments possèdent des limites de liquidité différentes. La limite de liquidité du sédiment S1 est de l'ordre de 112% environ. Le sédiment S2 a une limite de liquidité de l'ordre de 60%. Dans la Figure 3.11, on présente pour chaque sédiment S1 et S2 la variation moyenne des teneurs en eau pour les essais avec un diamètre de 110 mm.

On trace également la limite de liquidité par une droite horizontale afin de comparer l'évolution de la teneur en eau pendant le séchage par drainage par rapport à l'état plastique du sédiment.

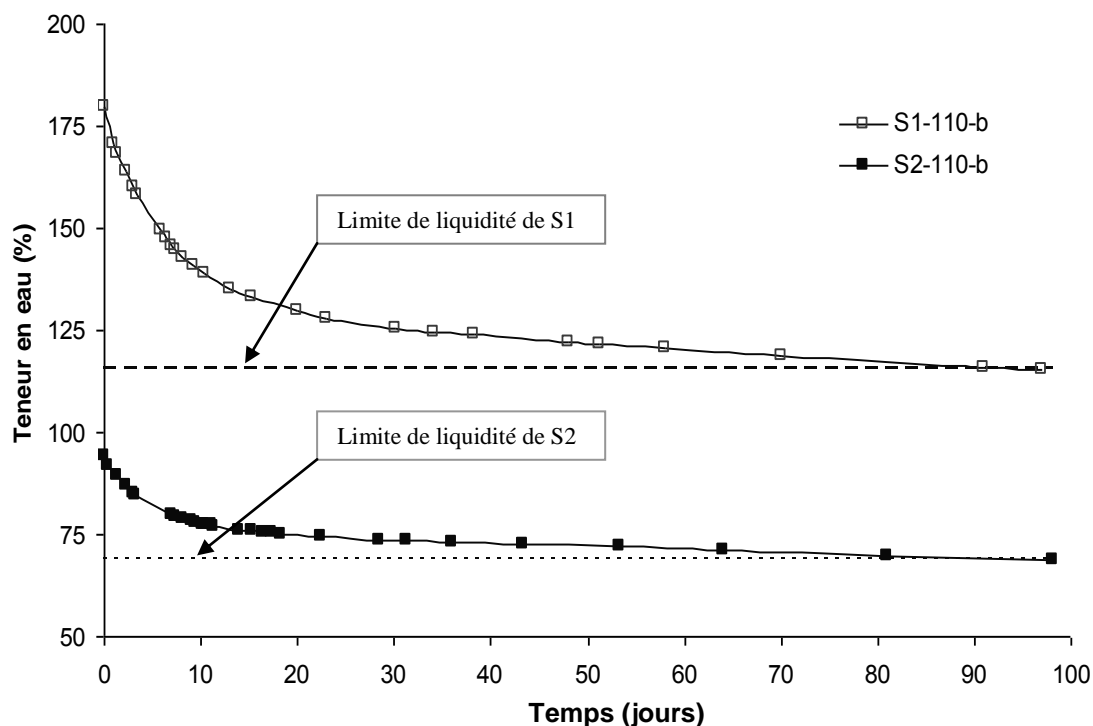


Figure 3.11: Evolution de la teneur en eau en fonction du temps par drainage pour S1 et S2 Echantillons de diamètre 110mm

En comparant le comportement des deux sédiments (Figure 3.11), on constate que la teneur en eau suit la même loi d'évolution dans les deux types de sédiments. Aussi, cette dernière se stabilise à une teneur en eau de 115 % pour S1 et 65 % pour S2 environ.

Cette teneur en eau est proche de la limite de liquidité comme définie par l'essai de la coupelle de Casagrande (voir chapitre 2). Au-delà de cette limite, l'effet du drainage devient négligeable. Le drainage est important pour ramener le matériau à la limite de liquidité pendant une courte durée. D'après les essais réalisés, 10 jours d'exposition de cette couche sont suffisant pour atteindre une teneur en eau assez proche de la limite de liquidité. Pour cela, la combinaison du drainage avec l'évaporation pourra présenter une optimisation importante du processus du séchage est sédiments.

3.3.3 Combinaison de l'évaporation et du drainage

Le processus de séchage par évaporation et drainage combinés est traité par le dispositif d'essais illustré dans la Figure 3.1-c. Les éprouvettes sont munies d'un filtre composé d'une pierre poreuse enveloppée d'un papier filtre en bas. L'évaporation est libre par le haut de l'éprouvette qui est ouverte pour ces essais.

Dans la Figure 2.12, on présente l'évolution de la teneur en eau du sédiment S1 pour les deux diamètres 70 et 110 mm en fonction du temps.

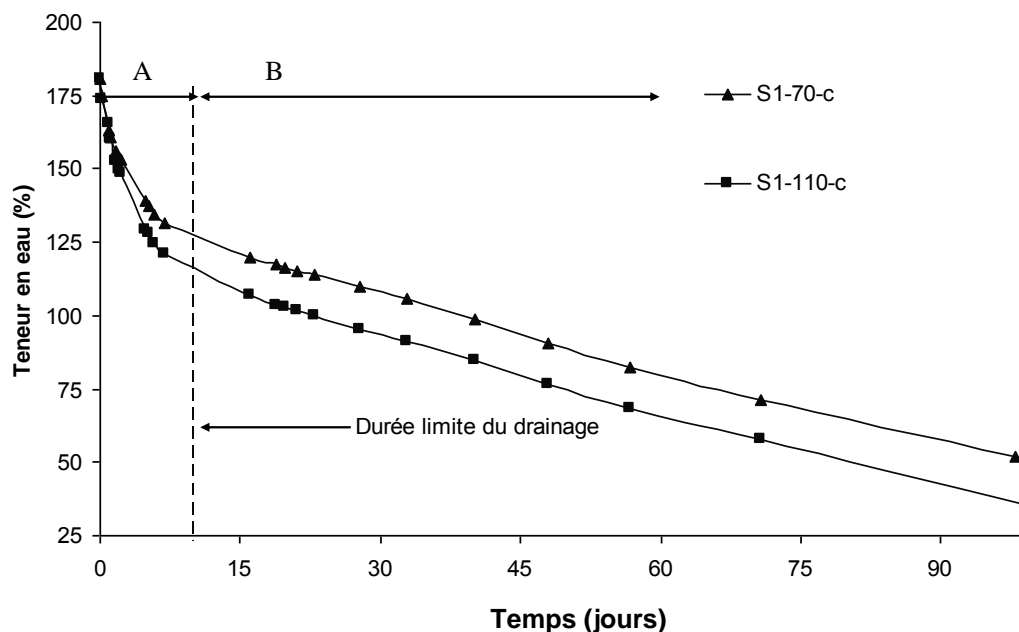


Figure 3.12 : Variation de la masse des échantillons de sédiments S1 durant le séchage par évaporation et par drainage

On remarque que l'évolution de la teneur en eau additionne les deux effets étudiés précédemment (le drainage et l'évaporation). Dans ce cas, la teneur en eau atteint des valeurs relativement faibles sur la même durée que les essais discuté précédemment. Aussi, l'effet du drainage à court terme est le phénomène prédominant dans la réduction de la teneur en eau. Aussi, une assimilation du comportement observé à un comportement bilinéaire permet de déduire des pentes sur la première partie de la courbe, (Zone A) et sur la deuxième partie de la courbe (Zone B).

Phase	70mm		110mm	
	A	B	A	B
S1	12,50	1,93	91,78	5,69
S2	14,05	1,50	44,36	4,90

Tableau 3.4 : Pente de la courbe durant la phase A et la phase B durant le séchage par évaporation et drainage (g/jour).

Dans la *Figure 3.13*, le résultat du séchage des sédiments S1 et S2 par drainage et évaporation en termes de variation de masse est présenté.

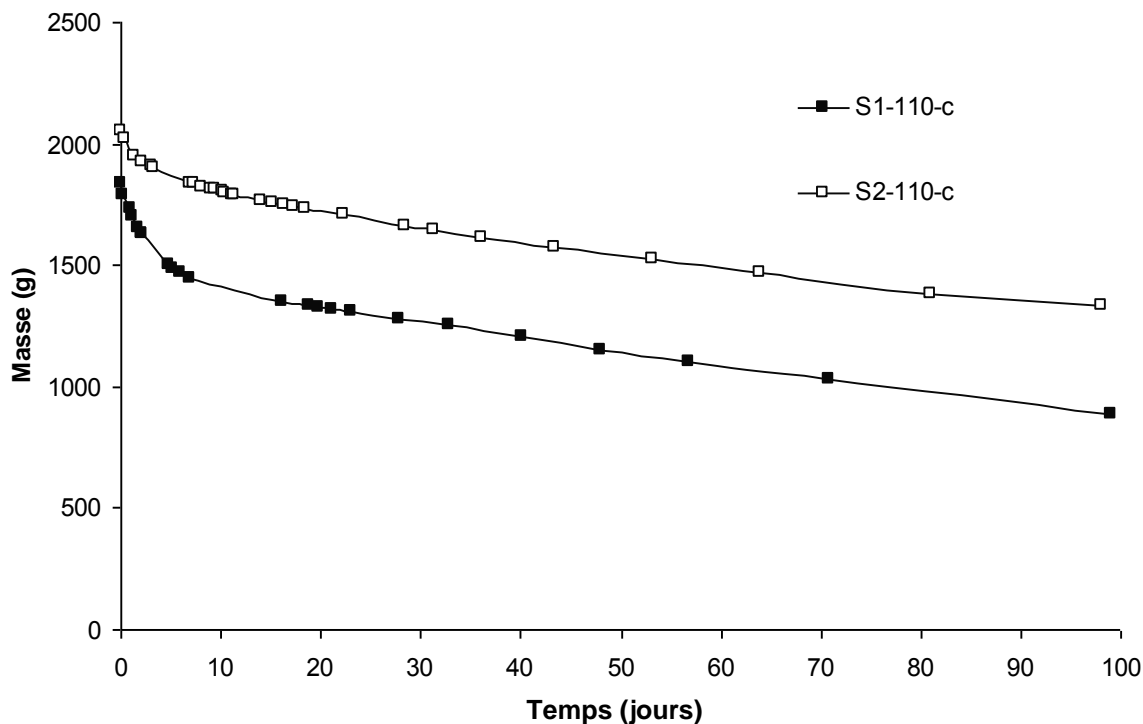


Figure 3.13 : Variation de la masse des échantillons de sédiments S1 durant le séchage par évaporation et par drainage

Dans la Figure 3.14, le même résultat est présenté en termes de teneurs en eau fonction du temps.

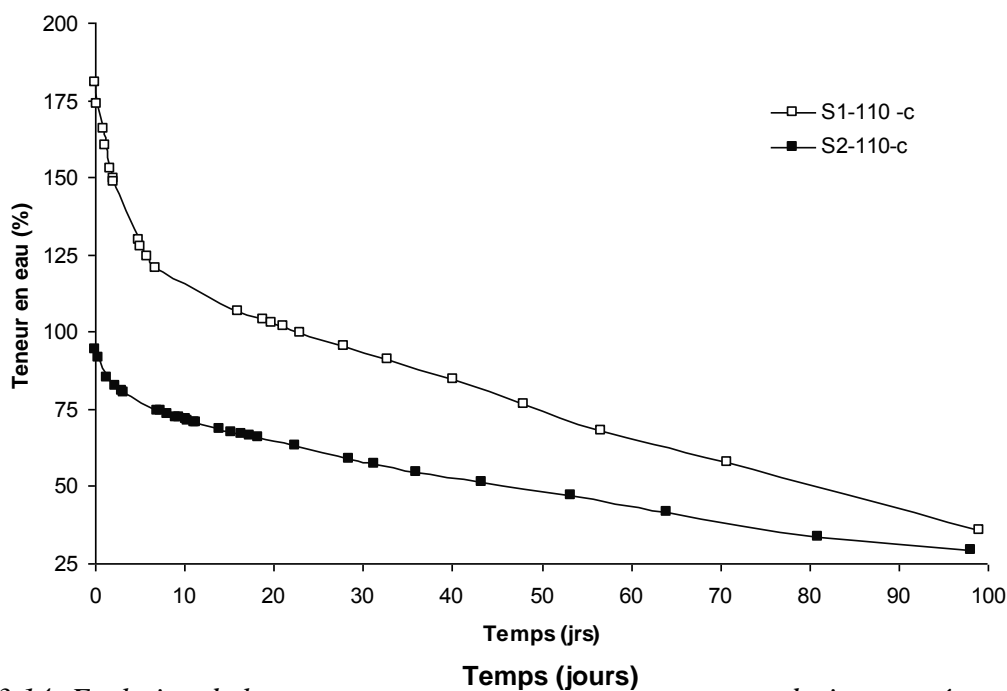


Figure 3.14: Evolution de la teneur en eau en fonction du temps par drainage et évaporation pour S1 et S2- Diamètre 110mm

Dans ce cas, il apparaît que la vitesse de séchage est différente entre les deux sédiments. Le sédiment S1 sèche plus vite que le sédiment S2. La teneur en eau finale est quasiment identique pour les deux sédiments.

Dans la Figure 3.15, on représente le séchage des deux sédiments selon les deux phénomènes : évaporation et drainage. Cette figure reprend les données de la Figure 3.8 et la celle de la Figure 3.11. Elle permet de comparer les deux phénomènes en termes de vitesse de séchage et de quantité d'eau dégagée.

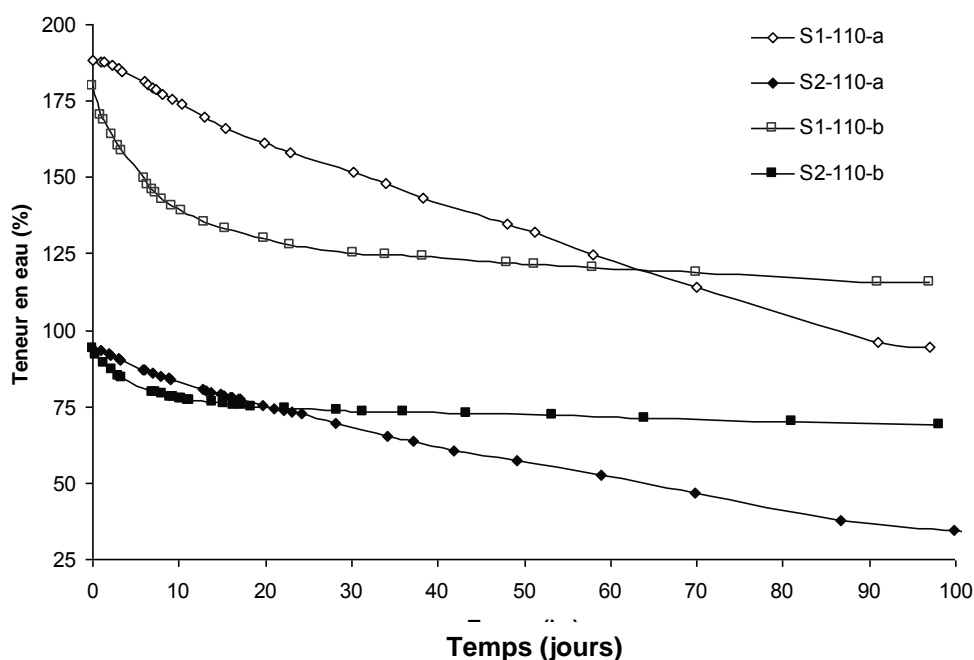


Figure 3.15: Comparaison entre l'évaporation et le drainage pour S1 et S2

Le séchage par drainage fait baisser la teneur en eau rapidement sur la première phase du séchage pour les deux sédiments (10 jours). L'évaporation engendre un séchage à vitesse constante. Au bout d'un certain temps caractéristique de chaque sédiment, l'effet de l'évaporation dépasse l'effet du drainage en termes d'eau dégagée. Cette durée est liée au type de sédiment mais probablement à la teneur en eau initiale. Elle est plus importante pour le sédiment S1 que le sédiment S2 parce que la teneur en eau initiale des sédiments S2 est plus faible et plus proche de sa limite de liquidité.

Pour le sédiment S2, la durée nécessaire pour atteindre la limite de liquidité est de l'ordre de 20 jours. Pour le sédiment S1 cette durée est plus importante. Elle dépasse 60 jours de séchage.

Les résultats d'évaporation et du drainage en termes de variation de masse et de variation de teneur en eau peuvent être exprimées en fonction de la hauteur d'eau équivalente, définie par le potentiel de drainage/évaporation dans cette étude.

Les résultats sont discutés en termes de potentiel d'évaporation et de drainage, et représentés sur la Figure 3.16.

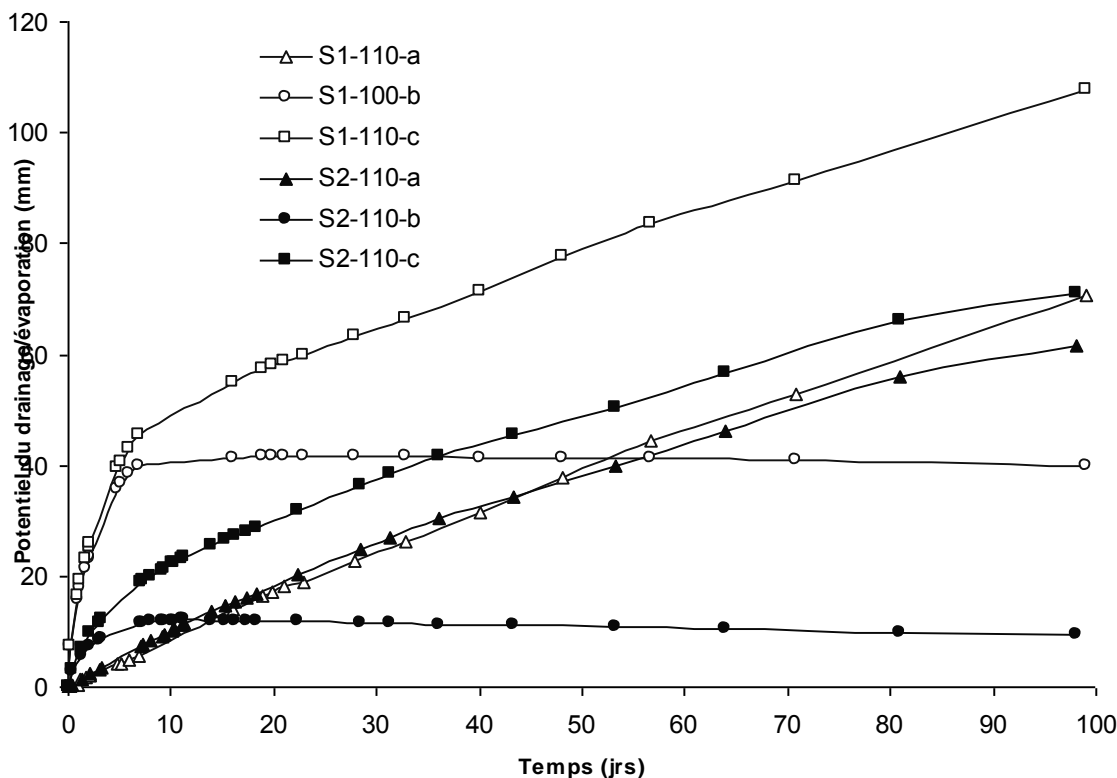


Figure 3.16: Potentiel du séchage des deux sédiments S1 & S2

D'après la Figure 3.16, le potentiel total du séchage est proportionnel à la teneur en eau initial. Sur les deux courbes regroupant l'évaporation et le drainage, le rapport entre la hauteur d'eau dégagée est constant. Cette proportionnalité est due au potentiel du drainage seulement. Le potentiel d'évaporation dépend moins de la teneur en eau initiale.

3.3.4 Effet du traitement à la chaux

Cette partie traite de l'effet de l'ajout de chaux sur la vitesse de séchage des sédiments. Deux dosages de traitements en chaux ont été relevés pour l'étude sur le sédiment S1. Un traitement à 3% en masse de sédiment sec et un traitement à 6%. Tous les essais ont été répétés trois fois et seules les valeurs moyennes sont discutées. Pour éviter toute ambiguïté avec les notations déjà utilisées, dans la suite, les notations définies dans le Tableau 3.5 seront adoptées.

Diamètre d'échantillon (mm)	S1 brut	S1 à 3%	S1 à 6%
70	B-70	C3-70	C6-70
110	B-110	C3-110	C6-110

Tableau 3.5 : Notations des échantillons

3.3.4.1 Effet du traitement à la chaux sur l'évaporation

Dans la *Figure 3.17*, la variation de la teneur en eau moyenne de trois séries d'échantillons est présentée en fonction du temps.

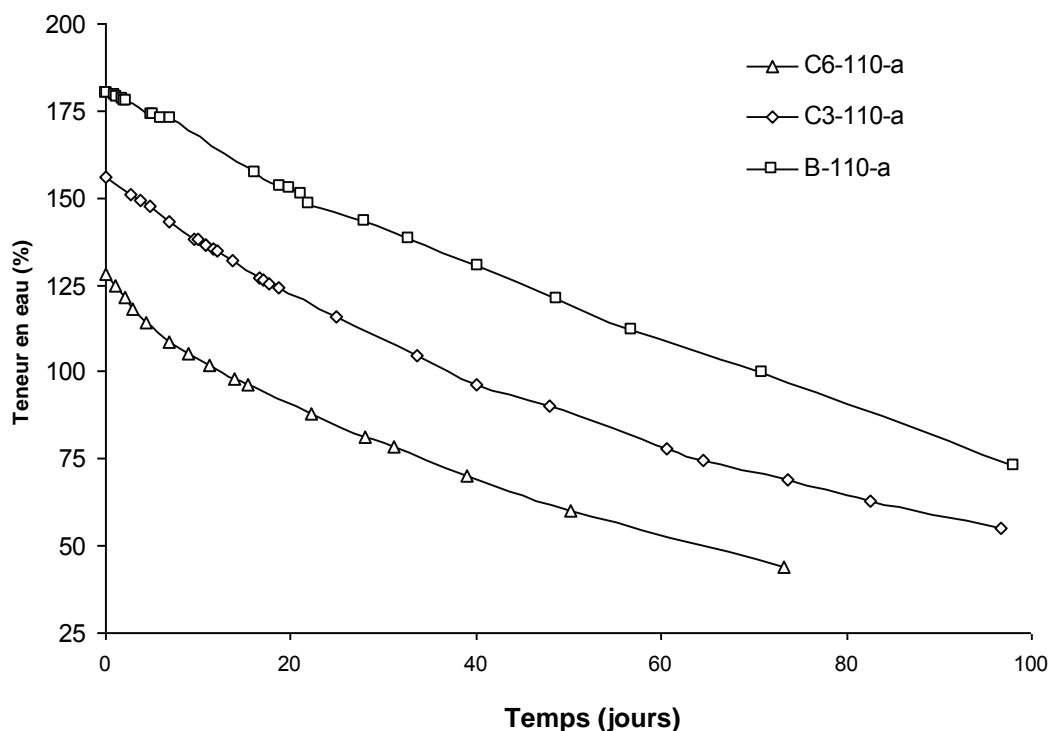


Figure 3.17 : Effet de la chaux sur le séchage par évaporation

D'après cette figure, l'ajout de chaux engendre une baisse initiale de la teneur en eau du sédiment. Aussi, l'évolution de la teneur en eau par évaporation dépend légèrement du traitement appliqué. Pour le sédiment traité à 3% (C3), la variation de la teneur en eau est légèrement plus rapide comparé au sédiment brut. Pour le sédiment traité à 6% (C6), la variation de la teneur en eau est encore plus rapide, particulièrement en début d'essai.

L'ajout de chaux vive dans le sédiment génère avec l'eau une réaction exothermique. Cette réaction produite par l'hydratation de la chaux réchauffe la matrice et favorise ainsi l'évaporation d'eau. La baisse de la teneur en eau initiale est due aussi à l'ajout de matière sèche dans le sédiment.

3.3.4.2 Effet du traitement à la chaux sur le processus du drainage

Le séchage par drainage des sédiments traités à 3% et 6% de chaux a été réalisé suivant la configuration b illustré dans le Tableau 3.1 et en *Figure 3.1* pour les deux diamètres 70 et 110 mm. L'évolution de la teneur en eau en fonction du temps pour la série utilisant des éprouvettes avec un diamètre de 110 mm est reportée dans la *Figure 3.18*.

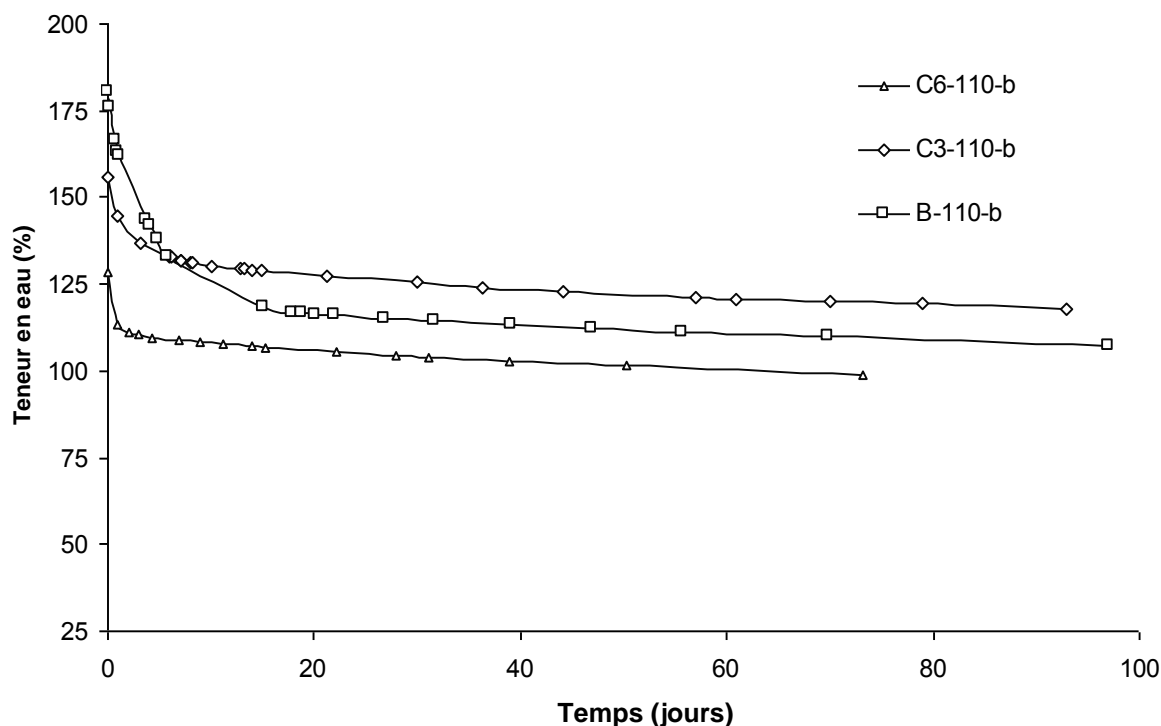
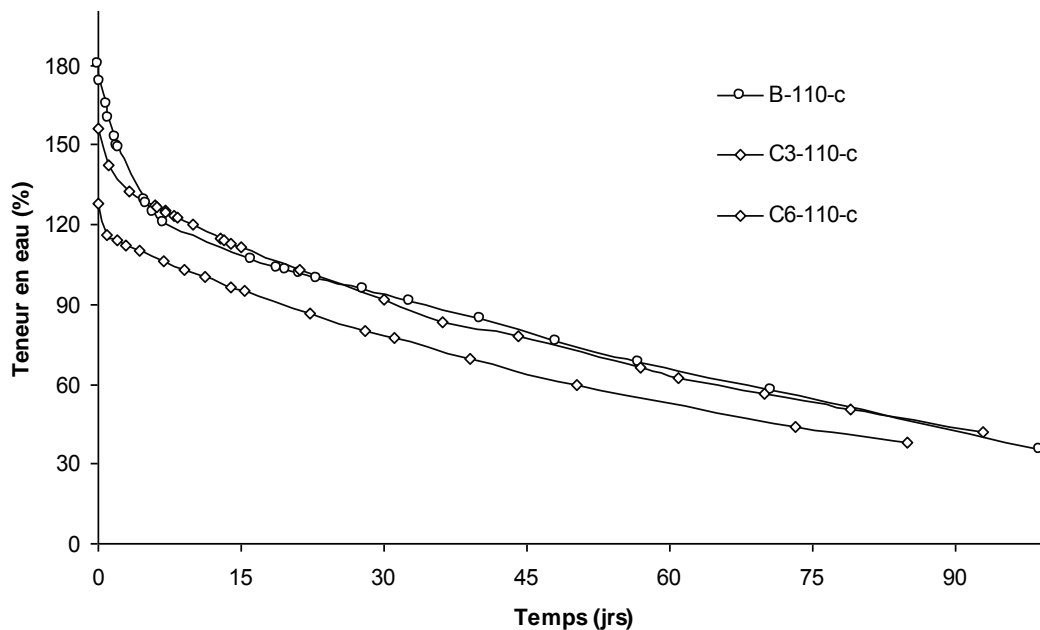


Figure 3.18: Effet de la chaux sur le séchage par drainage

L'ajout de chaux engendre une baisse immédiate de la teneur en eau. L'évolution du séchage par drainage en fonction de temps influe moyennement sur la teneur en eau finale. Après stabilisation de vingt jours, la différence en teneur en eau entre les trois types d'échantillons reste constante.

3.3.4.3 Effet du traitement à la chaux sur le séchage par drainage et par évaporation

Dans cette partie, les sédiments ont été séchés par évaporation et par drainage conformément à la configuration établie dans la *Figure 3.1-c*. Les sédiments subissent une baisse de teneur en eau immédiate due à la réaction exothermique de la chaux et à l'augmentation de la masse sèche du matériau.



Temps (jours)

Figure 3.19: Effet de la chaux sur le séchage par arainage et par évaporation- diamètre 110 mm.

Durant le séchage par évaporation et drainage, l'évaporation est favorisée par la présence de la chaux.

On trace dans les figures ci-dessous (Figure 3.20 et Figure 3.21), la variation de la masse des échantillons des sédiments chaulés pour les deux séries de diamètres 70 et 110 mm.

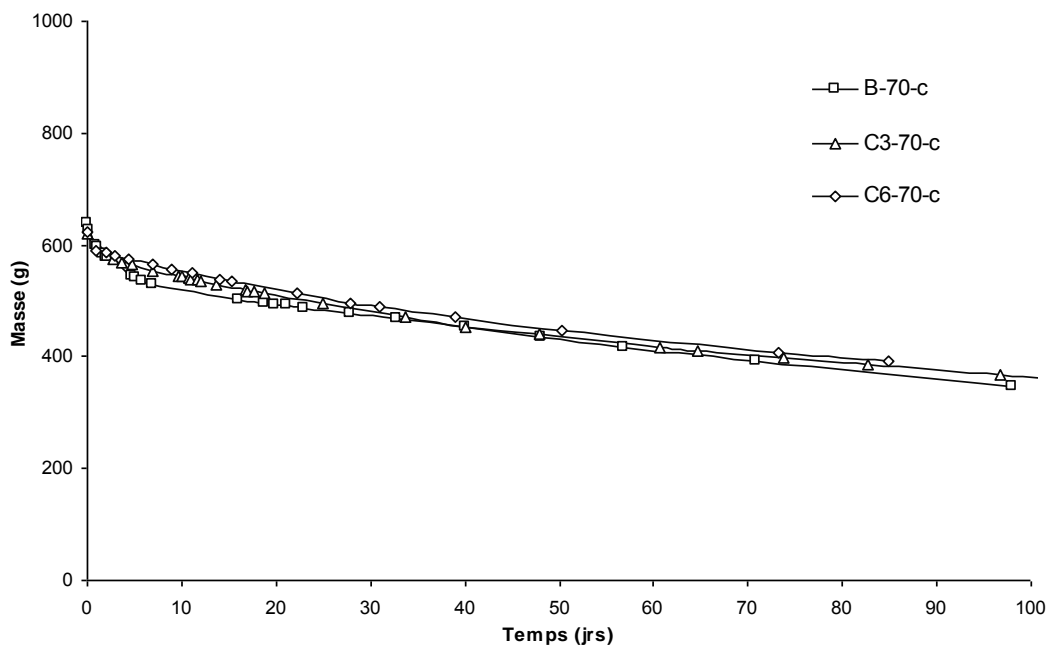


Figure 3.20 : Variation moyenne de masse durant le séchage des sédiments B, C3 et C6.

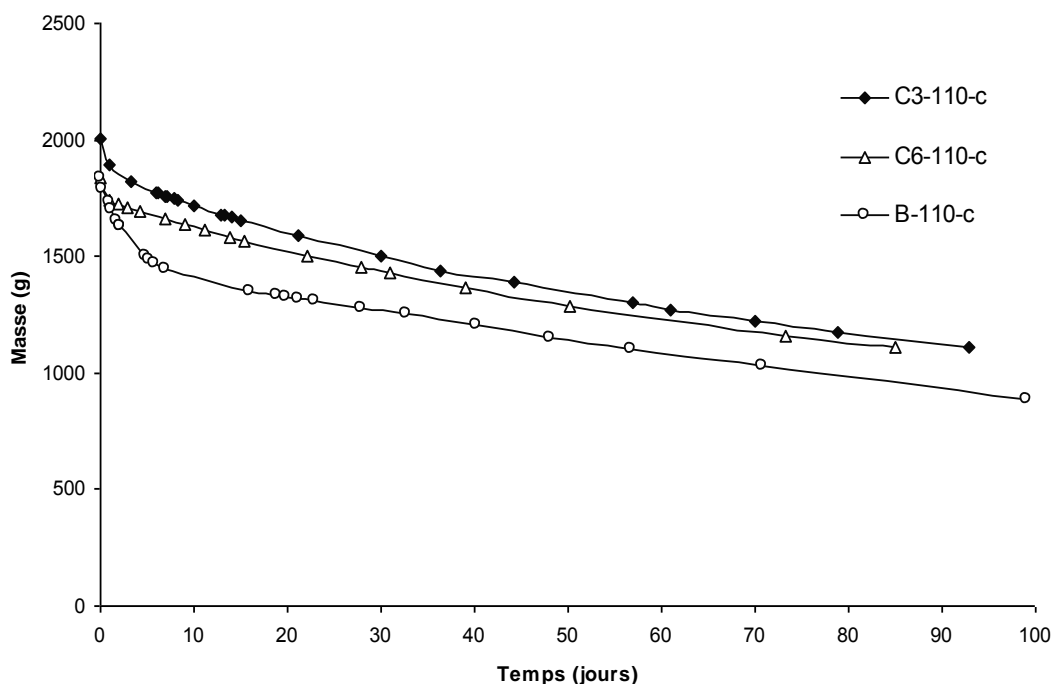
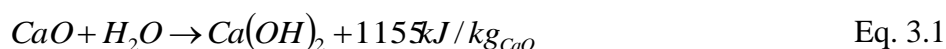


Figure 3.21 : Variation moyenne de masse durant le séchage des sédiments B, C3 et C6.

D'après la courbe de la Figure 3.21, la variation de masse durant le séchage par drainage et par évaporation simultanément des sédiments C3 et C6, est plus rapide que le sédiment brut. En plus, la pente à l'origine du sédiment C6 est plus importante que celle du sédiment C3. Par conséquent, la vitesse de séchage initiale est directement proportionnelle aux taux de la chaux utilisée. Cette perte se manifeste essentiellement en évaporation par un effet exothermique. La quantité de chaleur est plus importante pour le taux de chaux le plus élevé.

Cette quantité est difficile à estimer en pratique d'une façon exacte puisque il faut définir la durée de la réaction. Toutefois, on pourra calculer la quantité d'eau évaporée initialement à partir de la quantité de chaleur dégagée, en se basant sur la réaction d'équilibre suivante :



Dans le Tableau 3.6, l'évaluation de la quantité d'énergie disponible en fonction de quantité de chaux introduite est présentée. Comme l'eau est en excès dans le sédiment, la totalité de la quantité de chaux est considérée mise en contact avec l'eau et susceptible de s'hydrater totalement.

Echantillons	Masse totale (g)	Teneur en eau (en %)	Masse sèche du sédiment (g)	Taux de la chaux (CaO) en %	Masse de CaO (g)	Apport thermique (kJ)	Quantité d'eau mobilisable (g)
B-70	639,17	180,00	228,28	0	0,00	0,00	0,00
C3-70	540,77	156,09	211,16	3	6,33	7,32	3,07
C6-70	622,18	128,17	272,68	6	16,36	18,90	7,93
B-110	1833,87	180	654,95	0	0,00	0,00	0,00
C3-110	2004,4	156,09	782,69	3	23,48	27,12	11,38
C6-110	1837,79	128,17	805,45	6	48,33	55,82	23,42

Tableau 3.6: Apport thermique du traitement à la chaux

Les quantités d'eau évaporées par ajout de chaux sont estimés à partir des quantités de chaux dosées dans les sédiments et en se rapportant à l'équation (3.1). Les valeurs des variations de teneurs en eau générées à cet effet sont rapportées dans le Tableau 3.7.

Echantillons	Masse sèche (g)	Taux de la chaux (CaO) en %	Masse de CaO (g)	Masse d'eau évaporée (g)	Variation de teneur en eau Δw (%)
B-70	228,28	0	0	0,00	0,00
C3-70	211,16	3	6,33	3,07	1,41
C6-70	272,68	6	16,36	7,93	2,74
B-110	654,95	0	0	0,00	0,00
C3-110	782,69	3	23,48	11,38	1,41
C6-110	805,45	6	48,32	23,42	2,74

Tableau 3.7: Variation de la teneur en eau par apport thermique

On remarque d'après le Tableau 3.7, que la variation de la teneur par effet exothermique correspond à 0,5% par 1% de traitement à la chaux. Cette relation qui est confirmée pour les différents traitements est importante. Elle permet d'appliquer le traitement nécessaire en fonction de la variation de teneur en eau souhaitée. Cependant, en terme d'apport, la variation de la teneur en eau par effet d'ajout de chaux reste limitée et ceci présente des limites de point de vue économique vue la quantité importante de chaux à appliquer.

3.4 Suivi environnemental

3.4.1 Polluants totaux

L'estimation des polluants totaux par attaque acide permet de déterminer la quantité totale de polluants contenus dans le sédiment. La totalité des polluants ne peut pas être dissoute à partir de l'essai de lixiviation classique. Dans cette étude, tout d'abord nous avons évalué pour les deux sédiments S1 et S2 les quantités de polluants totaux comme décrit dans le chapitre 2. A partir des pourcentages des polluants totaux, on peut exprimer le potentiel de largage du sédiment à partir d'essais de lixiviation durant le processus du séchage.

Cet essai consiste à attaquer le sédiment avec un acide fort afin de casser les liaisons et libérer les métaux en solutions. Sur le Tableau 3.8, la moyenne de trois analyses est reportée.

Il apparait de ces résultats, des valeurs très élevées de Ba, Zn, Cu, Pb, Ni et As en comparaison avec les seuils définis pour les sédiments de dragage en terme d'immersion.

Eléments	S1	S2
As	14,00	24,40
Ba	194,40	205,20
Cd	< 4	< 4
Cr	51,20	69,20
Cu	63,60	78,00
Mo	< 4	< 4
Ni	18,40	23,20
Pb	25,20	515,20
Sb	< 4	7,60
Se	< 4	< 4
Zn	110,00	476,00

Tableau 3.8 : Résultats des analyses après attaque acide (mg/kg de MS).

En parallèle de cette analyse, des essais selon la norme XP X 31-211 sont réalisés à différentes échéances du processus de séchage par évaporation et par drainage. Ces résultats, reportés sur le Tableau 3.9, combinent aussi les valeurs du Tableau 3.8.

Eléments	Concentration mg/kg de MS			
	05-mars 2010	19-mars 2010	05-avril 2010	20-avril 2010
As	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50
Ba	0,40	0,40	0,42	0,41
Cd	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04
Cr	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
Cu	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50
Mo	0,94	1,19	1,24	1,12
Ni	<0,40	<0,40	<0,40	<0,40
Pb	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50
Sb	0,04	0,04	0,04	0,04
Se	0,10	0,11	0,10	0,10
Zn	0,34	0,10	0,10	0,18

Tableau 3.9: Suivi environnemental des métaux dans le sédiment S1

La présente étude montre que les concentrations sont toujours faibles et stables en fonction de l'état d'oxydation durant laquelle les sédiments ont été exposés. En effet, durant le séchage, l'extraction varie entre 0,20% pour le Baryum (Ba) ou le chrome (Cr) à des taux d'extraction très élevés de l'ordre de 28,11 % pour le Molybdène (Mo). Les pourcentages d'extraction par rapport aux résultats de des polluants totaux contenus dans le sédiment sont reportés dans le Tableau 3.10.

Quantité extraite par lixiviation (%)				
Eléments	05-mars 2010	19-mars 2010	05-avril 2010	20-avril 2010
As	3,57	3,57	3,57	3,57
Ba	0,21	0,21	0,22	0,21
Cd	1,00	1,00	1,00	1,00
Cr	0,20	0,20	0,20	0,20
Cu	0,79	0,79	0,79	0,79
Mo	23,50	29,83	31,00	28,11
Ni	2,17	2,17	2,17	2,17
Pb	1,98	1,98	1,98	1,98
Sb	1,00	1,00	1,00	1,00
Se	2,50	2,67	2,50	2,56
Zn	0,31	0,09	0,09	0,16

Tableau 3.10 : Taux d'extraction des métaux durant le séchage par évaporation et par drainage (en %)

Le taux d'extraction paraît dépendre de l'élément en question, mais il dépend essentiellement des conditions dans lesquelles les sédiments ont été exposés.

Des mesures de pH, conductivité et du potentiel électrochimique ont été également déterminées.

3.4.2 Potentiel Electrochimique

On montre dans le Tableau 3.11, le suivi du potentiel hydrogène pH des sédiments en fonction du séchage, la conductivité, qui traduit la présence des ions dans la solution et le potentiel d'oxydo-réduction qui traduit la réactivité des espèces chimiques entre elles.

	05-mars 2010	19-mars 2010	05-avril 2010	20-avril 2010
pH	7,57	7,65	7,83	7,98
Conductivité $\mu\text{S}/\text{cm}$	8,25	10,75	9,40	10,15
Eh mV	132,33	93,67	199,67	204,33

Tableau 3.11: Potentiel électrochimique en fonction du séchage des sédiments

Le pH a une tendance à augmenter au cours de séchage. Cette augmentation favorisera l'adsorption métallique sur la fraction réductible des sédiments.

3.4.3 Evolution des sels dans les sédiments

On présente l'évolution de la concentration en chlorures, fluorures et sulfates des sédiments en fonction du processus de séchage par évaporation et par drainage dans le Tableau 3.12.

Eléments	Concentration mg/kg de MS		
	05-mars 2010	19-mars 2010	05-avril 2010
Chlorures	33320	26480	23370
Fluorures	<2,5	<2,5	<2,5
Sulfates	4530	5220	7640

Tableau 3.12 : Evolution de la quantité des sels durant le séchage

Il apparait de ces résultats, une diminution sensible des chlorures au début du séchage qui est du principalement au drainage. Au même moment, les sulfates augmentent sensiblement pendant la même période.

3.5 Conclusion

L'étude du séchage a permis de regarder de plus près la phase de séparation liquide-solide pour les sédiments. Le défi est d'abord de sécher le plus rapidement possible les sédiments, d'une manière économique et écologique également.

La difficulté pour le séchage est que le sédiment possède une capacité importante de rétention d'eau.

Dans ce chapitre, après avoir mis en place un protocole expérimental à partir d'essais au laboratoire, nous avons étudié deux phénomènes naturels : le drainage et l'évaporation.

En ce qui concerne le drainage, il dépend essentiellement de la perméabilité du matériau. Ce type de séchage est très rapide au début de l'opération. Il est important donc de faire percoler l'eau au début du processus de dragage.

En ce qui concerne l'évaporation, la vitesse initiale d'évaporation est plus faible que la cinétique du séchage par drainage. Toutefois, l'évaporation garde une cinétique qui dépend essentiellement des conditions environnementales en température et d'humidité.

En termes d'efficacité, il est important de combiner les deux phénomènes sur le même matériau.

Le traitement à la chaux à l'état initial avant séchage du sédiment permet de baisser instantanément la quantité d'eau dans le sédiment. Cependant, d'après cette étude, la chaux n'agit que légèrement sur l'évolution de la teneur en eau des sédiments en fonction du temps et en particulier sur le drainage. L'action exothermique de la chaux est importante il est donc important d'optimiser cette quantité d'énergie.

Le séchage des sédiments permet de faciliter le transport des zones portuaires vers des centres de traitement sans être ramenées à transportés le poids d'eau contenues dans les sédiments.



CHAPITRE 4

UN MATÉRIAU ROUTIER À BASE DE SÉDIMENTS DE DRAGAGE ET DE LAITIERS D'ACIÉRIE



Chapitre 4 Un matériau routier à base de sédiments de dragage et de laitiers d'aciérie

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous utiliserons les sédiments S1 (cf. Chapitre 2). Ces sédiments sont des matériaux de faibles caractéristiques mécaniques pour un emploi en assises de chaussée (cf. Chapitre 2). L'Optimum Proctor Modifié (γ_d) mesurée pour ce sédiment est de l'ordre de 1,5 t/m³. L'indice portant immédiat (IPI) de l'ordre de 15% à l'OPM. Ces valeurs sont insuffisantes pour l'utilisation en couche d'assise.

Pour améliorer ces caractéristiques mécaniques, nous avons testé plusieurs méthodes de traitement. Nous avons utilisé, en premier lieu, un traitement au ciment et/ou à la chaux. Dans un deuxième temps, nous avons eu recours à des ajouts granulaires. Dans cette partie, nous avons utilisé des sables de carrière, des sables marins et finalement un coproduit industriel (des laitiers d'aciérie). La démarche suivie pour mettre en application cette méthodologie est expliquée par l'organigramme de la Figure 4.1 ci-dessous :

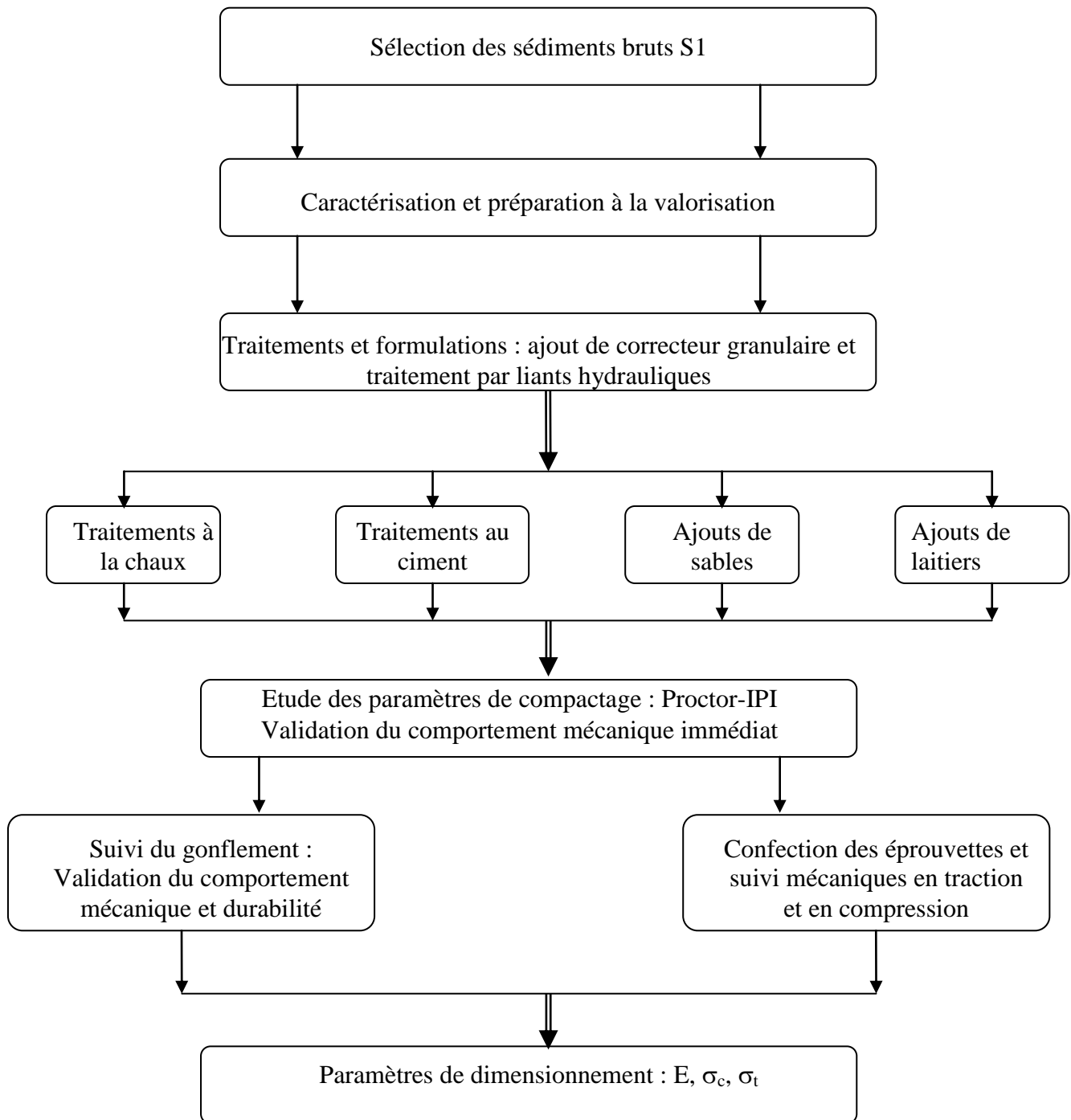


Figure 4.1: Démarche de valorisation suivie

4.2 Sélection des matériaux

Les caractéristiques mécaniques des sédiments sont améliorés par traitement aux liants (avec du ciment ou de la chaux) ou un ajout granulaire. Dans ce qui suit les caractéristiques de base de ces ajouts sont présentées et discutées.

4.2.1 Traitements aux liants

Le traitement à la chaux a été réalisé avec plusieurs pourcentages, 3, 6%. La chaux utilisée présente une courbe granulométrique comme sur la Figure 4.2:

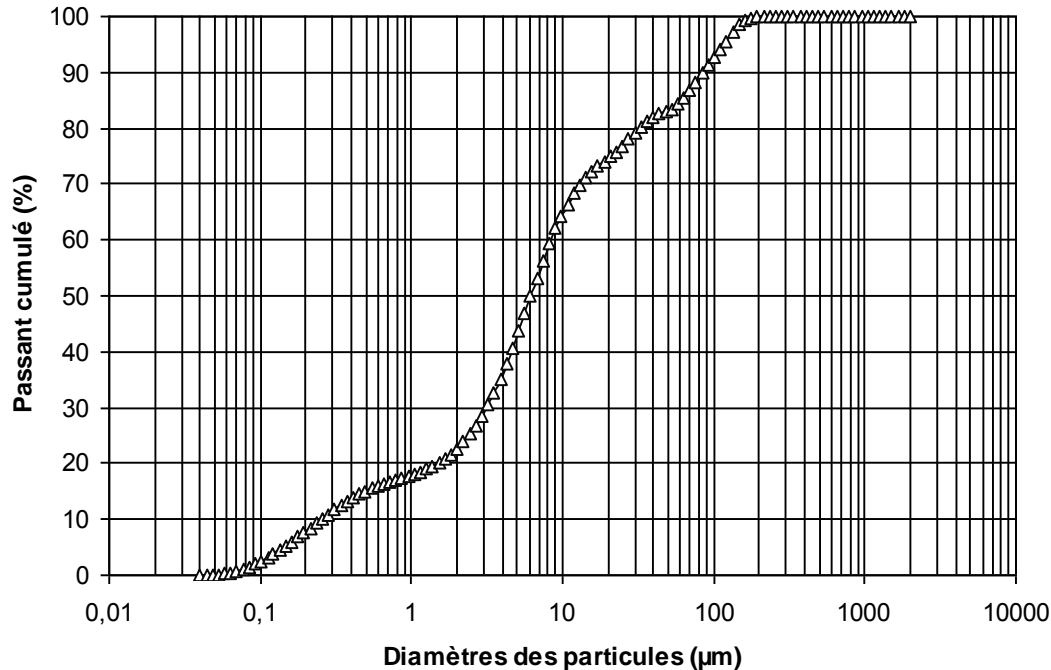


Figure 4.2 : Courbe granulométrique de la chaux utilisée.

L'analyse des résultats montre une distribution granulométrique similaire à celles des sédiments étudiés. La réaction d'hydratation de la chaux vive avec de l'eau et les sédiments favorise la formation d'hydrates susceptibles d'améliorer la portance du mélange.

L'efficacité du traitement à la chaux du sédiment pour améliorer les caractéristiques mécaniques est explorée dans ce travail au travers de l'étude des paramètres de compactage et de l'évolution de la portance du matériau.

Le ciment utilisé dans cette étude est un ciment ordinaire de type CEM I 42,5. C'est un ciment ordinaire comportant un taux important de clinker broyé (95%) et un ajout de gypse. Il est utilisé pour ses propriétés de résistance aux environnements agressives et sa résistance au gel également. Il est obtenu par broyage simultané de clinker Portland et d'une faible quantité de sulfate de calcium. Grâce à sa faible teneur en alumine et donc en aluminat tricalcique, ce ciment possède une haute résistance aux sulfates. Sa composition chimique est détaillée dans le Tableau 4.1. Dans cette étude, le dosage du ciment est fixé en accord avec les dosages habituellement employés pour le traitement des granulats en technique routière. Dans ce travail, on s'impose l'utilisation de 6% (au maximum) en masse du mélange sec.

De même que pour l'étude de l'efficacité du traitement à la chaux, une étude similaire est entreprise pour explorer l'efficacité du traitement au ciment sur le sédiment. Cette étude consiste à observer les propriétés mécaniques du mélange en termes de compacité (Proctor) et de portance (IPI). Ces deux critères présentent la première étape pour la formulation d'un matériau routier.

Composition	% massique
CaO	63,2
SiO ₂	21,2
Fe ₂ O ₃	4
Al ₂ O ₃	3,2
SO ₃	2,8
MgO	2,4
C ₃ A	2
K ₂ O	0,55
Na ₂ O	0,51
Na ₂ O	0,14

Tableau 4.1 : Composition chimique du ciment CEM I 42,5

Les traitements explorés dans cette étude (avec les pourcentages en proportions massiques) sont reportés dans le *Tableau 4.2*.

Formulations	Sédiment (% de MS)	Chaux (% de MS)	Ciment (% de MS)
Brut	100%	0	0
A1	97	3	0
A2	94	6	0
A3	94	0	6
A4	94	3	3

Tableau 4.2 : Proportions de chaux et de ciments utilisées pour la stabilisation des sédiments de dragage.

Pour les différents cas explicités dans le *Tableau 4.2*, les résultats des essais Proctor sont reportés sur la *Figure 4.3*. Il est à noter que ce type d'essai est destiné à évaluer l'effet du traitement à court terme. Il consiste à déterminer la masse volumique maximale des grains solide. En effet, chaque matériau il lui correspond une teneur en eau, dans laquelle sa compacité est maximale à même énergie de compactage comparée par d'autres valeurs de teneurs en eau. L'essai appliqué aux sédiments traités est l'essai Proctor modifié.

Dans cet essai l'énergie de compactage appliquée est plus importante que l'essai Proctor normal.

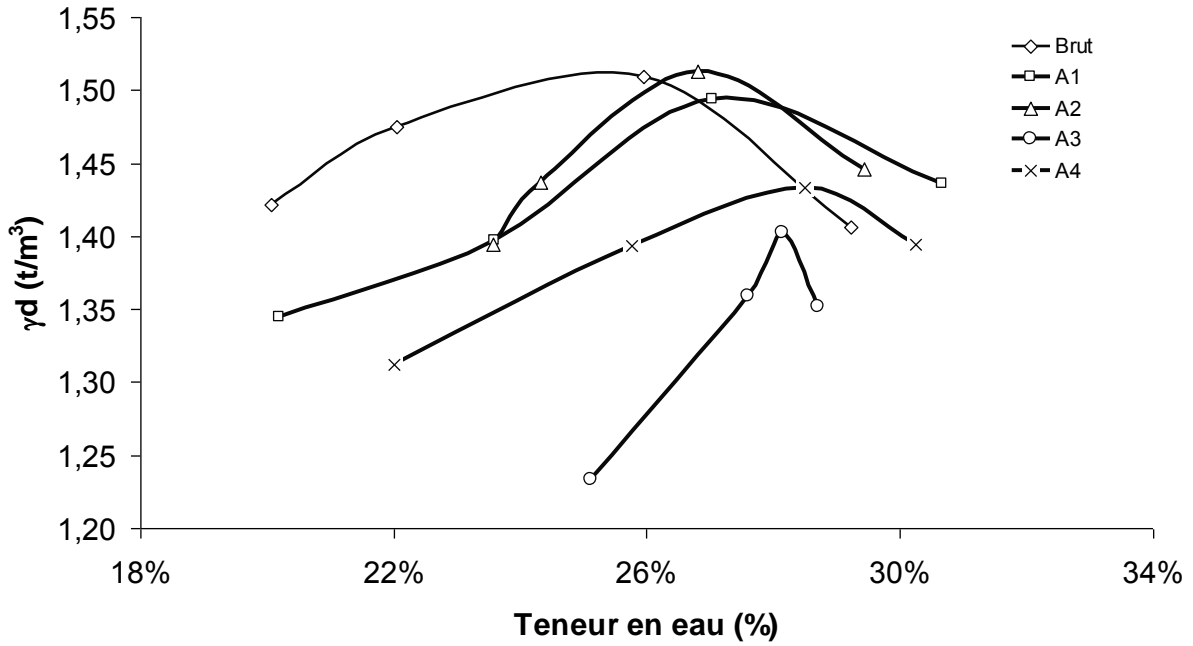


Figure 4.3 : Comportement des formulations traitées au compactage- Essai Proctor

D'après la Figure 4.3, on remarque que la masse volumique du matériau sec maximale du mélange reste comparable avec celle du sédiment brut pour les formulations A1 et A2. Une baisse de la densité sèche dans les formulations A3 et A4 est enregistrée. L'effet du traitement aux liants sur le comportement de la matrice du mélange est visible essentiellement sur les formulations contenant du ciment.

On présente dans la Figure 4.4, les résultats des indices Portants immédiats sur les formulations discutées ci-dessus. Les formulations A1 et A2 restent comparables avec le sédiment brut en termes d'Indice Portant Immédiat (IPI). Contrairement à la masse volumique sèche, la portance augmente considérablement dans les formulations A3 et A4 en termes d'Indice Portance Immédiate (IPI). Cependant, les valeurs restent faibles par rapport aux travaux routiers [GTR, 2000].

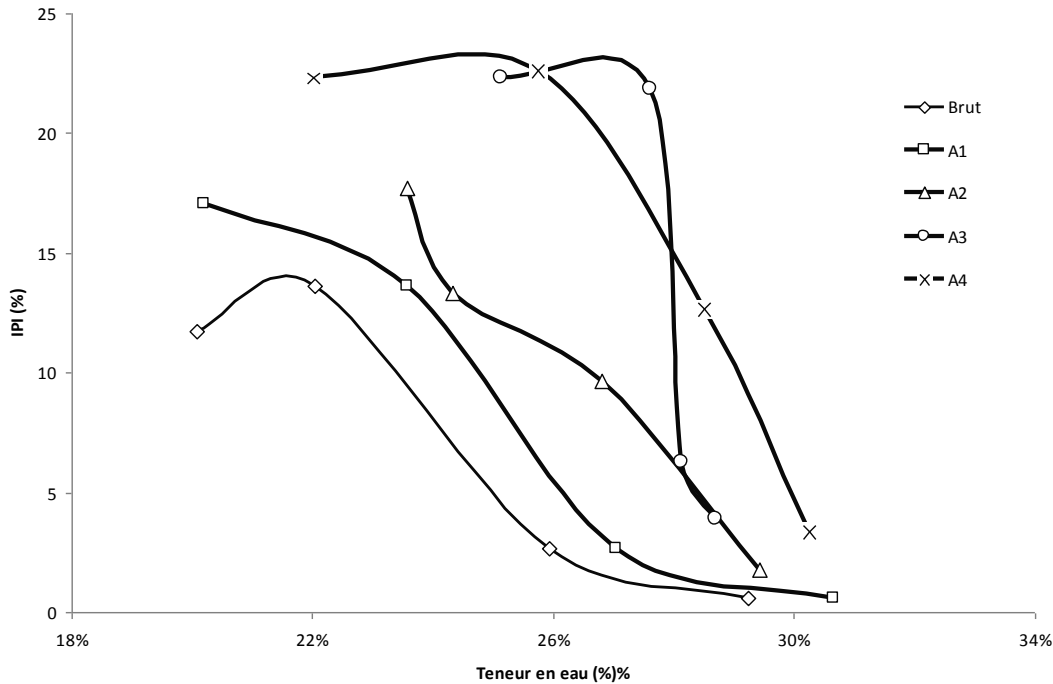


Figure 4.4 : Comportement des formulations traitées au compactage-IPI

On observe que la portance du mélange est sensible au type de liants utilisés. Dans le cas du ciment, ou dans le cas de mélange de chaux et ciment, on remarque une augmentation de l'indice de portance des sédiments. Pour le traitement à la chaux, la portance reste comparable à celle enregistrée pour le sédiment brut. Ceci revient à la réaction d'hydratation avec le ciment plus rapide que celle avec la chaux.

Dans le *Tableau 4.3*, les résultats en termes de teneur en eau optimale, de masse volumique sèche maximale et d'Indice Portant Immédiat (IPI) sont reportés.

	Brut	A1	A2	A3	A4
w_{opt} (en %)	25	26	26	28	29
γ_d à w_{opt} (en t/m^3)	1,52	1,45	1,50	1,40	1,43
IPI à w_{opt} (en %)	5	5	10	20	12

Tableau 4.3 : Récapitulatif des résultats du comportement au compactage des formulations

On remarque qu'en termes de teneur en eau optimale, la teneur en eau correspondant à masse volumique sèche maximale augmente pour la formulation A1, A2 et A3 par rapport au résultat du sédiment Brut. Cependant, ce paramètre diminue pour la formulation A3, correspondant à un traitement au ciment à 6%. On remarque également que la masse volumique sèche maximale diminue en fonction du traitement à la chaux et/ou au ciment. Pour le traitement à la chaux qui correspond aux formulations A1 et A2, la masse volumique sèche maximale diminue légèrement. Pour le traitement contenant essentiellement du ciment, le résultat se traduit par une diminution importante de la masse volumique sèche maximale du mélange. Cette tendance est inversée en termes de portance immédiate. On remarque que l'IPI augmente pour les différentes formulations mise à part la formulation A1. L'augmentation est importante pour les formulations A3 et A4. Cette augmentation est essentiellement due à la présence du ciment.

A partir des résultats de l'indice Portant Immédiat, il apparaît que les valeurs sont inférieures à la limite préconisée pour une utilisation en couche de base. Leur utilisation nécessite par conséquent une amélioration du comportement mécanique à court terme. Ce dernier peut être réalisé par ajout d'un correcteur granulaire comme des sables ou des laitiers.

4.2.2 Mélanges granulaires

L'étude de l'ajout d'un correcteur granulaire peut être menée selon deux méthodes : une méthode basée sur l'amélioration de la distribution granulométrique ; cette méthode est beaucoup plus intuitive et peut devenir très fastidieuse pour l'optimisation. La seconde méthode, se base sur l'optimisation de la compacité maximale.

4.2.2.1 Correcteurs granulométriques

Les ajouts granulaires utilisés dans cette étude doivent satisfaire à la fois à des contraintes économiques, techniques et environnementales. Dans le cadre de travaux de recherches antérieures à l'Ecole des Mines de Douai, Dubois. [2006] et Tran, [2009] ont montré que l'utilisation de formulations associant des sables de dragage, des sables du Boulonnais et des sédiments fins de dragage répondent aux exigences mécaniques pour l'utilisation en couches d'assise de chaussée (*Figure 4.5*). Cependant, de point de vue économique, des optimisations peuvent être nécessaires afin de limiter le recours à des ressources naturelles non renouvelables (carrières). Sur le plan technique et environnemental des solutions alternatives à l'utilisation des sables de dragage doivent être proposées.

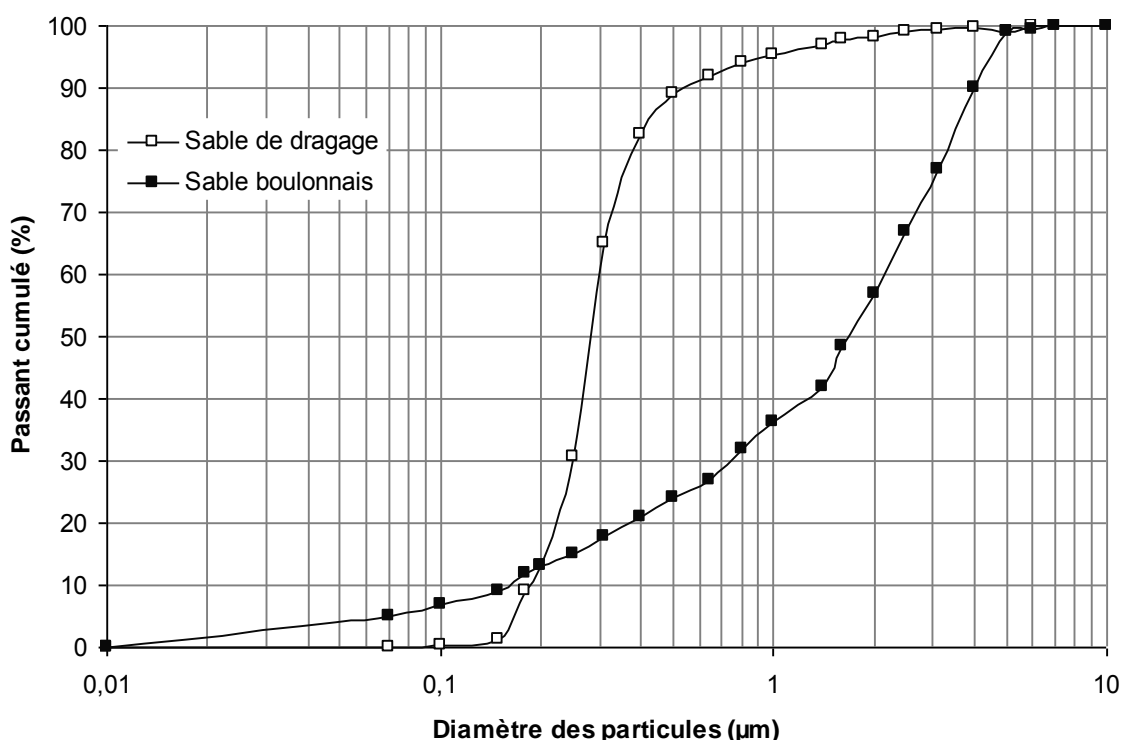


Figure 4.5 : Distribution granulométrique des sables utilisés

Dans le cadre de ce travail, nous avons opté pour l'utilisation de laitiers d'aciérie qui répondent aux exigences économiques, techniques et environnementales. Considérés comme déchets, l'utilisation de laitiers avec les sédiments de dragage s'avère une alternative à

l'emploi de matériaux naturels. Pour la formulation du matériau routier, une démarche similaire à celle proposée par Dubois, (2006) a été entreprise en premier lieu. Cette démarche consiste à :

- limiter la proportion de la fraction fine dans les mélanges,
- optimiser la distribution granulométrique,
- limiter la quantité de matières organiques dans les mélanges,
- optimiser la quantité de sédiments fins de dragage (matériaux étudiés).

Dans la *Figure 4.6*, les distributions granulométriques des constituants utilisés pour la formulation d'un matériau routier sont présentées.

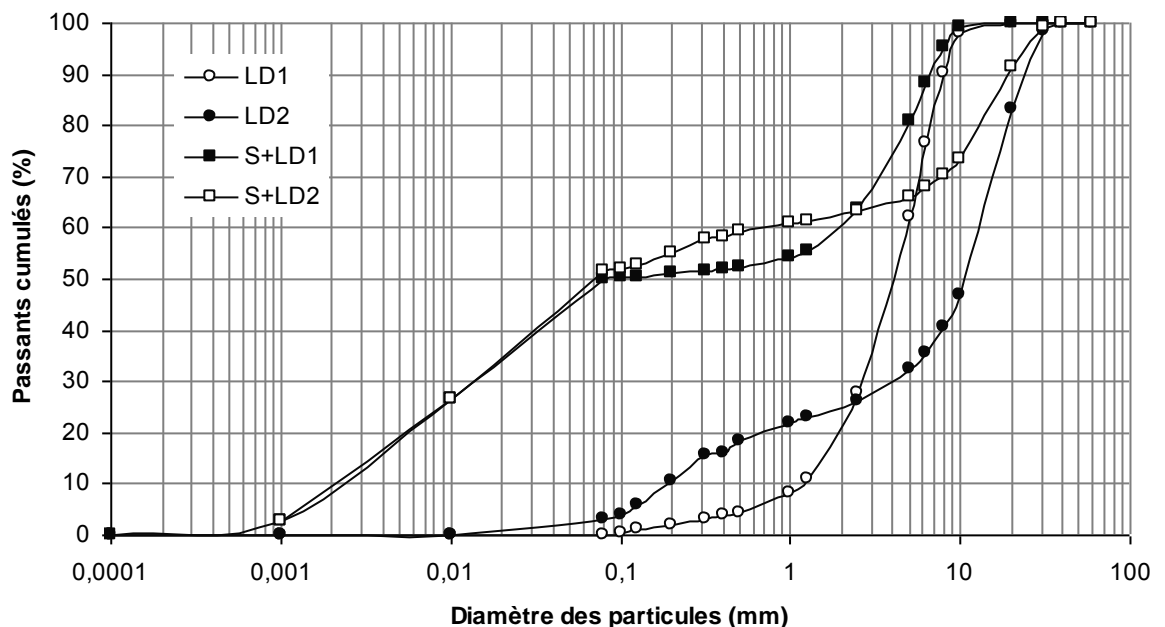


Figure 4.6 : Formulation à base du fuseau granulométrique

Aussi, sur la même figure, fonction des critères fixés ci-dessus, deux mélanges entre sédiments et laitiers LD1 et laitier LD2 désignés respectivement S+LD1 et S+LD2 sont présentés. La distribution est considérée comme étalée avec un coefficient d'uniformité $C_u > 2$. La distribution est mal répartie entre fins et gros diamètres. Le coefficient de courbure est important $C_c > 3$. La distribution granulométrique des deux mélanges S+LD1 et S+LD2 résultent d'un mélange optimal de 50% de sédiments et de 50% de chacun des deux laitiers.

La deuxième démarche utilisée dans cette étude consiste à déterminer la compacité maximale en fonction des pourcentages des matériaux en présence. Dans cette partie, le modèle d'empilement compressible [De Larrard, 2000] a été utilisé. Une première tentative d'utilisation de ce modèle pour la formulation de matériaux routiers a été menée par Tran (Tran, 2009).

4.2.2.2 Formulations à base de la compacité des mélanges

Dans cette partie, une application du modèle d'empilement compressible, détaillé dans le Chapitre 1, a été appliquée pour déterminer les formulations à base de sédiments de dragage et de laitiers d'aciérie. Tout d'abord, une calibration du modèle afin de déterminer ses paramètres a été réalisée sur la base d'un mélange de sédiments avec deux matériaux granulaires similaires aux laitiers d'aciérie : le sable de dragage et le sable de Boulonnais. A partir des paramètres déterminés, nous avons entrepris des formulations à base de sédiments de dragage et de laitiers d'aciérie. Cette partie consiste à valider le modèle par plusieurs types de matériaux granulaires similaires mélangés au sédiment.

a. Calibration du modèle

La calibration du modèle consiste à l'appliquer sur plusieurs matériaux afin de valider la méthode utilisée permettant de déterminer les paramètres du modèle.

La démarche expérimentale suivie pour la calibration du modèle est conforme à la fabrication d'éprouvette de sols pour les essais mécaniques dans le cadre d'étude de matériaux routiers. Cette démarche a été proposée par Tran (2009). Dans cette étude une charge statique de compression de 10 MPa a été appliquée aux mélanges dans les moules. Les mélanges ont été réalisés avec un pas de variation de 10% en proportion de fines. Les fines représentent les sédiments de dragages.

Le dispositif expérimental utilisé pour mesurer la compacité consiste en un moule avec une rehausse. Pour cette étude, deux types de moules selon la taille des particules des granulats ajoutés ont été utilisés. Pour les sables et les laitiers LD1, nous avons utilisé le dispositif tel que défini dans la Figure 4.7.

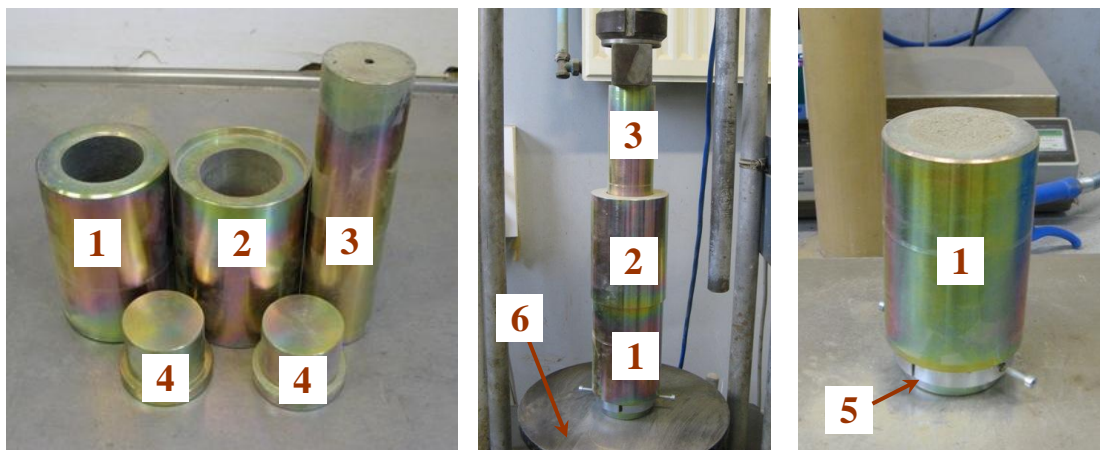


Figure 4.7 : Dispositif expérimental pour les matériaux fins [Tran, 2009]

Le mélange est mis en place selon le processus suivant :

- Fermer la base du moule (1) par un chapeau (4) et régler la hauteur disponible dans le moule pour atteindre une hauteur de 10 cm par deux coquilles (5).
- Superposer la rehausse (2) sur le moule et mettre 400 g de matériau dans le conteneur formé par le moule et la rehausse.

- Fermer l'ensemble par le piston (3) et appliquer une pression moyenne de 10 MPa par la presse (6). Cette pression est prise égale à une valeur moyenne mesurée lors de la fabrication des éprouvettes cylindriques (5 cm × 10 cm) dans le chapitre 3.
- Enlever la rehausse, araser la surface de l'échantillon et peser l'ensemble.

La compacité de chaque mélange est obtenue à partir du rapport divisant la masse sèche de l'échantillon par la masse volumique absolue moyenne du granulat, puis par son volume total. Chaque valeur expérimentale prise en compte dans le modèle est la moyenne de trois mesures.

Pour les laitiers LD2, qui possèdent une distribution granulométrique 0/30, nous avons utilisé un moule cylindrique de diamètre 150mm et de hauteur 120mm munis d'une rehausse et d'un disque sur la partie supérieure (Figure 4.8). Le volume entre les dimensions du moule utilisé et la taille maximale des particules doit respecter un rapport de 5 au minimum. Ce rapport permettant de garder l'hypothèse de milieu continu. En termes de chargement et de processus de mise en place, la démarche définie ci-dessus est respectée.

La méthode de compactage appliquée est la même pour ce type de moule, à savoir une contrainte de compactage de 10 MPa a été appliquée. La vitesse du chargement est la même vitesse correspondant à la formulation des éprouvettes et définie par la norme NF P 98-114-3



Figure 4.8 : Dispositif expérimental pour les gros granulats.

Afin d'explorer les capacités du modèle, tout d'abord, nous avons étudié des mélanges à base de matériaux bien connus au département Génie Civil de l'Ecole des Mines de Douai, soit le sédiment, le sable de dragage et le sable boulonnais.

La calibration du modèle qui consiste en la détermination de l'indice de serrage (K), des effets de desserrement (a_{ij}) et des effets de paroi (b_{ij}), ont été également entreprises.

Les coefficients a_{ij} et b_{ij} sont données par les formules (4.1) et (4.2) définies ci-dessous :

$$a_{12} = \alpha_2 \left(\left. \frac{\partial e}{\partial y_2} \right|_{y_2=0} + \frac{1}{\alpha_1} \right) \quad \text{Eq. 4.1}$$

$$b_{21} = \frac{\frac{1}{\alpha_2} - 1 - \left. \frac{\partial e}{\partial y_2} \right|_{y_2=1}}{\frac{1}{\alpha_1} - 1} \quad \text{Eq. 4.2}$$

D'autres approches peuvent rapprocher les paramètres du modèle. Lecompte [Lecompte *et al.* 1997], en associant ces résultats avec ceux de De Larrard (2000), propose une nouvelle formule pour déterminer a et b en fonction du contraste de taille uniquement.

$$a_{ij} = \left(\frac{d_j}{d_i} \right)^{0,414} \quad \text{Eq. 4.3}$$

$$b_{ji} = \left(\frac{d_j}{d_i} \right)^{1,33} + \frac{d_j}{d_i} \left(1 - \frac{d_j}{d_i} \right) \quad \text{Eq.4.4}$$

Eq.4-5

Théoriquement, les coefficients de l'interaction (a_{ij} , b_{ji}) varient avec le contraste de taille entre les grains d_i et d_j . Autrement dit, ils augmentent avec une augmentation du rapport entre le diamètre des grains fins et des grains grossiers.

Dans le *Tableau 4.4*, les résultats obtenus à partir de l'étude de deux séries de mélanges M1 (mélanges de sables fins et de sable du Boulonnais) et M2 (mélanges de sédiments fins et de sables marins) sont présentés.

% sédiments	M1	M2	% sédiments	M1	M2
0	0,809	0,783	55	0,492	0,743
5	0,725	0,766	65	0,596	0,755
15	0,614	0,756	75	0,687	0,794
25	0,489	0,733	85	0,789	0,851
35	0,456	0,719	95	0,882	0,882
45	0,510	0,709	100	0,933	0,956

Tableau 4.4 : Indices des vides mesurés sur des mélanges binaires

Pour déterminer a_{ij} et b_{ji} tels que définis précédemment, à partir des valeurs expérimentales du Tableau 4.4, il est nécessaire de déterminer les valeurs de la pente des deux parties droites de la Figure 4.13, Enfin, en injectant ces deux valeurs dans les formules (4-1) et (4-2), nous obtenons les indices recherchés.

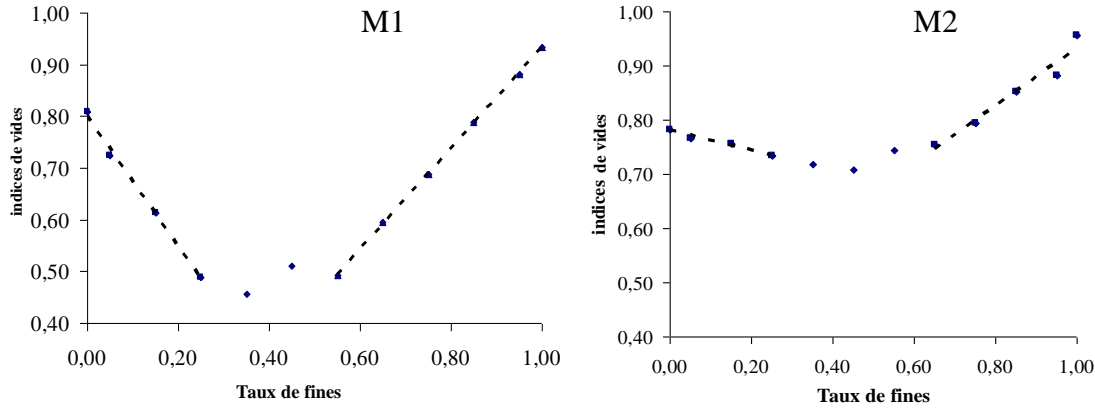


Figure 4.9 : Valeurs expérimentales exprimant la relation entre l'indice des vides et la proportion de grains fins

A titre de comparaison, les indices d'interactions estimés à partir des formules 4-1 et 4-3 pour a_{ij} et des formules 4-2 et 4-4 pour b_{ji} sont présentés dans le Tableau 4.5.

Formule	a_{ij}		b_{ji}	
	(4.1)	(4.3)	(4.2)	(4.4)
M1	0,28	0,29	0,04	0,06
M2	0,02	0,02	0,54	0,44

Tableau 4.5 : Indices de l'interaction déduite de mélanges binaires

On constate que hormis la valeur de b du mélange M2, les valeurs obtenues de coefficients d'interaction (a_{ij} , b_{ji}) sont supérieures aux prédictions faites par les formules 4-3 et 4-4. Ceci peut être dû à l'existence d'interactions entre les grains dans une même classe étudiée.

Une fois que les coefficients d'interaction sont déterminés, pour l'étalonnage du modèle, il reste à fixer la valeur de K . Comme nous l'avons précisé dans le chapitre 1, la compacité réelle Φ peut être déterminée par l'équation (4.6). C'est une équation à deux inconnues (K et Φ), on ne peut donc trouver une solution unique. L'indice de serrage K est défini par la minimisation de l'erreur entre la prédiction du modèle et les données expérimentales. L'indice de serrage est donné par la formule (4.2) en cas de mélange binaire.

$$K = \sum_{i=1}^n \frac{y_i}{\beta_i} = \frac{y_1}{\beta_1} + \frac{y_2}{\beta_2} \quad \text{Eq. 4.6}$$

$$\frac{y_i}{\beta_i} = \frac{y_i}{\Phi \gamma_i}$$

avec :

- K : indice de serrage qui ne dépend que du protocole (ou l'énergie) de compactage.
- Φ : compacité réelle du mélange.
- γ_1 et γ_2 : compacités virtuelles des classes 1 et 2.
- β_1 et β_2 : compacités résiduelles des classes 1 et 2.

$$K = \frac{1}{\frac{\beta}{\Phi} - 1} \quad \text{Eq. 4.7}$$

- y_1 et y_2 : proportions des classes 1 et 2 dans le mélange.

La comparaison des résultats d'essais et de la prédiction du modèle pour les mélanges M1 et M2 sont présentés respectivement dans les figures 4.10 et 4.11.

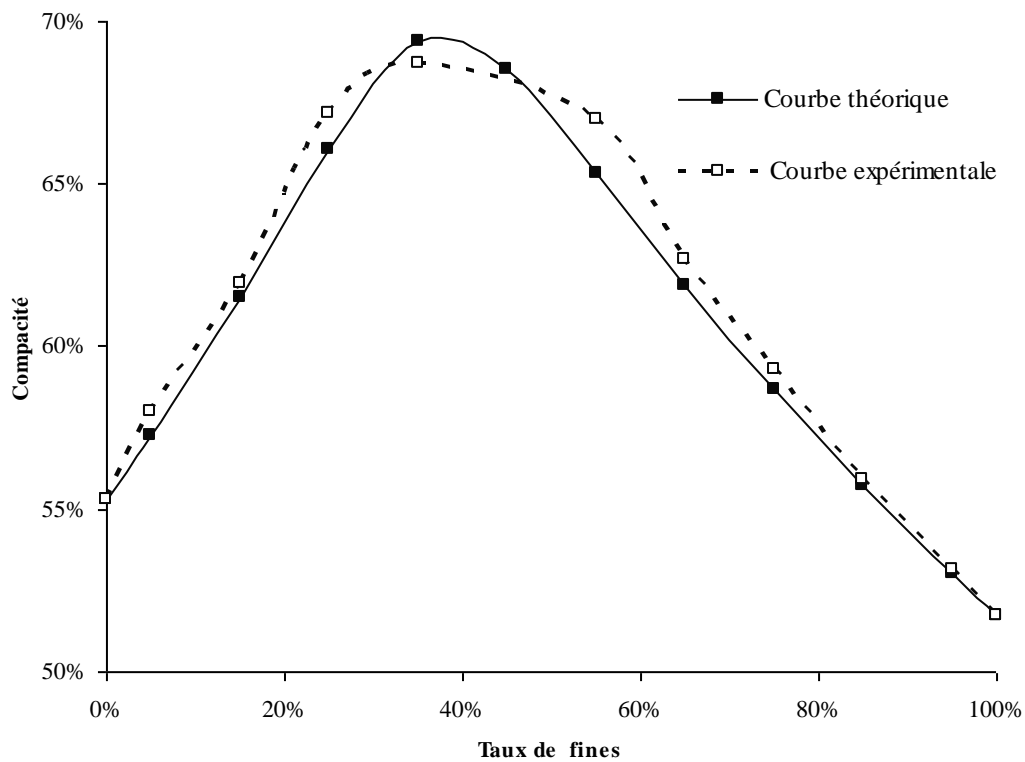


Figure 4.10 : Compacité du mélange M1 des sédiments de dragage et sables du Boulonnais

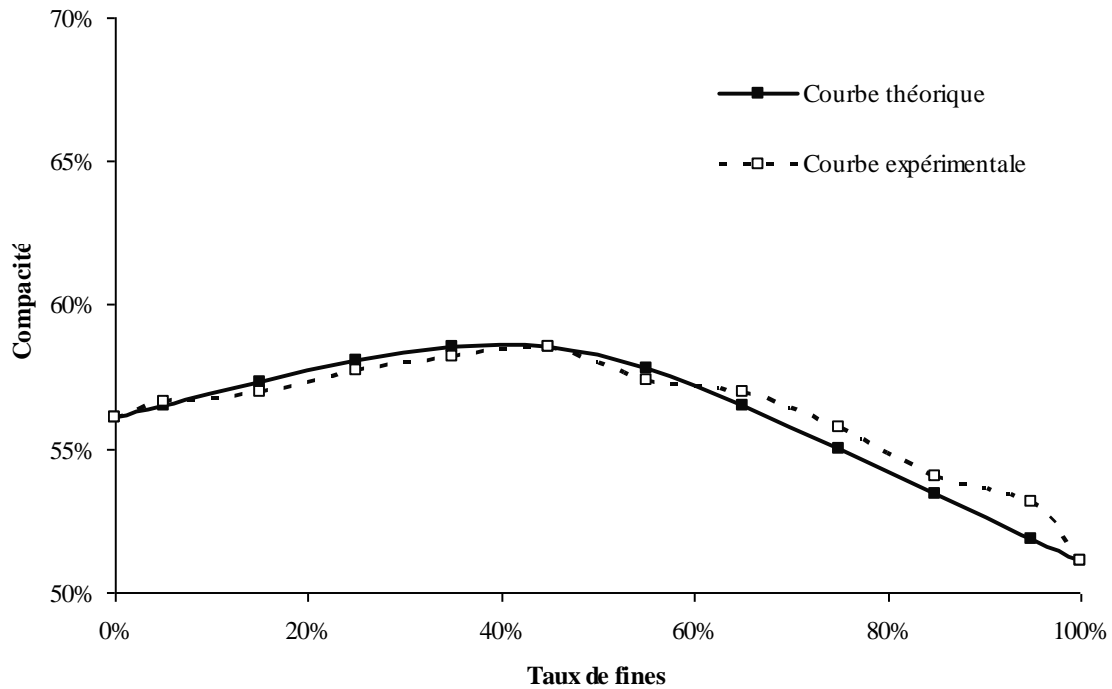


Figure 4.11 : Compacité du mélange M2 des sédiments de dragage et sable dragage

Pour les deux mélanges étudiés (M1 et M2), on remarque que la courbe théorique coïncide avec la courbe expérimentale pour la valeur de K ainsi estimé (Tableau 4.6).

Après une analyse inverse des données pour les deux mélanges M1 et M2, la valeur de K obtenue après optimisation à partir de la formule (4-5) est égale à 6,44.

Par comparaison avec les différents procédés de mise en place (Tableau 4.6), on note que la valeur de K proposée est supérieure à celle trouvée par les procédés de mise en place à faible énergie [Cintré. 1988 ; Khanta Rao *et al.* 1993 ; Joisel. 1952] et inférieure à la valeur obtenue par le procédé de vibration associé à une pression de 10 kPa. Elle est du même ordre de grandeur que la valeur mesurée dans le cadre de la thèse de Tran (2009).

Procédé de remplissage	Déversement [Cintré, 1988]	Piquage avec une tige [Khanta Rao et al. 1993]	Vibration [Joisel 1952]	Vibration + pression 10kPa [De Larrard <i>et al.</i> 1994b]	Pression statique 10MPa [Tran, 2009]	Pression statique 10MPa
K	4,1	4,5	4,75	9	7	6,44

Tableau 4.6 : Valeurs de K proposées pour différents procédés de remplissage

b. Application du modèle pour la formulation d'un matériau intégrant des laitiers

A partir des résultats précédents, une tentative d'application du Modèle d'Empilement Compressible pour la réalisation de formulations à base de sédiments de dragage et de laitiers d'aciérie est entreprise.

Les caractéristiques des laitiers LD1 et LD2 sont détaillées dans le Chapitre 2. Dans la *Figure 4.12* la distribution granulométrique des matériaux utilisés est rappelée.

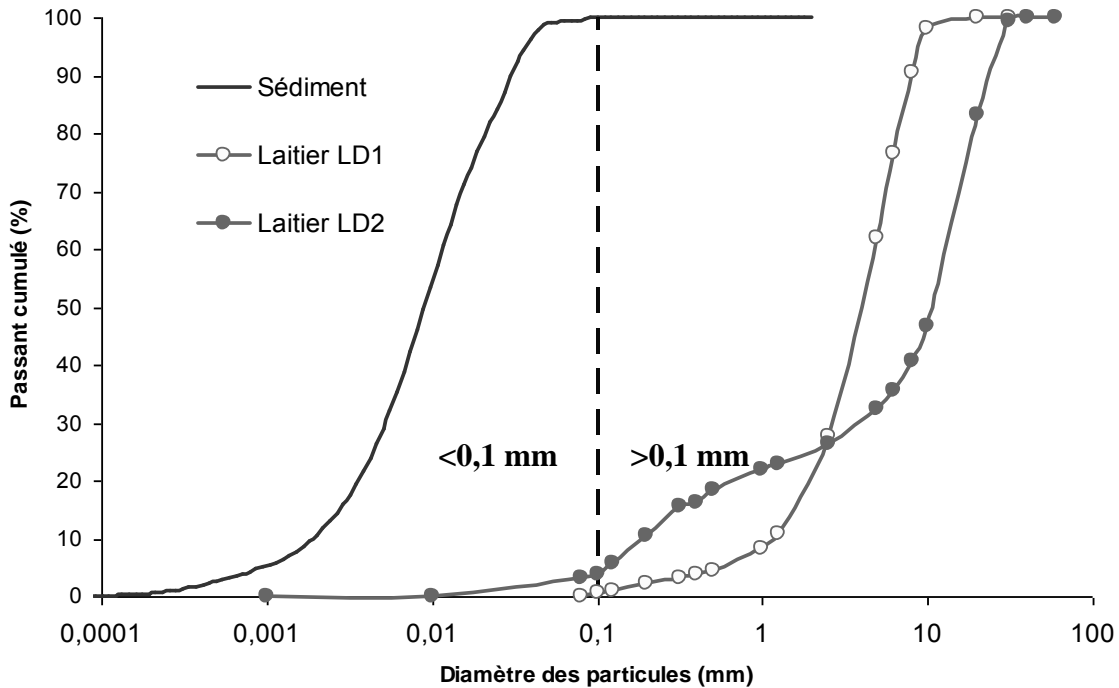


Figure 4.12 : Classes granulométriques des laitiers

A partir de la *Figure 4.12*, il apparaît une coupure naturelle dans les classes granulométriques pour les matériaux utilisés. Dans la suite de l'étude, les laitiers constitueront la classe 1 dans le Modèle d'Empilement Compressible. Les sédiments fins de dragage seront assimilés à la classe 2.

Les résultats issus des mélanges étudiés sont présentés dans les *Figures 4.13 et 4.14*.

Avec la même valeur de coefficient de serrage les résultats théoriques sont assez proches des valeurs expérimentales.

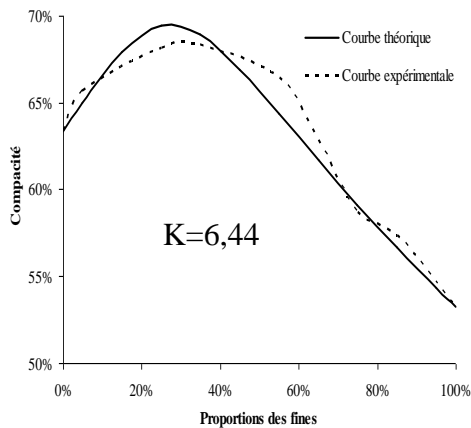


Figure 4.13: Mélange de sédiments et de laitiers LD1

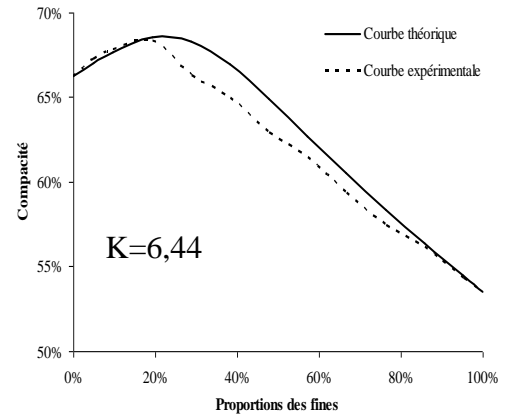


Figure 4.14: Mélange de sédiments et de laitiers LD2

A partir des Figures 4.13 et 4.14, il apparaît que pour le mélange sédiment et laitier LD1, une compacité optimale est obtenue pour un mélange constitué de 1/3 de sédiments et de 2/3 de laitiers. Pour le mélange à base de LD2, il apparaît que l'ajout de sédiment améliore la compacité du mélange pour des dosages de l'ordre de 1/4 (Figure 4.14). Au-delà, une diminution continue de la compacité est observée.

Afin de comparer l'efficacité de l'ajout de chacun des deux laitiers dans les formulations à base de sédiments fins, pour la suite de l'étude deux mélanges composés de 50% de sédiments fins et de 50% de laitiers sera discuté.

c. Choix des mélanges des formulations testées sur le comportement à long terme

Le choix répond à des contraintes économiques et techniques, mais également pour vérifier la pertinence de l'effet de la compacité sur les portances des matériaux routiers. En effet, les laitiers contenant une quantité importante de chaux libre et instable vis-à-vis le gonflement par la réaction de la chaux qu'ils peuvent contenir (Waligora et al, 2010). Afin de remédier la problématique de l'expansion volumique, nous avons majoré le taux des sédiments dans les mélanges retenus jusqu'à 50% du mélanges. Ce choix permet aussi de garder un comportement mécanique à court terme suffisant pour des applications en techniques routières. Les compacités correspondant aux mélanges retenus sont similaires à celles enregistrées aux laitiers seuls sous la même énergie de compacité. Donc, notre démarche permet de choisir un pourcentage de sédiments jusqu'à 50%.

4.3 Comportement mécanique des mélanges

Ce chapitre consiste à proposer des formulations à base d'un déchet (sédiment de dragage) et d'un coproduit industriel (laitier d'aciérie) afin de permettre une valorisation en technique routière. Les formulations retenues sont dans le Tableau 4.7 .

Références	% Sédiments	%LD1	%LD2
F1	50	50	0
F2	50	0	50

Tableau 4.7 : Constituants des mélanges des formulations réalisées

Dans ce paragraphe, on détaille le comportement mécanique à court terme (γ_d et IPI) et à long terme (la résistance à la traction R_t , le module d'élasticité E et le potentiel d'expansion volumique) des formulations retenues. Il est à noter que tous les essais ont été réalisés trois fois. Dans ce qui suit, la moyenne de trois résultats est reportée.

4.3.1 Comportement Proctor-IPI

Dans la Figure 4.15, on reporte le comportement au compactage Proctor des deux formulations en fonction de la teneur en eau. L'essai Proctor Modifié est conforme à la norme NF P 94-093.

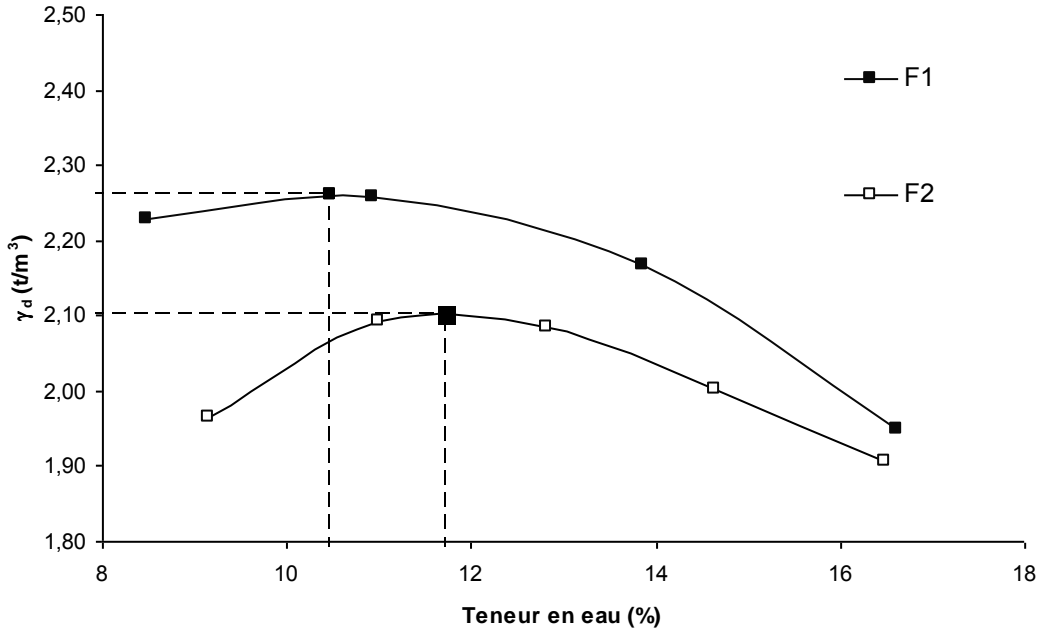


Figure 4.15: Courbes Proctor modifié des formulations proposées de sédiments et laitiers d'aciéries

La masse volumique sèche optimale mesurée est de 2,26 t/m³ pour la formulation à base de sédiments et de laitiers LD1. La formulation de sédiments de dragage et de laitier LD2 présente une masse volumique maximale de 2,10 t/m³. La teneur en eau optimale est de 10,47 % pour la formulation F1. La teneur en eau optimale pour la formulation F2 est légèrement plus importante et vaut 11,73%.

L'Indice Portant Immédiat IPI mesuré sur les échantillons de la Figure 4.15, est présenté sur la Figure 4.16.

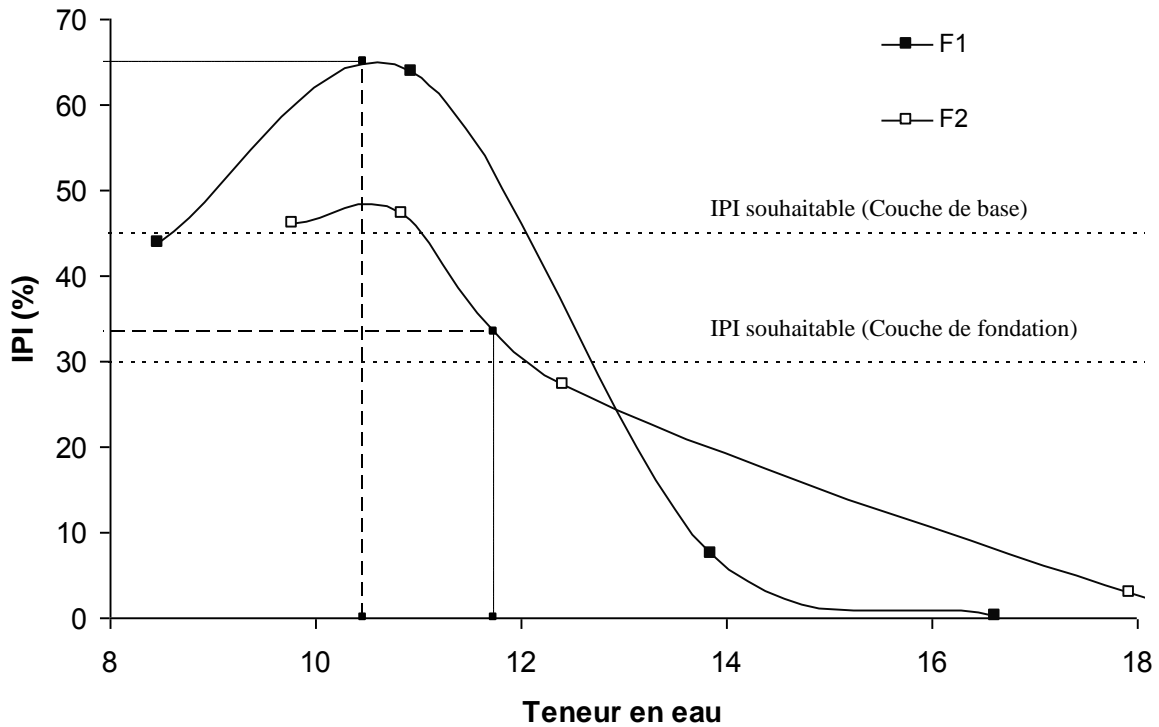


Figure 4.16 : Indice Portant Immédiat des formulations

On remarque que pour les deux formulations à la teneur en eau optimale, l'IPI dépasse la limite indiquée pour une utilisation en couche de fondation (Figure 4.16). La formulation F1 peut correspondre à un dimensionnement pour une couche d'assise.

Dans le *Tableau 4.8*, un récapitulatif des résultats en terme de comportement mécanique au compactage est reporté.

Formulation	w_{opm} (%)	ρ_{dopm} (g/cm ³)	IPI à w_{opm} (%)	IPI max (%)
F1	10,47	2,26	65	65,50
F2	11,73	2,10	25	48

Tableau 4.8 : Résultats Proctor-IPI sur les formulations proposées

Dans le présent travail, il est souhaité de chercher la solution technique maximale à la problématique du sédiment de dragage. Le but est donc de formuler un matériau qui pourra répondre aux exigences mécaniques d'une couche d'assise. Cependant, la formulation F2 à base de sédiment et de laitier LD2 ne satisfait pas les conditions en portance immédiate IPI exigée [GTR, 2000]

4.3.2 Résistance à la compression

La résistance à la compression des deux formulations a été mesurée sur deux types d'éprouvettes. Pour la formulation F1, les éprouvettes possèdent un diamètre de 50mm et de hauteur 100mm. La formulation F2 contenant des laitiers LD2 dont la granulométrie est de 0/30, les éprouvettes testées sont de 100mm de diamètre et de 200mm de hauteur. Sur la *Figure 4.17* l'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps de cure des deux matériaux issus de F1 et F2 est présentée. On représente la moyenne de trois mesures réalisées sur trois éprouvettes à plusieurs échéances (7, 28, 90 et 360 jours).

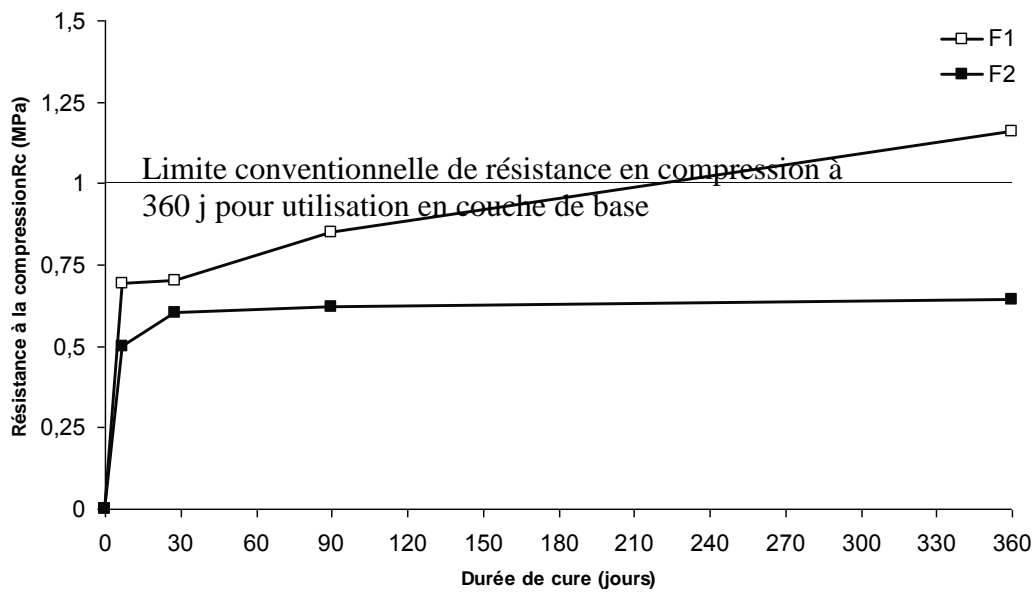


Figure 4.17 : Evolution de la résistance en compression des formulations réalisées

La mesure de la résistance en compression n'est pas nécessaire pour le dimensionnement d'une couche de base. Toutefois, cette série de mesure à différentes échéances permet d'explorer l'évolution de la résistance des matériaux formulés avec le temps.

4.3.3 Résistance à la traction

L'évaluation de la traction directe est assez délicate sur les sols traités. D'une part, la mise en place de l'essai est difficile à mettre en œuvre. D'autre part, le comportement des formulations n'étant pas linéaire, la relation contrainte-déformation est difficile à établir. Dans la présente étude on s'est référé à la détermination de la résistance en traction indirecte avec le dispositif tel qu'il est illustré sur la Figure 4.18. Cet essai est réalisé conformément à la norme Française [normes NF P 98 232 1 et NF P 98 232 3]. A partir de l'effort vertical appliqué, on détermine la contrainte en traction de l'éprouvette en fonction des dimensions de cette dernière. La valeur de la résistance en traction est définie par l'équation ci-dessous

$$R_t = 0,8 R_{tb} = 0,8 \times 2 \times 10^{-2} \times \frac{Fr}{\pi \Phi h} \quad \text{Eq. 4.8}$$

avec :

- R_t : résistance à la traction estimée de R_{tb} (MPa),
- R_{tb} : résistance en compression diamétrale (MPa),
- Fr : force appliquée sur l'éprouvette au moment de la rupture (N),
- h : hauteur de l'éprouvette (cm),
- Φ : diamètre de l'éprouvette (cm)

En plus de la détermination de la résistance à la traction, les modules de déformation ont été mesurés par l'utilisation d'un dispositif adopté (Figure 4.18). Les valeurs de résistances à la traction et les modules de déformations ont détaillés dans le Tableau 4.9.

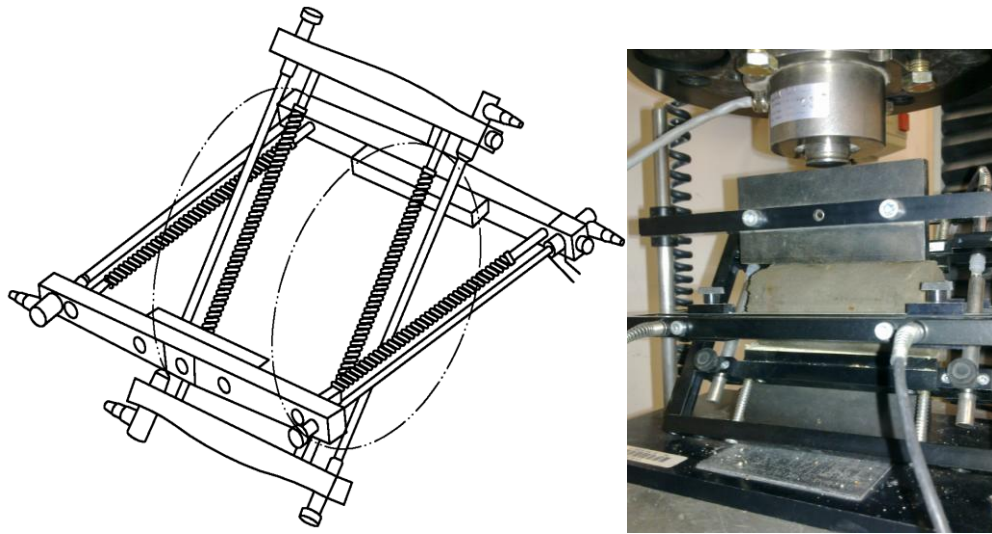


Figure 4.18 : Illustration de l'essai de traction par compression diamétrale

	Formulations	90 jours		360 jours	
		R _t (MPa)	E (GPa)	R _t (MPa)	E (GPa)
F1	F1-1	0,49	5,19	0,70	6,92
	F1-2	0,38	7,86	0,54	10,48
	F1-3	0,58	6,08	0,83	8,10
	F1 moy	0,48	6,38	0,69	8,50
F2	F2-1	0,27	4,05	0,39	5,40
	F2-2	0,66	3,72	0,95	4,96
	F2-3	0,43	4,41	0,61	5,88
	F2 moy	0,45	4,06	0,65	5,41

Tableau 4.9 : Comportement des formulations en traction et en modules de déformation à 90jours et à 360jours

4.3.4 Classification selon les performances mécaniques

L'interprétation des résultats du *Tableau 4.9*, dans la *Figure 4.19* permet de déterminer la classe du matériau. Ce classement permet de placer les caractéristiques des deux formulations dans une présentation de leur module d'élasticité en fonction de la contrainte à la traction estimée à 360 jours. En fonction de la classe de la formulation, l'emploi dans les travaux en techniques routières pourra être déterminé. Dans cette étude, notre but est de formuler un matériau pour une couche de base, le matériau doit atteindre la classe T2 minimum. A partir de résistance à la traction supérieure ou égale à la limite définie par la classe T2, le matériau peut faire l'objet d'un emploi en couche de base de point de vue résistance mécanique.

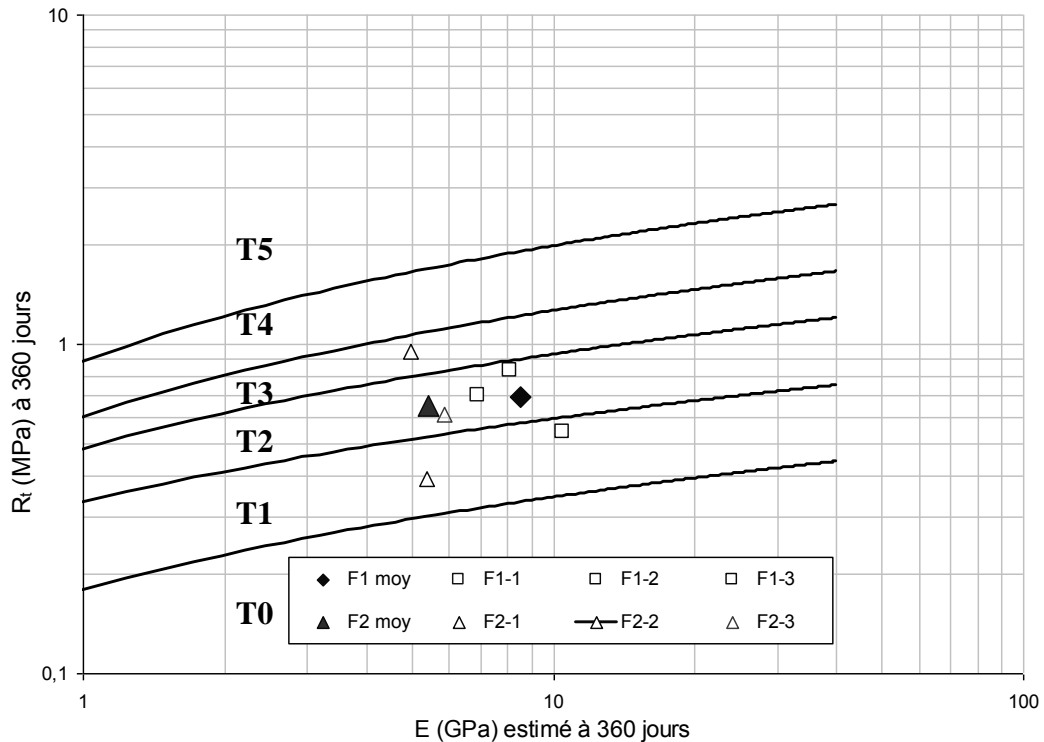


Figure 4.19: Classification des formulations étudiées

Dans le cadre de cette étude, les formulations établies à base de sédiments de dragage et de laitiers d'aciérie présentent des performances mécaniques suffisantes pour l'emploi dans une couche de base [GTR, 2000]. En termes de résistance à la traction, les deux formulations possèdent deux valeurs similaires. Ceci revient essentiellement à la similitude entre les deux formulations. Toutefois, en termes de comportement mécanique, la formulation F1 possède un module d'élasticité moyen deux fois plus important que celui estimé sur la formulation F2.

A partir de ces derniers résultats, on peut affirmer que les formulations proposées possèdent des caractéristiques à court terme et à long terme suffisantes en termes d'exigences routières. Cependant, la formulation F2 possède un IPI plus faible que celui enregistré pour la formulation F1.

Nous avons montré que les deux formulations, peuvent faire l'objet d'un emploi en couche de base à partir des caractéristiques mécaniques. Cependant, les matériaux routiers sont exposés à plusieurs agents agressifs. Il est donc nécessaire d'étudier la durabilité des ces formulations. Parmi les paramètres à étudier, le gonflement est particulièrement important pour les laitiers. L'emploi des sédiments peut jouer un rôle de stabilisateur des laitiers dans les matériaux formulés.

4.3.5 Evaluation du potentiel d'expansion des formulations

Les laitiers contiennent de la chaux et de la magnésie et sont donc des matériaux expansifs. Sur la Figure 4.20, le suivi du gonflement des formulations F1 et F2 conformément à la norme NF P 94-078 est présenté.

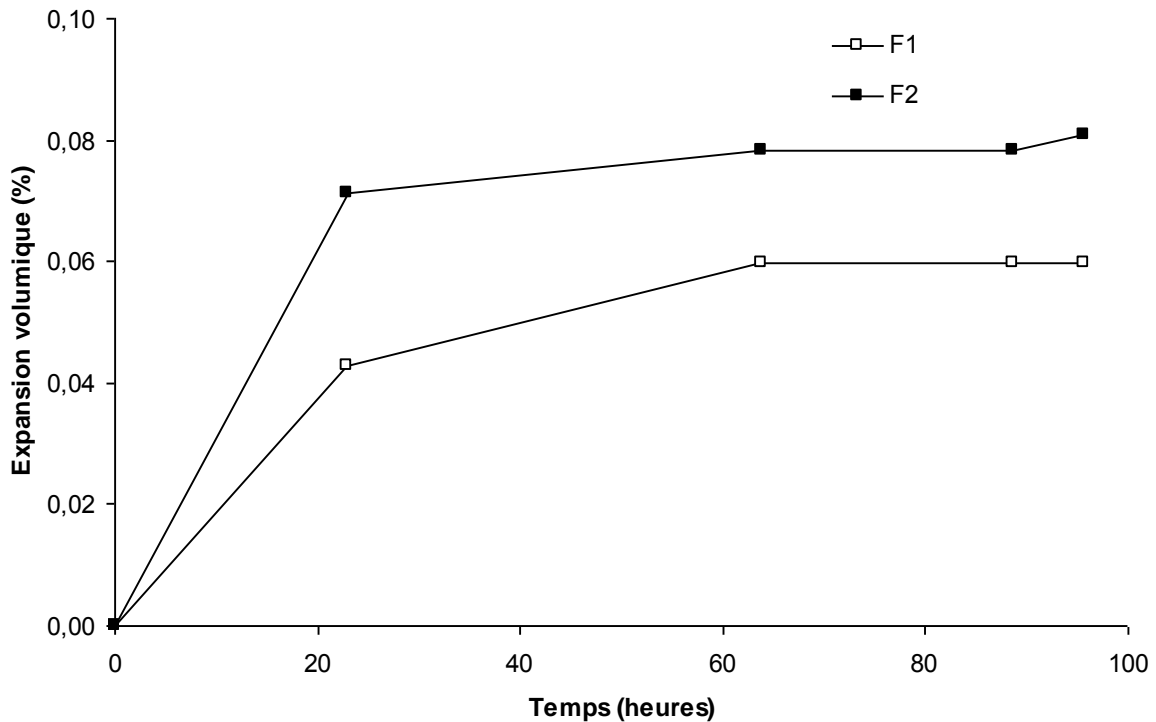


Figure 4.20 : Evaluation du gonflement des formulations F1 et F2.

D'après la *Figure 4.20*, la formulation F2 apparaît légèrement plus expansive que la formulation F1. Les valeurs sont largement inférieures aux valeurs limites définies par le guide des terrassements routiers limités à 3% (GTR, 2000). Comme les deux formulations contiennent la même quantité de sédiments, ceci revient à la qualité du laitier utilisé dans chacune des formulations. En effet, le LD2 contient un taux plus important de chaux que le laitier LD1. Pour les deux formulations, les éprouvettes ont été confectionnées à la densité maximale.

4.3.6 Analyse de la composition de la matrice des mélanges étudiés

Le comportement du matériau dépend essentiellement de l'évolution de la composition du mélange. Pour cela, nous avons réalisé une étude minéralogique complémentaire afin d'explorer l'évolution de la matrice des deux formulations F1 et F2.

Tout d'abord, une analyse élémentaire par fluorescence X a été réalisée. Les résultats en termes d'oxydes sont présentés sur l'histogramme de la *Figure 4.21*. Cette composition a été réalisée indépendamment de la forme de l'oxyde dans le matériau. Certains oxydes peuvent être liés pour former un autre composé.

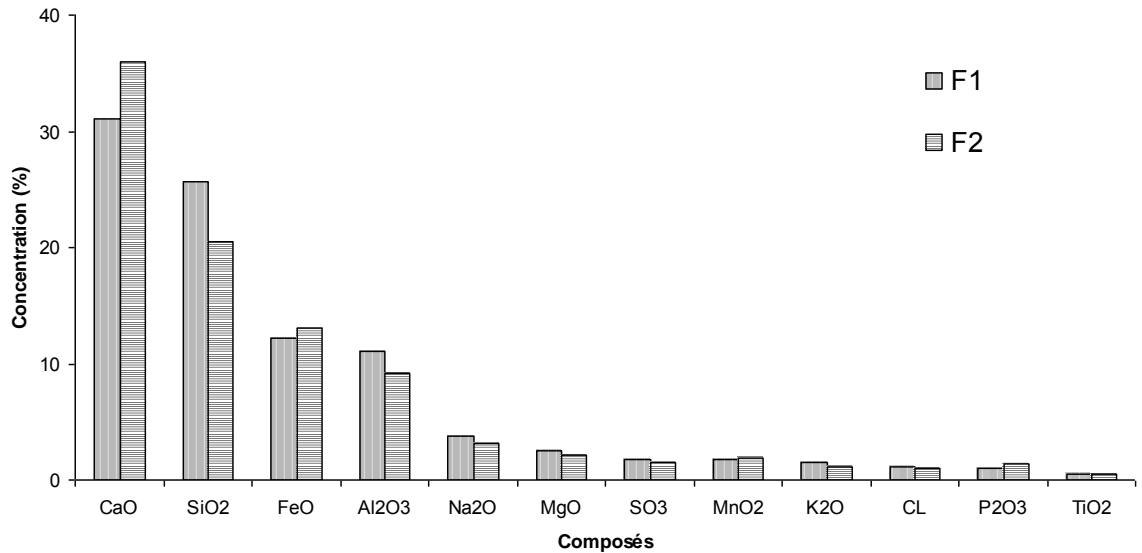


Figure 4.21 : Composition des formulations étudiées

D'après la figure précédente, la composition des deux formulations est comparable pour les deux formulations. Cette composition en oxydes qui présentent une composition importante en chaux et en silice. Ces deux phases peuvent être sous forme d'oxydes ou en assemblés sous la forme de larnite (C2S). On remarque également la présence de l'alumine et de la magnésie qui proviennent des laitiers. Le sel provient essentiellement des sédiments.

Afin de localiser les phases cristallines en présence, une analyse DRX a été réalisée sur les deux formulations après une période de cure supérieure à 28jours.

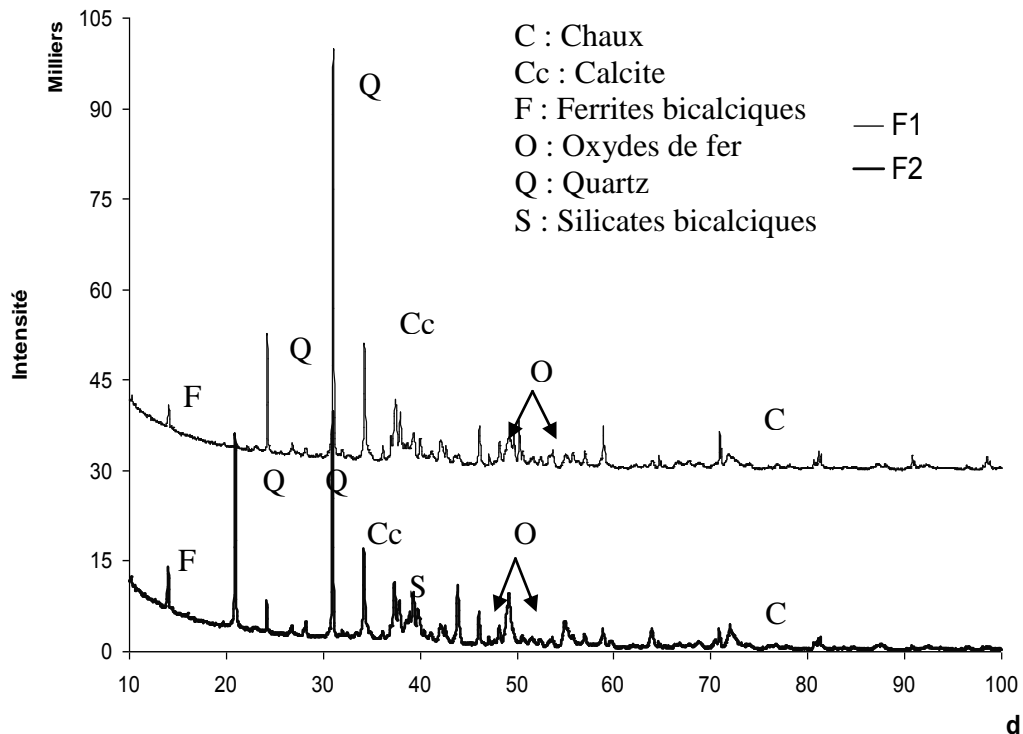


Figure 4.22 : Analyse minéralogique des formulations étudiées

L'analyse DRX montre la présence du quartz, des silicates, de la calcite et de la chaux aérienne, du quartz et de l'oxyde de fer.

4.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons explicité la démarche suivie pour l'utilisation des sédiments et des laitiers d'aciérie en technique routière. A partir des résultats du chapitre précédent, nous avons défini une méthodologie pour la confection au laboratoire d'un matériau routier. Ensuite, nous avons réalisé différents essais afin de valider le comportement des formulations retenues. Ces essais consistent tout d'abord à l'application du modèle d'empilement compressible afin de cerner une plage de compacités suffisamment élevées. Le mélange optimal est choisi dans cette plage de compacité avec un mélange contenant le maximum du sédiment. Ceci, permet d'atténuer le potentiel d'expansion des laitiers, mais aussi, nous permet d'incorporer une quantité importante de sédiments. Les mélanges sélectionnés ont subi une série d'étude mécanique. La détermination de la masse volumique absolue sèche à l'optimum Proctor caractérise du comportement à court terme des mélanges. Ensuite, nous avons réalisé une étude du comportement mécanique à partir de la résistance à la traction et le module d'élasticité des mélanges afin d'apprécier l'aptitude de ces derniers à l'application aux travaux routiers.

Cette étude a montré que les sédiments de dragage, malgré les performances mécaniques initiales réduites (cf. chapitre 2), mélangés avec des correcteurs granulométriques ont fourni une solution technique intéressante. A l'échelle de laboratoire, nous avons confirmé que les formulations réalisées à base de sédiments de dragage et de laitiers d'aciérie présentent une solution pour l'emploi en couche routière. La formulation F1 dépasse largement les exigences mécaniques pour le dimensionnement d'une couche d'assise.

A partir de ce résultat, nous étudierons dans le chapitre suivant (chapitre 5), le dimensionnement d'une planche expérimentale à partir de la formulation F2. Cette démarche permet d'étudier une faisabilité mécanique d'une échelle pilote. La réalisation planche expérimentale permettra la mise en place d'un suivi des rejets des polluants.

CHAPITRE 5

DIMENSIONNEMENT D'UNE ASSISE DE CHAUSSÉE À BASE DE SÉDIMENTS ET DE LAITIERS

Chapitre 5 Dimensionnement d'une assise de chaussée à base de sédiments et de laitiers

5.1 Introduction

Le choix de la route pour la valorisation revient essentiellement à l'intérêt que présente ce domaine. La quantité utilisée de matériaux est considérable. De point de vue économique, l'introduction de déchets en technique routière permet d'économiser la valeur des matériaux naturels. En plus, de point du vue environnemental, l'utilisation de déchets en technique routière permet une importante avancée pour une gestion durable des déchets.

L'objet du dimensionnement d'une chaussée est de déterminer la nature et l'épaisseur des couches qui la constituent afin qu'elle puisse résister aux agressions multiples auxquelles elle sera soumise pendant sa « durée de vie », ou plutôt, suivant la terminologie actuelle, sa « durée de dimensionnement ».

Le dimensionnement d'une structure routière suit une démarche générale comme d'autres structures en génie civil. Il s'agit de résoudre une inégalité entre comportement des matériaux utilisés (contraintes et déformations) et les contraintes et déformations admissibles pendant la durée de vie de l'ouvrage. Le dimensionnement d'une chaussée dépend essentiellement de son environnement, des chargements, de la durabilité des matériaux..., Mais elle dépend d'autres particularités qui lui sont propres ; à savoir :

- la définition de l'objectif de la chaussée,
- l'aspect probabiliste de la chaussée,
- l'environnement de la chaussée,
- les conditions de trafic,
- la modélisation

Dans ce chapitre, nous allons entreprendre le dimensionnement d'une chaussée souple à base des matériaux étudiés dans le chapitre précédent. Pour ce faire, nous avons utilisé la méthode française de dimensionnement des chaussées routières.

5.2 Modèles de dimensionnement d'une structure de chaussée

La chaussée est destinée à répartir la pression exercée par le pneumatique pour l'amener à un niveau admissible pour le sol support. La charge appliquée à la chaussée est répartie sur la surface de contact (Figure 5.1).

On distingue les chaussées souples et les chaussées rigides. Les chaussées souples, contrairement aux chaussées rigides sont très flexibles et plus faciles à mettre en œuvre par rapport à une structure en béton. En plus, les chaussées souples présentent l'avantage d'être continues et ne comportent pas de joints. Elles sont aisément réparables par rapport aux structures rigides ainsi que la possibilité de leur apporter de matériaux supplémentaires.

Pour le dimensionnement, plusieurs modèles sont développés dans la littérature.

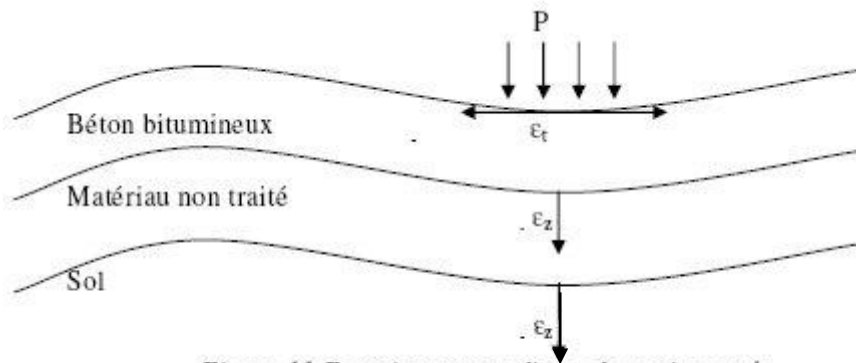


Figure 11 Fonctionnement d'une chaussée souple

Figure 5.1 : Fonctionnement d'une structure de chaussée souple sous une charge roulante

Le comportement d'une structure souple permet une déformation au passage des charges roulantes. Le schéma illustrant ce mécanisme (Figure 5.1) présente le comportement sous charge caractérisant les chaussées souples. Celles-ci sont constituées par plusieurs couches de matériaux superposées depuis le sol support dans l'ordre croissant de leurs niveaux de sollicitations. Chacune de ces couches descend sur la suivante une charge uniformément répartie répartissant sur une plus grande surface. Cette répartition uniforme traduit l'absence de déformation élastique de chacune de ces couches de chaussées.

Dans ce chapitre, nous allons dimensionner une structure de chaussée dont la couche d'assise est composée à partir des matériaux formulés au chapitre 4. Les résultats seront interprétés de point de vue économique et comparés au coût d'une chaussée de même classe à base de matériaux naturels.

Le calcul des contraintes dans la chaussée est basé soit sur une approche empirique et des modèles théoriques de la mécanique des chaussées. Il s'agit de définir la façon de la superposition des couches, la répartition des contraintes et les conditions aux limites définissent la mise en place d'un tel modèle.

Plusieurs modèles existent pour le dimensionnement d'une structure de chaussée, on indique les étapes des modèles les plus utilisés :

5.2.1 Modèle mono couche de Boussinesq

Le modèle de Boussinesq est basé sur l'assimilation du corps de la chaussée à un massif infini (Figure 5.2). Il prend comme hypothèse que la répartition des contraintes du corps de chaussée vers le sol est continue et décroissante en fonction de la profondeur.

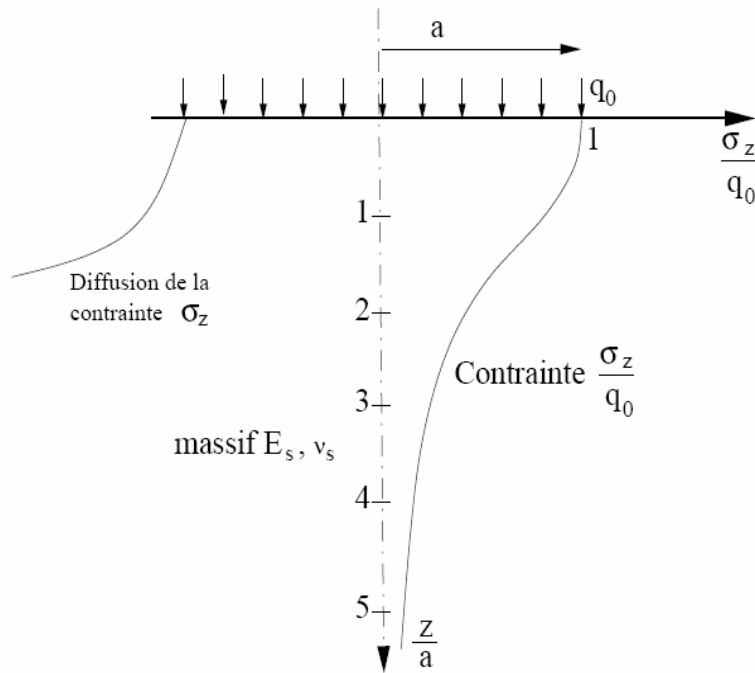


Figure 5.2 : Diffusion des pressions dans un massif de Boussinesq.

Dans ce modèle le sol est supposé élastique caractérisé par son module d'Young E_s et son coefficient de Poisson ν_s . A chaque contrainte appliquée, il y a une réponse en déformation du sol. La deuxième hypothèse est que les contraintes dans le sol ne dépendent pas de la direction. La troisième hypothèse se traduit par le fait que le sol est supposé identique en toutes portions pour vérifier l'homogénéité du massif. Ces hypothèses ont permis à Boussinesq [1885] de calculer la contrainte en tout point dans le massif en fonction de la surface de chargement a , de la pression appliquée à la surface et de la profondeur.

La contrainte σ_z est maximale à l'aplomb du cercle de l'application de la charge de rayon a (Figure 5.2). A une profondeur z , elle prend la valeur suivante :

$$\sigma_z = q_0 \left[-1 + \frac{z^3}{(a^2 + z^2)^{3/2}} \right] \quad \text{Eq. 5.1}$$

La contrainte mesurée dans le massif de Boussinesq décroît en fonction de la profondeur du massif comme indiqué sur la Figure 5.3. Grace aux résultats de Boussinesq, on peut donc trouver la profondeur H du sol où la pression verticale a été suffisamment diffusée pour ne pas dépasser une valeur admissible. On peut ensuite faire correspondre une épaisseur de chaussée H' à l'épaisseur H par une règle simple tenant compte du Module E_1 du corps granulaire et du module E_s du sol support. Autrement dit, nous pouvons écrire :

$$H' = H \times f\left(\frac{E_1}{E_s}\right) \quad \text{Où} \quad f\left(\frac{E_1}{E_s}\right) < 1 \quad \text{Eq. 5.2}$$

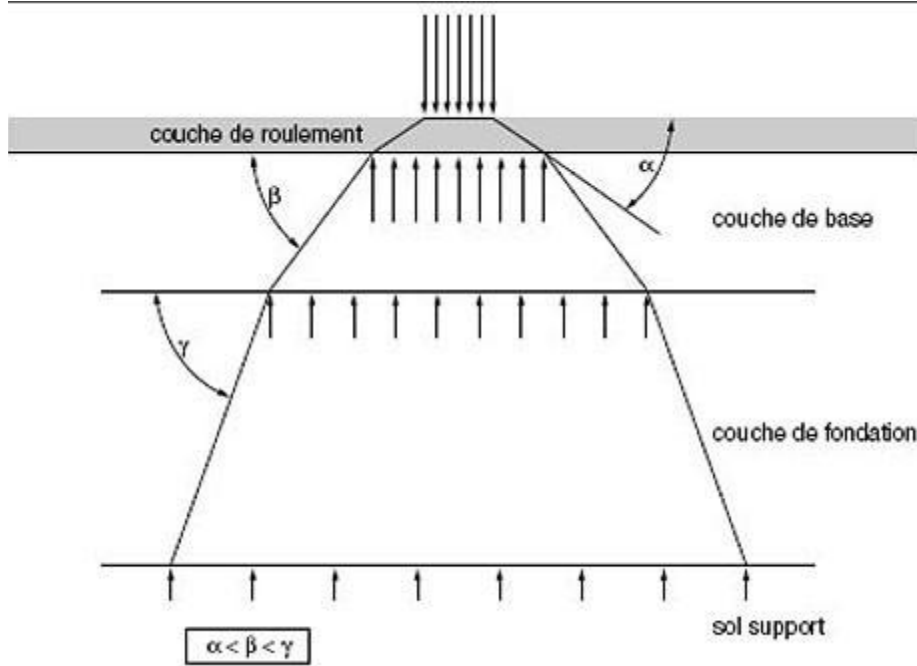


Figure 5.3 : Evolution de la contrainte admissible dans le massif de Boussinesq

La définition de la fonction f , signifie qu'on est en présence d'un modèle multicouche. Ceci nécessite de définir l'évolution des contraintes en fonction du module d'élasticité dans les différentes couches.

Le modèle de Boussinesq est le plus simple puisqu'une seule contrainte est à évaluer. Cependant, dans ce modèle les simplifications ne permettent pas de prendre en compte plusieurs paramètres et le modèle présente les inconvénients suivants :

- Le modèle ne peut pas prendre en compte des discontinuités
- La zone d'application pratique est limitée
- Il ne peut pas modéliser les structures multicouches (particulièrement les interactions).

Les modèles multicouches permettent de définir des modules pour chaque couche. A partir de ces modèles on peut optimiser l'épaisseur de la couche par rapport à une modélisation avec un modèle monocouche. Cependant les modèles multicouches présentent plusieurs difficultés dans la définition des contraintes dans chaque couche, ainsi, que les conditions aux limites entre différentes couches de la chaussée. Dans ce qui suit on présente les modèles multicouches les plus utilisés.

5.2.2 Modèle de Hogg

Le modèle de Hogg est une suite logique au modèle de Boussinesq comme schématisé dans la Figure 5.4. Cependant la complexité dans le modèle de Hogg réside dans la définition de la nature du massif de Boussinesq qui supporte la chaussée.

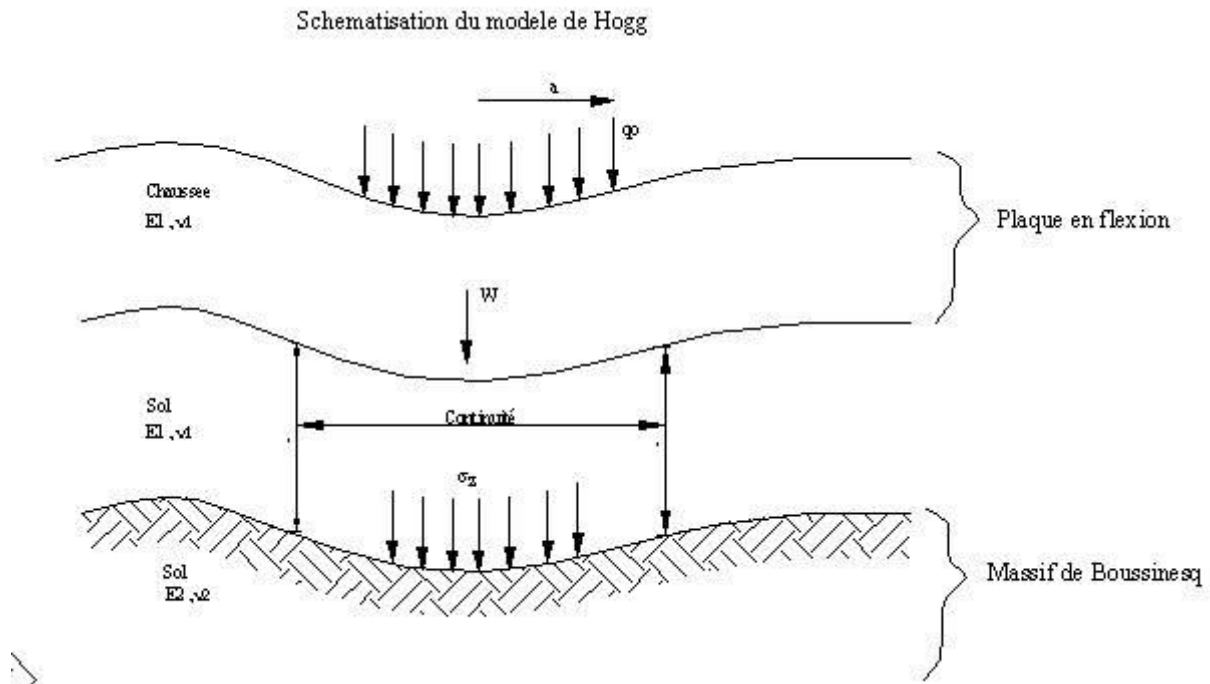


Figure 5.4 : Modèle de Hogg

Hogg, pour déterminer les contraintes et déplacements dans les chaussées, doit résoudre les équations d'élasticité linéaire. Plusieurs hypothèses simplificatrices consistent à assimiler les couches de chaussées à des plaques minces (hypothèses de Navier sur les plaques minces). Ceci conduit à supposer dans la couche de chaussée :

- Le plan moyen est confondu avec la fibre neutre
- Les sections planes transversales restent planes
- Les contraintes normales suivant une direction transversale sont négligeables.

Les déplacements verticaux satisfont par conséquent, l'équation de Lagrange :

$$D \cdot \Delta^2 w = p \quad \text{Eq. 5.3}$$

avec

$$D = \frac{E_1 \times H^3}{12(1 - \nu_1^2)} \quad \text{Eq. 5.4}$$

D représente un facteur de rigidité de la plaque, w le déplacement vertical de la fibre neutre de la plaque et p désigne la somme des contraintes verticales, soit $p = \sigma_z - q_0$

On note que la contrainte de traction peut être écrite :

$$\sigma_t = \frac{P}{H^2} \frac{1 + \nu}{2\pi} F\left(\frac{E_1}{E_2} \cdot \frac{H^3}{a^3}\right) \quad \text{Eq. 5.5}$$

avec :

$$\frac{1+\nu}{2\pi} F\left(\frac{E_1}{E_2} \cdot \frac{H^3}{a^3}\right) \quad \text{facteur de rigidité}$$

Et

$$\frac{E_1}{E_2} \cdot \frac{H^3}{a^3} \quad \text{facteur de rigidité relative}$$

5.2.3 Modèle de Westergaard (1926)

Le modèle de Westergaard part d'une nouvelle approche tout à fait différente du principe d'un massif de Boussinesq. Dans ce modèle, Westergaard a assimilé le sol support à un assemblage de ressorts verticaux comme indiqué dans la Figure 5.5.

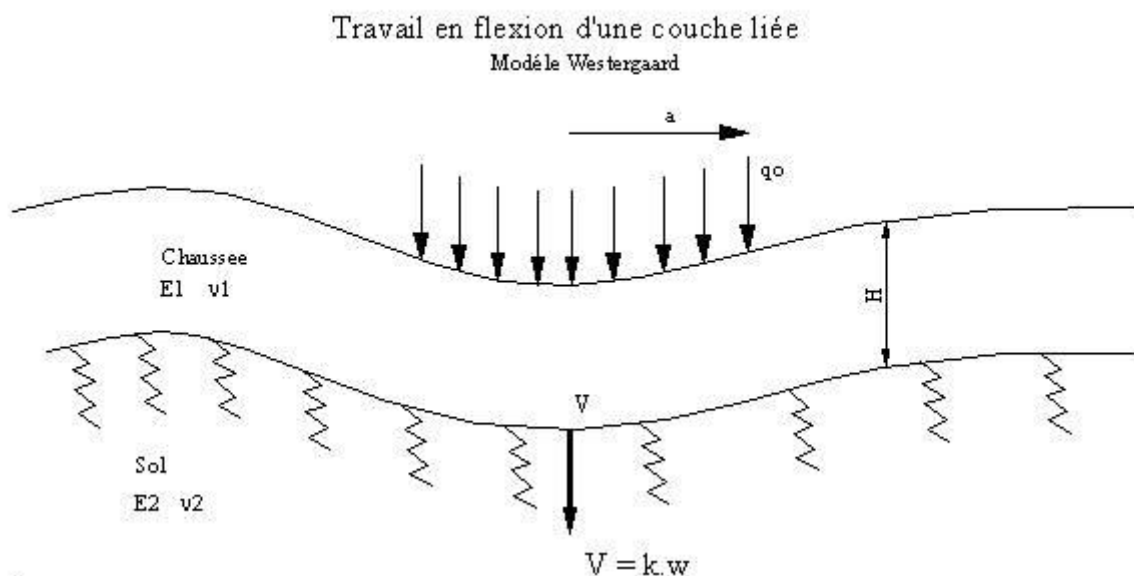


Figure 5.5 : Modèle de Westergaard

Le déplacement vertical W est en tout point du corps de la chaussée proportionnel à la contrainte verticale appliquée V .

$$V = K \cdot W$$

où K est le module de réaction du sol support.

Cette hypothèse simplificatrice facilite la résolution des équations de quatrième ordre de Westergaard par les transformations de Hankel.

La contrainte de traction est donnée par :

$$\sigma_t = \frac{p}{H^2} C\left(\frac{l}{a}\right) \quad \text{Eq. 5.6}$$

où

$$l = \sqrt[4]{\frac{E_1 H^3}{12(1-\nu_1^2) \cdot k}} \quad \text{Eq. 5.7}$$

avec,

l est le rayon de rigidité de la chaussée,

P est la charge par essieux,

C une fonction croissante de l dépendant de la position de la charge.

Les modèles bicouches sont simples à manipuler en mettant en évidence des hypothèses simplificatrices. Cependant, l'optimisation de l'épaisseur de la couche, des exigences mécaniques, passent par l'amélioration de la résolution des équations de contraintes dans des modèles réalistes. Ceci conduit la réflexion aux modèles multicouches.

5.2.4 Les modèles Multicouches (Burminster, 1943)

Le modèle de Burminster [Burminster, 1943] est schématisé sur la Figure 5.6. La chaussée est assimilée à n couches superposées et supposées infinies dans le plan. Elles reposent sur un sol infini de Boussinesq. La charge est supposée répartie sur un cercle.

La résolution d'un problème d'élasticité en coordonnées cylindriques se réduit à la recherche d'une fonction de tension (ou de Love) $\Phi(r,z)$ à double Laplacien nul :

$$\Delta^2 \Phi(r,z) = 0$$

Les variables r et z représentent respectivement le rayon et la profondeur de la couche.

La résolution du problème de n couches revient à la recherche des n fonctions définies, dans chacune des couches i par $\Delta^2 \Phi_i(r,z) = 0$ et par les conditions aux limites.

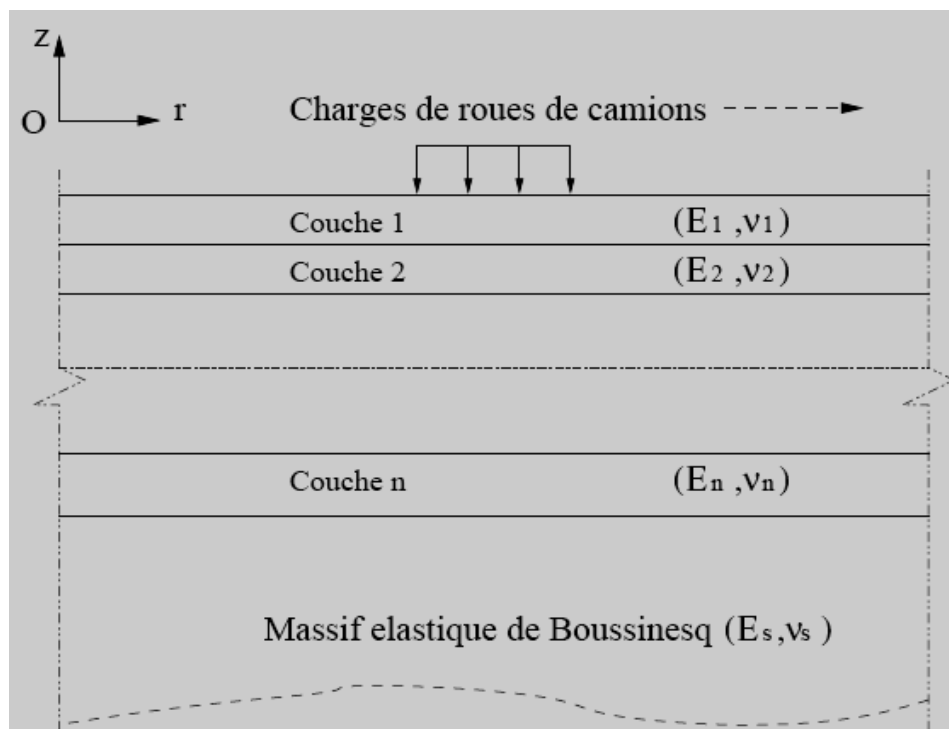


Figure 5.6 : Schéma du modèle de Burminster

La plupart des méthodes de dimensionnement des chaussées se base sur le modèle de Burminster, y compris la méthode Française de dimensionnement des chaussées. Il est beaucoup plus réaliste en termes de modélisation de l'état réel de la chaussée dont l'hypothèse

multicouche est prise en considération. Les avantages du modèle de multicouches de Burminster sont que :

- les champs de contraintes et de déplacements sont examinés dans des couches élastiques, ce qui évite l'hypothèse simplificatrice de plaque des autres modèles.
- les interfaces entre couches peuvent être collées ou décollées
- le calcul par ce modèle est très rapide.

Cependant, ce modèle présente des inconvénients :

- les conditions aux limites ne sont pas définies sur les bords des couches dans le plan puisque les couches sont infinies horizontalement. Dans le cas d'une structure en béton, ou une structure fissurée, le modèle ne peut pas prendre en compte la présence de discontinuités.
- la charge est considérée circulaire, il est nécessaire de reconstituer la charge sur un cercle. Ce n'est pas satisfaisant pour modéliser dans certains cas une charge de poids lourd.

5.3 Méthode française de dimensionnement de la chaussée

La méthode française de dimensionnement de chaussées est une méthode semi-empirique. Elle tient compte à la fois des calculs théoriques, de l'observation des chaussées existantes et des expériences menées dans ce cadre. La démarche de la méthode est illustrée dans la Figure 5.7.

- Les calculs théoriques permettent de définir la structure de la chaussée et calculer les sollicitations mécaniques engendrées par la charge standard. Ceux-ci se basent sur le modèle de Burmister ou en utilisant le code de calcul ALIZE.
- Les données tirées de l'observation du comportement de la chaussée réelles sont utilisées pour préciser le critère de vérification et caler les résultats du modèle de calcul.
- Les résultats d'essais de laboratoire sont utilisés pour apprécier la résistance en fatigue des matériaux de chaussée.

La chaussée est dimensionnée pour résister aux agressions qu'elle peut subir pendant sa durée de dimensionnement. La principale agression est du trafic. Bien d'autres s'y ajoutent et, notamment, celles liées au climat (gel et dégel, variations de teneur en eau, variations de température, etc.) qui sapent progressivement les performances des matériaux et de leurs interfaces et entraînent dans la chaussées un certain nombre de désordres. On note essentiellement : le faïençage, la fissuration transversale, la fissuration longitudinale et l'orniérage [DONGMO, 2005]. La démarche suivante est mise en œuvre pour limiter au maximum ces derniers défauts dans la chaussée.

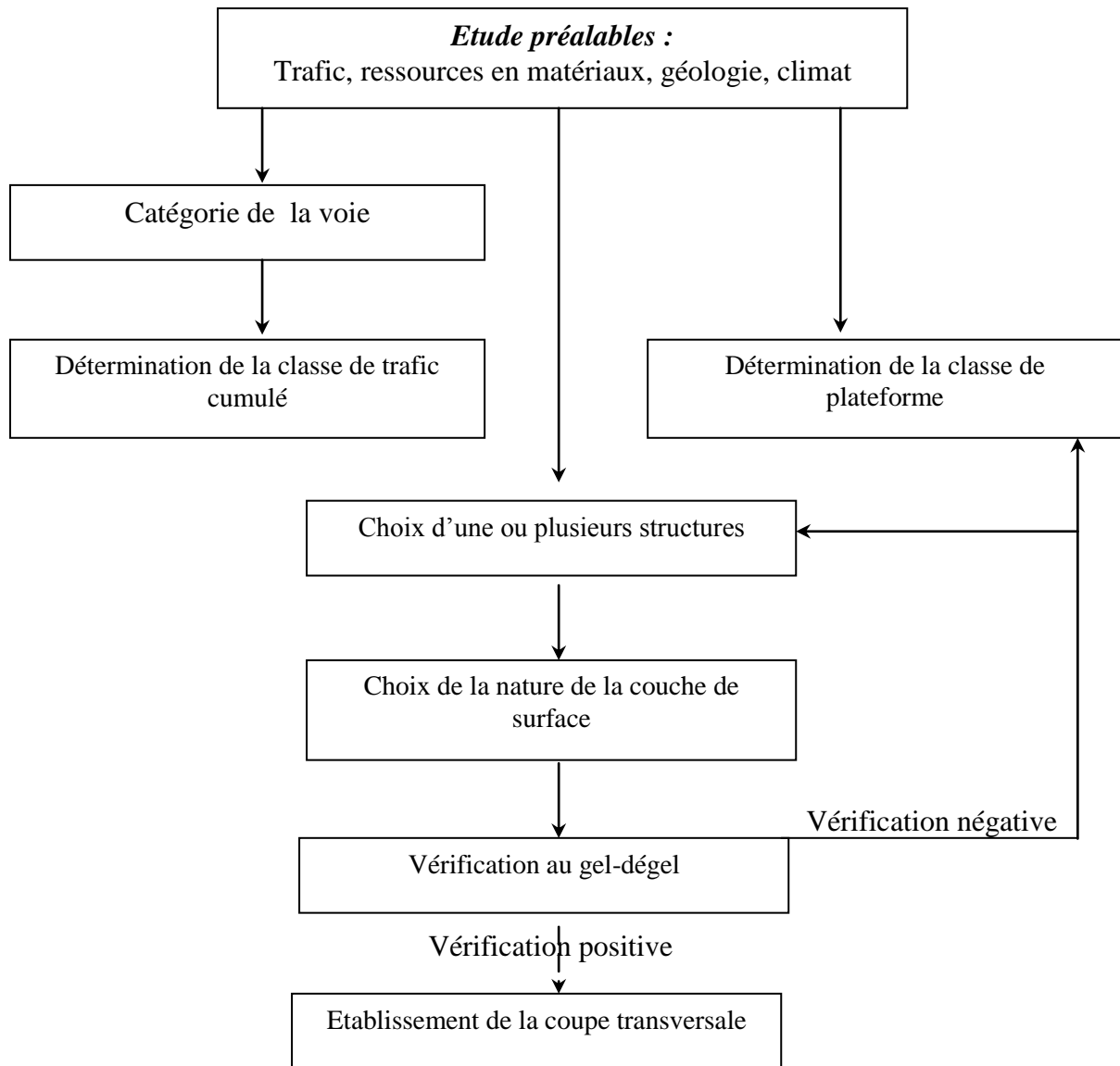


Figure 5.7 : Synoptique de la démarche de détermination d'une structure de chaussée

La démarche de la méthode française de dimensionnement des chaussées se base sur les paramètres pour les calculs théoriques. Ces derniers sont le trafic, les paramètres de base de calcul, les données climatiques et d'environnement et les paramètres descriptifs des matériaux.

5.3.1 Catégorie de voie

Pour chaque type de voie, on peut admettre des niveaux de confort différents en fonction de la vitesse de référence retenue. Cette vitesse dépend de plusieurs paramètres à savoir, l'environnement de la route, le relief, le climat, ...etc

Pour le dimensionnement des chaussées, on différenciera deux types de routes :

- Les voies du réseau structurant (VRS) correspondant aux types 1 et 2 de la typologie des routes en milieu urbain (autoroutes et routes express),

- Les voies du réseau non structurant (VRNS) correspondant aux types 3 et 4 de la typologie des routes en milieu urbain (artères interurbaines et autres routes),

5.3.2 Classes de trafics

Pour choisir les couches de surface, il est nécessaire de connaître le nombre de poids lourds moyen journalier annuel à la mise en service, c'est la classe de trafic T_i . La classe de trafic est définie par la limite supérieure de l'intervalle dans lequel se trouve le trafic moyen journalier annuel (TMJA) de poids lourds par sens de circulation, sur la voie la plus chargée.

Les différentes classes de trafic de référence utilisée dans la méthode française de dimensionnement des chaussées sont reportées dans le Tableau 5.1.

Classe	TMJA moyen par sens (PL)
T5	entre 0 et 25
T4	entre 25 et 50
T3-	entre 50 et 85
T3+	entre 85 et 150
T2	entre 150 et 300
T1	entre 300 et 750
T0	entre 750 et 2000
TS	entre 2000 et 5000
T exp	supérieur à 5000

Tableau 5.1 : Classe du trafic en France

5.3.3 Paramètres de base du calcul

Les paramètres de base de calcul sont essentiellement la durée de vie de l'ouvrage et le risque de calcul. La donnée de trafic prise en compte est celle du trafic des poids lourds cumulé pendant une période de temps choisie par le maître d'ouvrage, que l'on désignait traditionnellement comme la « durée de vie »

Deux valeurs sont proposées pour cette durée de dimensionnement initiale, en se basant sur les catégories de voies définies par le « Catalogue des types de route en milieu interurbain » de 1991.

- 30 ans pour les voies du réseau structurant (autoroutes et routes express à une chaussée), désignées dans les tableaux qui suivent par le sigle VRS ;
- 20 ans pour les autres voies, désignées par le sigle VNRS

5.3.4 Données climatiques et d'environnement

Les conditions climatiques ont une influence sur la résistance, la durabilité et les caractéristiques de déformabilité des chaussées et du sol support. Les données climatiques prises en compte dans le dimensionnement sont essentiellement :

- l'état hydrique du sol support
- les cycles saisonniers de température
- l'intensité des périodes de gel

5.3.5 Paramètres descriptifs des matériaux

Les caractéristiques des matériaux utilisés doivent correspondre aux sollicitations admissibles dans la couche d'assise dimensionnée. Elles permettent également de déterminer les contraintes et déformations dans le corps de la chaussée grâce au modèle théorique choisi.

Les contraintes et les déformations admissibles sont déterminées à partir des résultats de l'essai de fatigue au laboratoire. Elles sont ensuite évaluées en connaissant le trafic cumulé, le risque de calcul et les données d'observation du comportement des chaussées similaires [GTR, 2000].

- Pour les matériaux bitumineux

$$\varepsilon_{t,ad} = \varepsilon_6 \cdot \left(\frac{NE}{10^6} \right)^b \cdot k_r \cdot k_c \cdot k_s \quad \text{Eq. 5.8}$$

- Pour les matériaux traités au liant hydraulique

$$\sigma_{t,ad} = \sigma_6 \cdot \left(\frac{NE}{10^6} \right)^b \cdot k_r \cdot k_d \cdot k_c \cdot k_s \quad \text{Eq. 5.9}$$

- Pour le sol support

$$\varepsilon_{z,ad} = A \cdot (NE)^{-0,222} \quad \text{Eq. 5.10}$$

Dans ces équations, on a les notations suivantes :

$\varepsilon_{t,ad}$ est l'allongement admissible à la base des couches bitumineuses.

$\sigma_{t,ad}$ est la contrainte de traction admissible à la base des couches traitées aux liants hydrauliques.

$\varepsilon_{z,ad}$ est la déformation verticale admissible à la surface du sol support.

NE est le nombre équivalent d'essieux de références correspondant au trafic poids lourds cumulé sur la durée initiale de calcul retenue.

σ_6 et ε_6 sont les contraintes et déformation correspondants aux 10^6 cycles de charge provoquant la rupture.

b est la pente de la droite de fatigue en coordonnées bi-logarithmiques.

k_r est un coefficient tenant compte du risque de calcul.

k_c est un coefficient de calage destiné à ajuster les résultats du modèle de calcul au comportement observé de chaussées de même type.

k_s est un coefficient minorant tenant compte de l'effet d'hétérogénéités locales de portance d'une couche de faible rigidité supportant les couches liées.

k_d est un coefficient introduit pour prendre en compte l'effet des discontinuités pour la couche de base.

A est un paramètre pris égal à 0,012 pour les chaussées à moyen et fort trafic ($T \geq T_3$) et à 0,016 pour le cas contraire.

Les champs de contraintes et déformations créés par la charge de référence sont déterminés à la base de chaque couche selon le modèle multicouche de Burmister en utilisant le code de calcul ALIZE. Les valeurs obtenues sont ensuite comparées avec celles admissibles des matériaux constitutifs de la chaussée.

La démarche générale de la méthode française de dimensionnement est schématisée sur la Figure 5.8

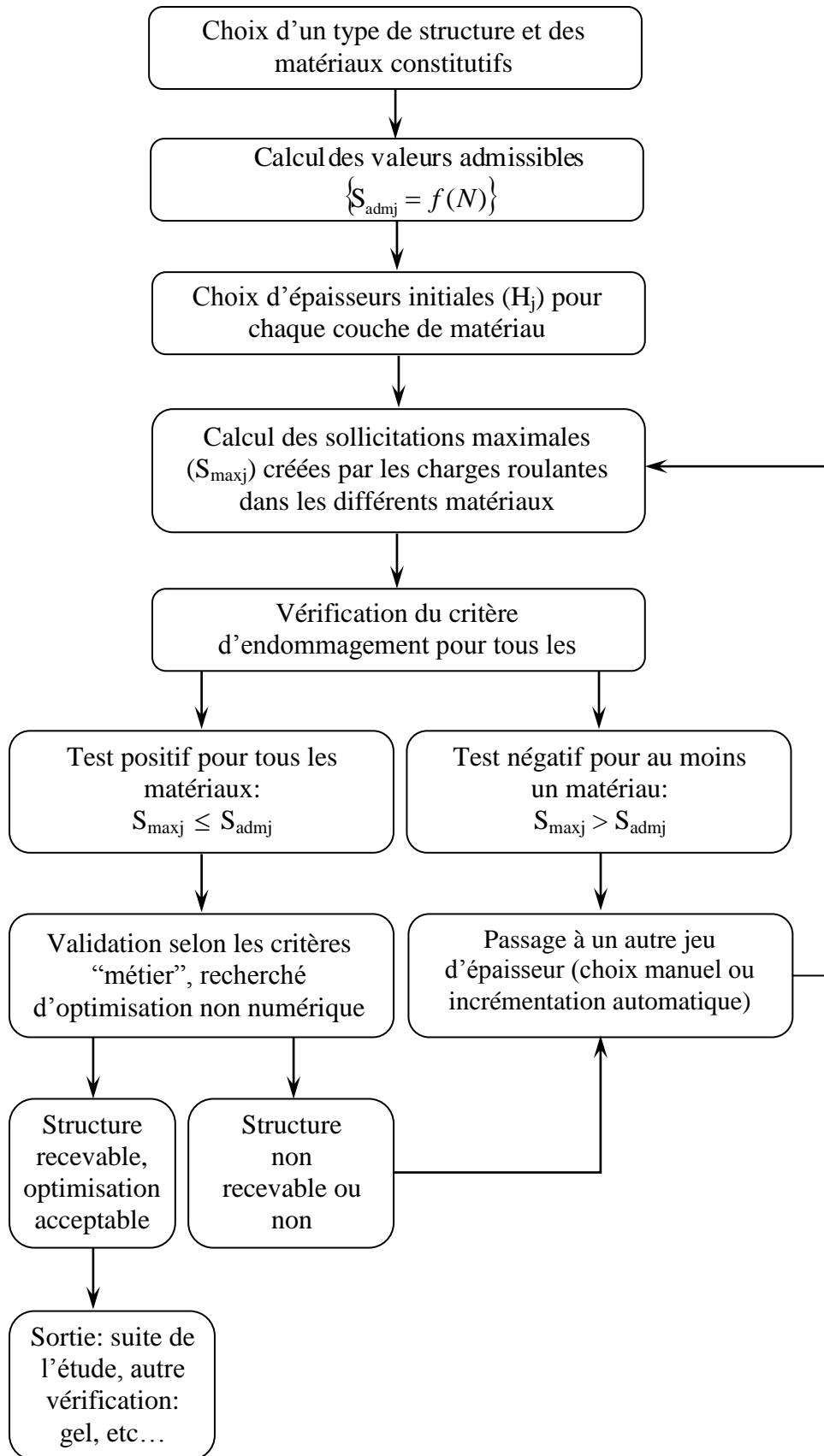


Figure 5.8 : Démarche générale du dimensionnement mécanique selon ALIZE.

5.4 Application de la méthode française pour le dimensionnement d'une structure de chaussée

Dans cette partie, après avoir réalisé des formulations au laboratoire et déterminé les caractéristiques mécaniques des mélanges, on se propose de dimensionner une couche de chaussée à base de ces matériaux. A l'instar de travaux de Tran [2009], l'application sur un pilote permet de vérifier la faisabilité des formulations réalisées dans le cadre de travaux aux laboratoires.

Dans ce chapitre, on détaillera le dimensionnement d'une structure de chaussée multicouche. La structure comportera une couche de base composée à partir de sédiments de dragage et de laitiers d'aciérie.

La structure de chaussée type envisagée dans cette modélisation est composée d'une couche de roulement en béton bitumineux (BB), d'une couche de base en sédiment-laitiers (SL) et d'une couche de fondation en grave non traité (GNT).

La formulation F1, discutée au chapitre 4, présente des caractéristiques suffisantes pour un emploi en couche de base. Dans cette étude on s'intéresse donc à cette formulation qui présente, en plus des données dans le Tableau 4.9, un IPI plus important.

Les données du trafic pour le dimensionnement se basent sur les données du guide technique pour la conception et le dimensionnement des structures de chaussées pour une chaussée standard [SETRA, 1994]. Les données suivantes sont utilisées :

Trafic T2 avec une moyenne journalière annuelle : MJA = 295 PL/jour

Taux de croissance géométrique : $t = 7,5\%$

Durée initiale : $p = 20$ ans

Risque de calcul : $r = 5\%$

Dans le Tableau 5.2, les paramètres liés au comportement des matériaux choisis selon les recommandations du guide technique pour la conception et le dimensionnement des structures de chaussée [GTR, 2000] sont présentés.

Matériaux	E (MPa)	ν	σ_6 ou ε_6 (MPa)	Pente de la fatigue (-1/b)	écart-type (SN)
BB	5400	0,35	$550 \cdot 10^{-6}$	5	0,25
SL	8500	0,35	0,69	10	0,8
GNT	150	0,35	-	-	-
Sol support	50	0,35	-	-	-

Tableau 5.2 : Caractéristiques mécaniques des matériaux utilisés estimées à partir de la méthode de dimensionnement

Pour une assise de chaussée traitée aux liants hydrauliques, les critères à vérifier sont :

- La contrainte de traction σ_t à la base de la couche sédiment-laitier doit être inférieure à la contrainte admissible.

- La déformation verticale ε_z à la base de la couche constituée de grave non traitée et à la surface du sol support doivent être inférieure à une valeur admissible.

Le calcul est basé sur l'hypothèse d'une liaison collée entre couches pour le calcul selon la méthode française de dimensionnement des chaussées.

D'après le Tableau 5.3, les critères de dimensionnement sont largement vérifiés pour les épaisseurs des couches retenues. On trace dans la Figure 5.9, la superposition des couches sur une coupe en travers de la chaussée. La couche de base correspond seulement à un mélange de laitier d'aciérie et de sédiments de dragage. Le mélange sera mis en œuvre à la teneur en eau optimale et compacté à la compacité maximale. Les deux paramètres sont donnés par l'essai Proctor de la Figure 4-20.

Sollicitation	6/20/25 ^{**}	$\sigma_{t,ad}$	$\varepsilon_{z,ad}$
σ_t base (MPa)	0,71	0,68	-
ε_z fondation GNT (10^{-6})	69,5	-	500
ε_z sol support (10^{-6})	56	-	530

Tableau 5.3 : Caractéristiques de la chaussée contenant une couche à base de sédiment et de laitier

Ensuite, la planche expérimentale est munie d'un système de drainage comportant un géomembranes destiné à capter les métaux lourds et les sels dissous pendant l'écoulement d'eau. Un système de conduite permet de récupérer les eaux afin d'être analysées et suivies pour étudier sur le terrain le potentiel de largage de la chaussée. On détaille dans la Figure 5.9 le profil en travers de la chaussée dont la couche de base est composée exclusivement sédiments de dragage et de laitiers d'aciérie.

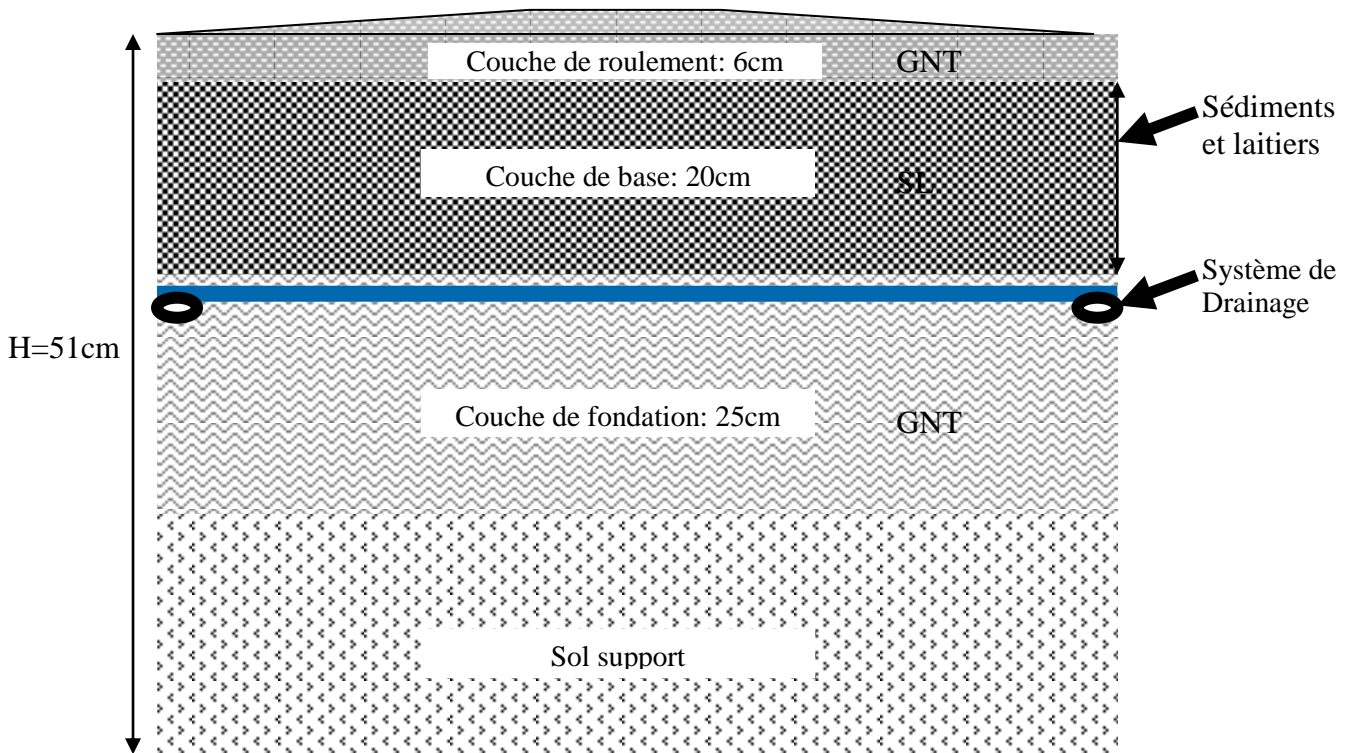


Figure 5.9 : Profil en travers de la chaussée

5.5 Coût de réalisation

Le coût des matières premières est de plus en plus important pour les travaux. Dans le cadre d'estimations d'une analyse économique du projet, il suffit de comparer le coût de la couche de base en termes de travaux entre une chaussée standard et le présent projet.

En effet, en supposant que les travaux de la chaussée souple sont comparables pour la formulation F1 avec des matériaux naturels, l'approvisionnement représente un avantage économique considérable.

Chaussée de largeur 7m	Matériaux (en t/km)	Coût matière première (en €)
Chaussée standard	6000	1 million
Chaussée à base de la formulation F1	4000	200000

Tableau 5.4 : Comparaison du coût de réalisation d'une couche d'assise à base de la formulation F1 avec une couche d'assise standard

Le Tableau 5.4, montre que le besoin en matériaux pour la couche d'assise à base de la formulation F1 est plus faible. Ceci revient à la masse volumique absolue important. Ainsi, on montre un avantage remarquable de point de vue économique pour la réalisation de travaux à base de sédiments de dragage et de laitiers d'aciérie.

5.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié une application de la méthode française de dimensionnement des chaussées pour le dimensionnement d'une chaussée utilisant une formulation à base de sédiments de dragage et de laitiers d'aciérie. L'épaisseur totale de la chaussée est de 51 cm. Bien que les sédiments de dragage soient des matériaux fins, ils permettent de réduire l'épaisseur globale des chaussées souples pouvant atteindre généralement 51 cm.

Pour une route ordinaire, on pourrait par conséquent employer dans une chaussée 1 tonne de chacun des matériaux utilisés par mètre de longueur de la route : sédiments de dragage et laitiers d'aciérie. L'introduction des sédiments dans une assise de chaussée présente une alternative qui permet de :

- Avoir un exutoire pour les quantités importantes générées de sédiments (50 millions de tonnes/an)
- La réalisation de travaux routiers plus économiques
- La conservation de matériaux naturels



CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET PERSPECTIVES

La présente étude a été réalisée dans le but de définir une méthodologie pour la gestion des sédiments de dragage en vue d'une valorisation en techniques routières. La démarche suivie se base sur quatre axes principaux :

- L'étude des sédiments à l'état brut afin d'appréhender les caractéristiques globales des sédiments. Ceci permettra de localiser les avantages et les limites de ces matériaux de point de vue performances mécaniques et impacts environnementaux.
- La préparation des sédiments à la valorisation afin d'optimiser le processus de traitement et de valorisation.
- Le développement de formulations à base de sédiments en les combinant à d'autres matériaux afin d'améliorer leur performances mécaniques pour répondre aux exigences en techniques routières.
- L'application des formulations réalisées sur une planche expérimentale pour étudier la faisabilité de ces formulations sur une plus grande échelle et leur compatibilité en termes de performances mécaniques (contraintes et déformations admissibles) et économiques (quantités de sédiments employées).

Une étude bibliographique sur l'état de l'art en termes de gestion de sédiments nous permis de définir les sédiments de dragage, leur origine et de discuter les gisements actuels ainsi que leurs constituants. Elle a permis également d'étudier le cadre législatif entourant la gestion actuelle des sédiments. Enfin, nous avons discuté les approches actuelles d'élimination et de gestion des sédiments. Cette première partie, comporte aussi une section sur les laitiers d'aciérie dans laquelle nous avons détaillé un synthèse bibliographie concernant ces matériaux. Ainsi, les types des laitiers, les propriétés physico-chimiques, le cadre législatif et les domaines d'utilisation ont été discutés.

La caractérisation des matériaux utilisés se compose en deux parties : la caractérisation des sédiments de dragage et la caractérisation des autres matériaux utilisés dans le cadre de développement d'un matériau routier.

Deux sédiments de dragage issus de deux prélèvements différents ont été étudiés. Les deux sédiments se caractérisent d'une teneur en eau très élevée. Ils se caractérisent par une distribution granulométrique dont les particules sont inférieures à 80 μ m. Ils contiennent un taux de teneur en matière organique qui varie entre 5 à 10%. Toutefois, les sédiments sont très variables en fonction du site prélèvement et du mode de dragage. Les deux sédiments, nommés S1 et S2, sont plus ou moins différents en termes de caractéristiques physico-chimiques. Le sédiment S1 possède une teneur en eau plus importante de l'ordre de 200% tandis que pour le sédiment S2, sa teneur en eau est de l'ordre de 100% environ. La matière organique mesurée dans le sédiment S1 est plus importante. Enfin, les sédiments S1 possèdent une limite de liquidité et une limite de plasticité plus importantes que celles obtenues sur les sédiments S2.

D'une manière générale, les sédiments étudiés se caractérisent par des performances mécaniques faibles par rapport à une utilisation en couches routières. La caractérisation environnementale a permis de vérifier le caractère peu pollué pour le sédiment S1 et pollué pour le sédiment S2. Toutefois l'analyse des éluats obtenus par essai de lixiviation réalisé sur les sédiments conformément à la norme NF EN 12457-2, a révélé un taux important en chlorures ainsi que la présence d'une concentration élevée de quelques métaux à savoir le molybdène (Mo) et le baryum (Ba). Par conséquent, un suivi environnemental pendant la durée de séchage est nécessaire pour suivre le potentiel de pollution dans les sédiments.

L'étude du séchage des sédiments a permis de connaître l'efficacité des différents types du séchage utilisés. Le séchage par évaporation dépend essentiellement des conditions environnementales (température et humidité) dans lesquelles les sédiments sont exposés. Il dépend également de la manière d'exposition. Il est important d'augmenter la surface exposée pour améliorer le potentiel d'évaporation des sédiments. La cinétique du potentiel de séchage par évaporation, qui exprime la quantité d'eau évaporée par unité de surface est constante et ne dépend pas du diamètre utilisé.

Le séchage par drainage dépend essentiellement de la nature du matériau. Pour les sédiments ce mode de séchage est efficace à court terme. Après d'une diminution rapide de la teneur en eau jusqu'à la limite de liquidité, une stabilisation est remarquée. Pour cela, une combinaison du séchage par évaporation et par drainage peut être nécessaire.

La combinaison des deux phénomènes par évaporation et par drainage permet d'accélérer l'opération du séchage des sédiments. En plus, le séchage par drainage permet l'évacuation éventuellement de polluants contenus dans les sédiments.

La concentration en chlorures diminue durant le séchage. Par ailleurs, le suivi environnemental a montré une stabilité en termes de concentration de métaux, initialement faibles, dans les sédiments ainsi que pour les sulfates.

Cette stabilité permet une utilisation des sédiments en assise de chaussée et ne devrait pas poser un problème de rejet de polluants pendant la durée de vie de la route.

Les traitements aux liants hydrauliques et à la chaux ont montré une différence entre l'action du ciment et la chaux. Pour le traitement au ciment on remarque un développement de la portance à court terme avec une baisse de la densité et de la teneur en eau optimale. L'action de la chaux en termes de portance immédiate est faible.

Pour les traitements réalisés, nous avons choisi de limiter le pourcentage des liants utilisés. Cependant, ceci ne permet pas d'atteindre les exigences mécaniques nécessaires pour une utilisation en technique routière. Pour cela, un mélange granulaire réalisé à base de sédiments de dragage et de laitiers a été entrepris.

Les laitiers sont des matériaux issus d'un processus thermique et contiennent un taux de chaux de l'ordre de 10% environ. Ceci permettra de stabiliser les sédiments sans ajout de liants supplémentaires. Les formulations réalisées à partir du mélange de sédiments avec deux types de laitiers ont permis de développer des matériaux susceptibles de répondre aux performances nécessaires pour les travaux routiers. L'action entre la chaux et les sédiments a permis de diminuer le potentiel d'expansion des laitiers. Le choix des pourcentages a été optimisé en fonction des exigences mécaniques et de la durabilité de l'ouvrage. L'introduction

de la quantité maximale des sédiments permet de limiter le coût de la matière première en respectant des conditions mécaniques exigées.

La dernière partie de ce travail s'intéresse au dimensionnement d'une planche expérimentale dont la couche de base est constituée exclusivement des matériaux formulés à base de sédiments et de laitiers d'aciérie. Les résultats obtenus montrent une validation des contraintes et déformations admissibles dans la couche dimensionnée à partir des matériaux développés.

A partir de ce travail nous avons défini une démarche expérimentale pour le prétraitement, le traitement et la valorisation des sédiments de dragage. Mais à ce stade, d'autres débouchés s'ouvrent. Les principales perspectives qui découlent de ce travail et à partir de ce stade sont :

- L'exploration de la phase du séchage a permis d'avoir un regard sur l'évolution du séchage en fonction de plusieurs paramètres. Il serait important de modéliser le processus du séchage en fonction des paramètres étudiés.
- Les mélanges ont été réalisés après égouttage des sédiments, afin d'accélérer le séchage et l'évacuation des chlorures, il serait intéressant de réaliser une application des formulations avant le séchage.
- L'analyse minéralogique des formulations développées a permis d'observer une faible activation de la chaux contenue dans les laitiers, il apparaît intéressant de comparer les formulations réalisées avec et sans ajout de liants. L'ajout de liant pourra ainsi activer la réaction pozzolanique de la chaux contenue dans les laitiers.
- La réalisation d'un pilote expérimental pour le suivi environnemental *in situ* permettra de modéliser la réalité du terrain.



RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES



RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AEAP, 2005**, Agence de l'eau Artois-Picardie, Conférence professionnelle AEAP, 2005.
- Agostini F., 2006** Inertage et valorisation des sédiments de dragage marins. Thèse de doctorat, 2006, USTL, 215p.
- Agostini F., Skoczylas F., LAFHAJ Z., 2007**, About a possible valorisation in cementitious materials of polluted sediments after treatment, Cement and concrete composite, 26(2007), pp 270-278
- Alzieu C, 1999** dragages et environnement marin : Etat des connaissances, Ifremer, 223p, 1999.
- Asdrubali F. 2006**, A scale model to evaluate water evaporation from indoor swimming pools, Energy and Buildings vol. 41, 311–319
- Aydin M. Sheng L-Y, Nurten K., Tomohisa Y., 2005**, Test of a simple model for estimating evaporation from bare soils in different environments, Ecological Modelling vol. 182, pp 91–105.
- Benson Jr, Ronald E., Benjamin L., 1987**, The use of integral methods in solving partial differential equations -- I. drying of very moist soil, Mathematical Modelling, vol. 8, pp: 344-347
- Boucard L., 2006**, «Valorisation des sédiments fluviaux stabilisés », Thèse de doctorat, 2006, USTL-Ecole centrale de Lille, 189p.
- Bournonville B., Coussot P. et Château X., 2005**, Modification du modèle de Farris pour la prise en compte des interactions géométriques d'un mélange poly disperse de particules, Rhéologie, Vol. 7, 1-8 (2005)
- Boutouil M. et Rekik B., 2006**, «Etude de la compressibilité et de la microstructure d'un sédiment de dragage traité au liant hydraulique », IXème Journées Nationales Génie Civil-Génie côtier, 12-14 septembre 2006, Brest, France.
- Boutouil M., 1998**, Traitement des vases de dragage par solidification/Stabilisation à base de ciment et additifs, thèse de doctorat, Université du Havre, 1998.
- Brakni S., 2008**, Première approche vers une valorisation de granulats artificiels à base de sédiments de dragage portuaire : application en génie côtier, Université d'Artois-Ecole des Mines de Douai, 2008, 182p.
- Cabane N., 2004**, Sols traités à la chaux et aux liants hydrauliques: Contribution à l'identification et à l'analyse des éléments perturbateurs de la stabilisation, thèse de doctorat, 2004, Ecoles des Mines de St Etienne, 189p.

- CED 2000**, Catalogue Européen des Déchets – Décision de la Commission Européenne n°2000/532/CE du 3 Mai 2000 modifiée- Suivant le décret n°2002-540 du 18 Avril 2002 relatif à la classification des déchets Code de l'Environnement, partie réglementaire, Livre V, Titre IV, Chapitre 17 section 17 05.
- CNUCED, 2007**, Conférence des Nations Unies sur le commerce et le développement, <http://www.unctad.org> (consulté le 01/2009)
- Colin D., 2003**, Valorisation de sédiments fins de dragage en technique routière, thèse de doctorat, Université de Caen, 2003.
- De Larrard F., 2000**, Structures granulaires et formulation des bétons. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Ouvrages d'art OA 34, avril 2000.
- Defoux J., 2006**, Aspects réglementaires des boues en région wallonne, Débat sur la gestion stratégique de la valorisation des boues de dragage et de, Office Wallon des Déchets – DGRNE-Université Libre de Bruxelles, 2006
- Dongmo B.J., 2005**, « Caractérisations des déformations d'orniérage des chaussées bitumineuses » Thèse de doctorat, INAS de Lyon, 2005, 255p.
- Duan Z., 2008**, Caractérisation, stabilisation et solidification de sédiments fins marins, Thèse de doctorat, Université de Caen, 144p.
- Dubois V., 2006** «Etude du comportement physico-mécanique et caractérisation environnementale des sédiments marins – Valorisation en technique routière ». Thèse de doctorat, 2006 ENSM de Douai- Université d'Artois, 189p.
- Dubois V., Abriak N-E., Zentar R., Ballivy G., 2008**, The use of marine sediments as a pavement base material, Waste Management, 2008.
- Duchaufour P., 1983**, Pédologie - 1 : pédogenèse et classification, Masson – 1983, 491p.
- Fent K., 2004**, Ecotoxicological effects at contaminated sites, Toxicology 205 (2004) 223–240,
- Geffard O., 2001**, « Toxicité potentielle des sédiments marins et estuaires contaminés: Evaluation chimique et biologique, biodisponibilité des contaminants sédimentaires ». Thèse de doctorat, 2001 Universités de Bordeaux I, 376p.
- Hamer K. et Volker K., 2002**, Brick production with dredged harbour sediments. An industrial-scale experiment, Waste Management, Vol. 22 (2002) pp521–530.
- IFREMER, 2008**, Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer, sur www.ifremer.fr, (consulté le 18/01/2008).
- Kribi S., 2005**, « Décomposition des matières organiques et stabilisation des métaux lourds dans les sédiments de dragage ». Thèse de doctorat, 2005, INSA de Lyon, 220p

- Lafhaj Z., Samara M., Agostini F., Boucard L., Skoczylas F., Depelsenaire G., 2007**, Polluted river sediments from the North region of France: Treatment with Novosol process and valorization in clay bricks, *Construction and Building Materials*, 2007.
- LIFE, 2008**, Méthode de gestion et de réutilisation des sédiments pollués, projet d'étude européen LIFE par des organismes publics français, néerlandais et belges, 2002, Agence de l'eau Artois Picardie, sur <http://eau-artois-picardie.fr> , (consulté le 01/02/2008).
- Marot F. 1997**, "Caractérisation et traitement de sédiments de dragage contenant des polluants métalliques". Thèse de doctorat, Université du Havre, 184p.
- Mustin M., 1987**, "Le compost", Editions François Dubusc, ISBN 2 864 72008 6, 954 p.
- OIE 2006**, Office International de l'eau, déshydratation des boues, <http://www.oieau.fr/> (consulté le 08/2008).
- Ollivier J.P. et Vichit A. 2008**, La durabilité des bétons, Presses de l'Ecole nationale des ponts et chaussées, 2008.
- Page A. L., Millier R. H., Keeney D.R., 2005**, Methods of Soil Analysis, Part 2 : Chemical and Microbiological Properties, American Society of Agronomy Inc - 1992
- Paul J., 2005**, Dragages Maritimes, le Groupe GEODE-LCPC, 2005.
- Penman H.L., 1948**, Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Roy. Soc. London A*(194), 120-145
- Ramade F., 2002**, Dictionnaire encyclopédique de l'écologie et des sciences de l'environnement, Dunod - 2002
- Recywal, 2008**, Groupement d'Intérêt Economique, sur <http://www.recywall.be/> (consulté le 01/04/2008).
- Rekik B., 2006**, Propriétés géotechniques des sédiments de dragage traités au ciment, thèse de doctorat, 2006, Université de Caen.
- Rey F., Levacher D., Quénech J-L, 2000**, La valorisation par SIS à base de chaux et additifs de vases de dragage: résultats et perspectives, VIème Journées Nationales Génie Civil- Génie Côtier, Caen, France, 17-19 Mai 2000.
- Rio S., Verwilghen C., Ramaroson J., Nzihou A., et Sharrock P., 2007**, Heavy metal vaporization and abatement during thermal treatment of modified wastes, *J. Hazard. Mat.* 148 (2007) 521–528.
- Rohwer C, 1934**, Evaporation from different types of pans. *Transactions A. S. C. E.*, vol. 99, p. 673

-
- Schneider G., 2008**, Le curage des sédiments des cours d'eau, 2008, INRA-ME&S, Agence de l'eau Artois Picardie, sur <http://www.eau-artois-picardie.fr> , (consulté le 10/01/2008).
- Tao-Wei F., Jia-Yih L., Yi-Jiuan L., 2001**, Consolidation behavior of a soft mud treated with small cement content, *Engineering Geology* Vol.59 (2001) 327-33.
- Tran N-T., 2009**, « Valorisation des sédiments marins et fluviaux pollués en technique routière », Rapport de 1ère année de thèse, 2006 ENSM de Douai-Université d'Artois, 184p.
- UNPG, 2007**. Carrières et développement durable. Union Nationale des Producteurs de Granulats. Report, p. 75
- Van Passen L., Gareau L. F., 2004**, Effect of Pore Fluid Salinity on compressibility and Shear Strength Development of Clayey Soils, *Lecture Notes in Earth Sciences* Vol.104 (2004), pp. 327-340.
- Venuat M., 1980**, Le traitement des sols à la chaux et au ciment, (édité par l'auteur) 1980.
- Waligora J., Bulteel D., Degrugilliers P., Damidot D., Potdevin J.L., Measson M., 2010**, Chemical and mineralogical characterizations of LD converter steel slags: A multi-analytical techniques approach, *Materials characterization*, 61(2010), PP 39-48.
- Zentar R., Abriak N.-E., Dubois V., 2008**, Effects of salts and organic matter on Atterberg limits of dredged marine sediments, *Applied Clay Science*, 2008
- Zentar R., Dubois V., Abriak N.-E., 2008**, Mechanical behaviour and environmental impacts of a test road built with marine dredged sediments, *Resources, Conservation and Recycling*, 52 (2008) 947–954.

NORMES UTILISÉES

NF EN 12457-2. Décembre 2002. Caractérisation des déchets. Lixiviation. Essai de conformité pour la lixiviation des déchets fragmentés et des boues. Partie 2 : essai en bâchée unique avec un rapport liquide - solide de 10l/kg et une granularité inférieure à 4mm (sans ou avec réduction de la granularité).

NF P 98-114-3. Avril 2001. Assises de chaussées. Méthodologie d'étude en laboratoire des matériaux traités aux liants hydrauliques. Partie 3 : Sols traités aux liants hydrauliques éventuellement associés à la chaux.

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

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

NF ISO 14235. Septembre 1998. Qualité du sol. Dosage du carbone organique par oxydation sulfochromique.

NF P 94-040. Octobre 1993. Sols : reconnaissance et essais – Méthode simplifiée d'identification de la fraction 0/50 mm d'un matériau grenu – Détermination de la granulométrie et de la valeur au bleu.

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

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

NF P 94-052-1. Novembre 1995. Sols : reconnaissance et essais. Détermination des limites d'Atterberg – Partie 1 : limite de liquidité – Méthode du cône de pénétration.

NF P 94-057. Mai 1992. Sols : reconnaissance et essais – analyse granulométrique des sols – méthode par sédimentation.

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

NF P 94-078. Décembre 1992. Indice CBR après immersion, indice CBR immédiat, indice portant immédiat, mesure sur échantillon compacté dans le moule CBR.

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

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

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

NF P 98-114-2. Novembre 1994. Assises de chaussées. Méthodologie d'étude en laboratoire des matériaux traités aux liants hydrauliques. Partie 2 : Sables traités aux liants hydrauliques.

NF P 98-230-2. Août 1993. Préparation des matériaux traités aux liants hydrauliques ou non traités. Fabrication des éprouvettes de sable ou de sols fins par compression statique.

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

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

NF P-94-072. Septembre 1995. Sols : reconnaissance et essais. Essai scissométrique en laboratoire.

LISTE DES PUBLICATIONS DES TRAVAUX DE RECHERCHE SUR LE SUJET DE THÈSE

Articles dans revues avec comité de lecture

Zentar R., Abriak N-E., Dubois V., Miraoui M., Beneficial use of dredged sediments in public works, *Environmental Technology*, Vol 30, N°8, pp 841-847, juillet 2009

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

Abriak N-E, Miraoui M., Zentar R., Méthodologie de valorisation des sédiments de dragage en technique routière, Conférence Internationale sur la Valorisation des Déchets et de la Biomasse Résiduelle dans les Pays en Développement, OUAGADOUGOU (Burkina Faso), 09-11 juillet 2009, CD-ROM

Abriak N-E, Miraoui M., Zentar R., Making of a road material with dredged sediment treated with industrial co-products, 3rd Engineering Conference on Advancement in Mechanical and Manufacturing for Sustainable Environment, April 14-16, 2010, Kuching, Sarawak, Malaysia

Abriak N-E., Damidot D. Zentar R., Miraoui M., Recent advances on sediments management, the Fourth World Congress on Maintenance, HAINAN (Chine), November 24-26th 2008, pp 127

Miraoui M., Abriak N-E, Zentar R., Confection d'un matériau routier à base de sédiments de dragages mélangés aux matériaux granulaires, 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries (SBEIDCO), ORAN (Algérie), 12-14 octobre 2009, CD-ROM

Miraoui M., Abriak N-E, Zentar R., Matériau routier à base de sédiment de dragage, XXVIIème Rencontres Universitaires de Génie Civil - Génie Civil et Développement Durable, SAINT-MALO, 03-05 JUIN 2009, pp 1-13

Miraoui M., Zentar R., Abriak N-E, Implementation of a new method of formulation for road base layer by the use of packing density model, Third Euro Mediterranean Symposium on Advances in Geomaterials and Structures, Djerba Tunisia 10-12 May 2010.

Miraoui M., Zentar R., Abriak N-E, Making of a road material with a dredged sediment treated with hydraulic binders, 3rd International Symposium TREMTI Treatment and

Recycling of Materials for Transports Infrastructure Using lime, cement and hydraulic road binders) November 11-13th 2009-ANTIGUA (Guatemala)

Miraoui M., Zentar R., Abriak N-E, Mise en œuvre d'une méthodologie pour la valorisation des sédiments de dragage maritime, Conférence Méditerranéenne Côtière et Maritime, Hammamet (TUNISIE), 02 au 04 décembre 2009, Vol PROCEEDING

Zentar R. Abriak N-E., Tran N-T, Miraoui M., Evaluation of the performances of developed road material including dredged silty materials, 2nd International Conference on Engineering for Waste Valorisation, PATRAS (GRECE), 3-5 juin 2008, pp 72-80, ISBN: 978-960-530-101-9

Zentar R., Abriak N-E, Miraoui M., Preparation of sediments for valorisation : dehydration and drying, mechanical and chemical separation Water content reduction of dredged sludge, First international Conference on Recycling and Reuse of Materials (Polymers, Wood, Leather, Water, Glass, metals, Ceramics, Semi Conductors etc) and their Products (ICRM-2009), KOTTAYAM, KERALA (Inde), 17-19 juillet 2009, CD-ROM

ANNEXES



ANNEXE 1

Evaporation de l'eau de mer

Temps (jours)	Diamètre (mm)	
	70	110
0,00	530,18	403,72
0,83	528,44	399,19
1,83	526,45	391,54
4,58	520,84	372,59
4,75	520,52	371,57
5,63	518,68	365,61
6,02	517,86	363,06
6,85	516,14	357,83
7,65	514,32	352,01
8,63	512,35	346,01
8,96	511,68	343,85
11,58	507,18	329,01
12,63	505,18	322,46
12,90	504,67	320,86
13,98	502,46	313,20
14,83	501,18	309,78
15,63	500,22	306,84
16,00	499,41	303,37
19,63	492,57	279,58
20,92	489,75	269,62
21,67	487,92	263,57
22,83	485,61	256,44
25,63	481,51	243,75
26,73	479,95	239,24
29,65	474,66	222,71
32,71	468,95	206,37
34,97	463,32	191,06
35,71	461,74	188,20
39,98	452,08	171,42
49,88	429,37	165,50
75,71	371,83	164,07

Variation de masse de l'eau de mer durant l'évaporation

Effet du type de sédiments sur le séchage par évaporation

Temps (jrs)/masse	Masse (g)			
	E1	E2	E3	Moyenne
Tare	186,88	225,68	227,29	213,28
0,00	518,22	730,36	753,14	667,24
0,15	518,08	730,07	752,96	667,04
0,90	517,25	728,73	751,75	665,91
1,15	516,99	728,41	751,45	665,62
1,73	516,45	727,79	750,83	665,02
2,04	516,17	727,40	750,43	664,67
2,15	516,06	727,22	750,27	664,52
4,81	513,67	724,12	747,16	661,65
5,15	513,40	723,72	746,74	661,29
5,85	512,75	722,85	745,88	660,49
6,85	511,95	721,45	744,43	659,28
16,04	500,16	705,79	728,02	644,66
18,81	497,08	701,54	723,43	640,68
19,79	496,27	700,36	722,16	639,60
21,08	494,89	698,45	720,06	637,80
22,98	493,38	695,97	719,27	636,21
27,85	488,03	688,55	709,91	628,83
32,77	482,96	681,62	703,04	622,54
40,10	474,90	671,21	692,93	613,01
48,02	465,92	657,53	679,60	601,02
56,77	454,20	641,73	664,43	586,79
70,77	443,91	622,71	644,98	570,53
99,81	376,00	584,80	610,00	523,60
148,02	374,73	517,84	538,70	477,09

Variation de masse de l'eau dans les sédiments S1-70 durant l'évaporation

Temps (jours)	Masse (g)			
	E1	E2	E3	Moyenne
Tare	177,61	155,67	151,05	161,44
0,00	2016,86	2006,09	1963,00	1995,32
0,15	1947,76	2006,09	1899,10	1950,98
0,90	1864,87	2006,09	1821,40	1897,45
1,15	1845,86	1936,80	1803,88	1862,18
1,73	1808,19	1863,11	1769,14	1813,48
2,04	1791,28	1838,59	1753,07	1794,31
2,15	1785,26	1830,36	1747,59	1787,74
4,81	1652,00	1698,72	1633,70	1661,47
5,15	1642,13	1686,30	1622,92	1650,45
5,85	1623,15	1661,12	1601,26	1628,51
6,85	1603,91	1632,34	1577,13	1604,46
16,04	1518,78	1532,15	1490,51	1513,81
18,81	1498,66	1512,47	1468,57	1493,23
19,79	1492,86	1507,23	1463,68	1487,92
21,08	1484,75	1499,44	1455,21	1479,80
22,98	1471,81	1488,19	1444,11	1468,04
27,85	1443,78	1460,41	1414,28	1439,49
32,77	1416,15	1434,66	1385,50	1412,10
40,10	1369,35	1392,70	1343,35	1368,47
48,02	1317,41	1341,11	1285,61	1314,71
56,77	1261,63	1288,82	1232,58	1261,01
70,77	1195,05	1221,82	1158,69	1191,85
98,98	1051,90	1091,91	998,33	1047,38
148,02	896,78	918,33	856,91	890,67
228,81	847,87	835,39	811,49	831,58

Variation de masse de l'eau dans les sédiments S1-7110 durant l'évaporation

Temps (jours)	Masse (g)			Moyenne
	E1	E2	E3	
Tare	1270,87	1345,86	1359,23	1325,32
0,00	1930,27	2010,68	2045,61	1995,52
0,90	1906,44	1990,20	2026,18	1974,27
1,73	1894,61	1979,30	2017,08	1963,66
2,02	1892,31	1975,94	2012,18	1960,14
2,90	1884,19	1967,45	2004,16	1951,93
3,06	1882,69	1966,05	2002,21	1950,32
5,69	1865,49	1949,76	1987,17	1934,14
6,02	1863,49	1948,47	1985,32	1932,43
6,98	1860,07	1945,30	1982,62	1929,33
7,88	1857,05	1942,45	1979,45	1926,32
8,73	1854,64	1940,31	1977,22	1924,06
8,98	1853,83	1929,05	1976,20	1919,69
12,69	1843,68	1929,13	1966,70	1913,17
13,00	1843,01	1928,57	1959,53	1910,37
13,71	1841,19	1926,85	1957,78	1908,61
14,77	1838,70	1924,51	1955,40	1906,20
15,04	1838,02	1923,91	1954,84	1905,59
15,79	1836,22	1922,14	1953,99	1904,12
16,04	1835,61	1921,65	1952,40	1903,22
16,79	1833,85	1919,90	1950,64	1901,46
17,02	1833,26	1919,36	1950,06	1900,89
19,63	1827,71	1914,25	1944,64	1895,53
20,94	1824,72	1911,40	1941,94	1892,69
22,00	1822,64	1909,41	1939,75	1890,60
23,04	1820,29	1907,23	1937,66	1888,39
24,04	1818,13	1905,33	1935,57	1886,34
28,02	1809,04	1896,82	1927,31	1877,72
34,06	1796,45	1884,18	1914,63	1865,09
37,02	1790,84	1878,96	1909,47	1859,76
41,71	1783,09	1871,26	1901,42	1851,92
49,04	1772,95	1861,08	1895,50	1843,18
58,92	1758,89	1846,97	1877,44	1827,77
69,69	1743,11	1830,77	1861,52	1811,80
86,96	1719,87	1805,71	1835,48	1787,02
103,73	1706,51	1790,92	1819,73	1772,39
127,88	1687,74	1770,87	1798,51	1752,37

Variation de masse de l'eau dans les sédiments S2-70 durant l'évaporation

Temps (jours)	Masse (g)			Moyenne
	E1	E2	E3	
Tare	155,76	155,68	155,70	155,71
0,00	2309,94	2319,23	2311,72	2313,63
7,50	2276,07	2295,80	2275,87	2282,58
30,50	2235,17	2172,56	2227,66	2211,80
52,50	2208,42	2156,39	2195,87	2186,89
73,00	2186,25	2141,32	2172,27	2166,61
79,00	2179,71	2137,09	2165,62	2160,81
168,00	2107,66	2085,88	2095,66	2096,40
175,50	2103,48	2083,22	2091,47	2092,72
192,50	2093,88	2076,13	2081,99	2084,00
218,00	2081,92	2066,68	2070,89	2073,16
224,50	2078,69	2064,27	2067,69	2070,22
242,50	2069,88	2056,31	2059,37	2061,85
248,50	2067,17	2054,00	2056,75	2059,31
266,50	2060,02	2047,12	2049,47	2052,20
272,00	2057,92	2044,97	2047,28	2050,06
334,50	2036,00	2022,02	2027,98	2028,67
366,00	2026,61	2012,09	2018,94	2019,21
391,50	2018,19	2004,27	2011,27	2011,24
416,50	2010,18	1996,46	2004,69	2003,78
440,50	2002,96	1989,00	1997,78	1996,58
536,00	1971,15	1958,97	1968,44	1966,19
681,00	1928,72	1915,81	1926,20	1923,58
752,00	1907,56	1895,70	1906,30	1903,19
864,50	1877,33	1865,94	1875,02	1872,76
1040,50	1839,87	1830,26	1837,32	1835,82
1277,50	1792,57	1782,35	1786,44	1787,12
1536,00	1729,57	1722,76	1730,23	1727,52
1944,00	1643,05	1635,09	1637,64	1638,59
2353,00	1593,50	1590,29	1588,56	1590,78
2932,50	1524,43	1521,83	1517,45	1521,24

Variation de masse de l'eau dans les sédiments S2-110 durant l'évaporation

Effet du drainage sur le diamètre exposé

Temps (jours)	Masse (g)		
	E1	E2	E3
Tare	1347,94	1462,68	1206,58
0,00	1978,45	2073,78	1854,63
0,77	1961,04	2057,09	1826,85
1,81	1945,08	2041,41	1808,82
4,73	1919,23	2015,89	1781,50
5,04	1916,90	2013,44	1779,03
5,75	1912,01	2008,65	1773,81
6,73	1905,72	2002,45	1767,40
7,83	1899,69	1996,71	1760,99
8,02	1898,93	1995,97	1760,01
8,79	1895,80	1992,77	1756,66
12,02	1888,29	1984,69	1747,34
12,81	1887,34	1984,28	1746,41
13,77	1886,33	1983,49	1745,05
14,77	1885,51	1983,11	1744,20
16,10	1884,69	1982,58	1743,01
18,73	1883,14	1981,52	1741,17
20,79	1882,55	1980,90	1740,08
22,98	1881,76	1980,18	1738,73
25,73	1880,78	1978,84	1737,19
27,10	1880,00	1977,76	1735,88
34,00	1876,18	1973,13	1731,02
39,75	1875,67	1972,27	1729,19
42,81	1875,51	1972,09	1728,59
50,77	1874,91	1971,48	1727,29
59,02	1874,41	1970,84	1725,89
84,98	1873,32	1969,42	1723,75
96,73	1872,84	1968,89	1722,70

Variation de masse de l'eau dans les sédiments S1-70 durant le drainage

Temps (jours)	Masse (g)		
	E1	E2	E3
Tare	159,05	154,42	154,17
0,00	2023,42	2046,08	1984,54
0,13	1990,82	2017,66	1951,03
0,71	1930,14	1937,67	1894,58
1,02	1909,97	1912,87	1874,43
1,13	1903,97	1904,87	1867,34
3,79	1782,18	1777,13	1749,73
4,13	1769,96	1764,73	1738,62
4,83	1742,17	1738,96	1713,45
5,83	1709,62	1710,27	1682,85
15,02	1597,88	1622,60	1583,54
17,79	1589,77	1614,89	1575,96
18,77	1588,21	1613,30	1574,51
20,06	1585,46	1610,68	1572,15
21,96	1582,10	1607,97	1569,28
26,83	1576,08	1604,17	1563,80
31,75	1570,52	1599,45	1558,78
39,08	1562,78	1593,79	1552,52
47,00	1554,21	1587,26	1545,55
55,75	1547,12	1581,83	1538,71
69,75	1536,95	1573,89	1529,35
96,96	1516,79	1556,72	1512,40
147,00	1471,93	1524,96	1475,64
227,79	1365,10	1428,22	1377,05

Variation de masse sédiments S1-110 durant le drainage

Effet des traitements à la chaux sur le séchage par évaporation

Jours	Masse (g)			
	E1	E2	E3	Moyenne
Tare	1271,41	1346,02	1360,04	1325,82
0,00	1887,13	1973,00	1976,52	1945,55
2,73	1852,71	1920,00	1924,23	1898,98
3,71	1847,24	1915,08	1919,96	1894,09
4,77	1842,09	1911,25	1915,89	1889,74
6,98	1831,37	1902,88	1907,01	1880,42
9,67	1819,56	1893,13	1896,36	1869,68
9,98	1818,37	1892,02	1895,24	1868,54
10,75	1815,39	1889,36	1892,38	1865,71
10,88	1814,99	1889,03	1891,97	1865,33
11,67	1812,00	1886,31	1888,89	1862,40
12,00	1810,85	1885,30	1887,89	1861,35
13,71	1804,80	1879,64	1881,59	1855,34
16,67	1794,19	1869,96	1871,35	1845,17
16,98	1793,13	1868,87	1870,18	1844,06
17,71	1790,71	1866,67	1867,71	1841,70
18,71	1787,73	1863,57	1864,36	1838,55
24,94	1770,12	1846,87	1846,87	1821,29
33,75	1747,44	1823,86	1822,58	1797,96
40,00	1728,38	1805,22	1804,37	1779,32
47,96	1716,61	1792,52	1791,74	1766,96
60,71	1691,49	1768,38	1767,82	1742,56
64,67	1684,20	1760,91	1760,15	1735,09
73,69	1671,88	1748,80	1748,46	1723,05
82,69	1659,91	1737,05	1736,27	1711,08
96,65	1641,76	1719,93	1718,03	1693,24
105,00	1631,85	1710,48	1707,54	1683,29

Variation de masse sédiments C3-110 durant le drainage et évaporation

Jours	Masse (g)		
	E2	E3	Moyenne
Tare	156,02	156,02	156,02
0,00	2137,46	2183,38	2160,42
1,02	2063,16	2042,71	2052,94
3,23	1988,63	1966,47	1977,55
5,92	1945,38	1918,69	1932,04
6,23	1941,10	1914,17	1927,64
7,00	1931,51	1902,62	1917,07
7,13	1930,13	1900,97	1915,55
7,92	1919,76	1888,64	1904,20
8,25	1915,94	1884,47	1900,21
9,96	1894,26	1858,94	1876,60
12,92	1857,01	1815,52	1836,27
13,23	1853,34	1811,32	1832,33
13,96	1844,56	1801,68	1823,12
14,96	1833,38	1788,66	1811,02
21,19	1768,50	1720,00	1744,25
30,00	1685,56	1630,66	1658,11
36,25	1618,67	1565,60	1592,14
44,21	1572,43	1520,92	1546,68
56,96	1479,27	1429,44	1454,36
60,92	1447,59	1403,49	1425,54
69,94	1398,10	1361,33	1379,72
78,94	1346,41	1320,01	1333,21
92,90	1276,71	1261,04	1268,88
101,25	1234,52	1225,07	1229,80
118,23	1180,01	1183,20	1181,61

Variation de masse sédiments C3-110 durant le drainage et évaporation

Jours	Masse (g)		
	E1	E2	Moyenne
Tare	1346,75	1360,75	1353,75
0,00	1980,88	1970,97	1975,925
0,94	1957,02	1931,02	1944,02
1,98	1952,81	1925,17	1938,99
2,98	1949,03	1920,78	1934,905
4,31	1943,9	1915,04	1929,47
6,94	1933,81	1903,9	1918,855
9,00	1926,85	1896,12	1911,485
11,19	1918,88	1887,76	1903,32
13,94	1908,49	1876,86	1892,675
15,31	1903,96	1872,4	1888,18
22,21	1881,84	1851,42	1866,63
27,96	1864,94	1835,48	1850,21
31,02	1857,28	1828,19	1842,735
38,98	1837,34	1809,71	1823,525

50,23	1812,62	1787,78	1800,2
73,19	1771,17	1752,44	1761,805
84,94	1754,28	1738,1	1746,19

Variation de masse sédiments C6-70 durant le drainage et évaporation

Jours	Masse (g)			Moyenne
	E1	E2	E3	
Tare	155,7	147,87	155,61	153,06
0,00	1985,79	1943,85	2042,91	1990,85
0,94	1896,18	1860,08	1923,11	1893,12
1,98	1880,96	1844,44	1905,91	1877,10
2,98	1867,38	1830,75	1891,28	1863,14
4,31	1850,66	1813,33	1873,52	1845,84
6,94	1817,74	1781,52	1839,46	1812,91
9,00	1793,51	1757,97	1815,83	1789,10
11,19	1769,53	1734,02	1791,25	1764,93
13,94	1737,56	1705,31	1762,63	1735,17
15,31	1724,04	1692,44	1749,54	1722,01
22,21	1655,55	1628,67	1686,02	1656,75
27,96	1602,89	1578,04	1632,46	1604,46
31,02	1578,51	1553,93	1607,85	1580,10
38,98	1517,57	1493,25	1542,50	1517,77
50,23	1439,71	1417,97	1463,03	1440,24
73,19	1318,63	1298,35	1326,51	1314,50
84,94	1271,05	1247,16	1276,14	1264,78

Variation de masse sédiments C6-110 durant le drainage et évaporation

Suivi du potentiel de pollution en fonction du séchage

Temps d'exposition 1 (jours)		15						
Etat initial	blanc	E1	E2	E3	blanc	E1	E2	E3
As	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50
Ba	< 10	39	40	41	< 10	51	36	34
Cd	< 4	< 4	< 4	< 4	< 4	< 4	< 4	< 4
Cr	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
Cu	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50
Mo	< 50	95	95	92	< 50	111	121	126
Ni	< 40	< 40	< 40	< 40	< 40	< 40	< 40	< 40
Pb	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50
Sb	< 4	< 4	< 4	< 4	< 4	< 4	< 4	< 4
Se	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	12
Zn	< 10	52	24	25	< 10	< 10	< 10	< 10

Temps d'exposition 30		45						
Etat initial	blanc	E1	E2	E3	blanc	E1	E2	E3
As	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50
Ba	< 10	37	52	37	< 10	< 10	< 10	< 10
Cd	< 4	< 4	< 4	< 4	< 4	< 4	< 4	< 4
Cr	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
Cu	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50
Mo	< 50	130	109	133	< 50	< 50	< 50	< 50
Ni	< 40	< 40	< 40	< 40	< 40	< 40	< 40	< 40
Pb	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50
Sb	< 4	< 4	< 4	< 4	< 4	< 4	< 4	< 4
Se	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
Zn	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10

Concentration en ppb pour une lixiviation avec un rapport L/S=10

ANNEXE 2

Compacité par le modèle d'empilement compressible

Calibrations des modèles

Proportions des fines (%)	Valeurs mesurées (%)	Valeurs prédites (%)
0	55,26	55,26
5	57,98	57,23
15	61,94	61,49
25	67,17	65,92
35	68,69	69,04
45	66,21	68,19
55	67,01	65,14
65	62,65	61,79
75	59,27	58,60
85	55,90	55,66
95	53,15	52,98
100	51,72	51,72

Valeurs pour mélanges sédiments avec des sables du Boulonnais

Proportions des fines (%)	Valeurs mesurées (%)	Valeurs prédites (%)
0	56,09	56,09
5	56,61	56,50
15	56,96	57,30
25	57,70	58,02
35	58,18	58,52
45	58,53	58,53
55	57,37	57,78
65	56,99	56,47
75	55,74	54,95
85	54,02	53,39
95	53,14	51,86
100	51,12	51,12

Valeurs pour mélanges sédiments avec des sables de dragage

Applications sur les sédiments et les laitiers

Proportions des fines (%)	Valeurs mesurées (%)	Valeurs prédites (%)
0	0,00	63,34
5	0,05	65,00
15	0,15	67,91
25	0,25	69,44
35	0,35	68,90
45	0,45	66,91
55	0,55	64,36
65	0,65	61,69
75	0,75	59,09
85	0,85	56,64
95	0,95	54,33
100	1,00	53,24

Valeurs de compacités pour les mélanges entre les sédiments et les laitiers 1

Proportions des fines (%)	Valeurs mesurées (%)	Valeurs prédites (%)
0	66,26	66,26
5	67,25	66,96
10	67,80	67,52
19	68,36	68,16
29	66,33	67,83
38	64,97	66,53
48	62,90	64,64
57	61,49	62,53
67	59,37	60,39
76	57,48	58,31
86	56,17	56,32
95	54,30	54,43
100	53,52	53,52

Valeurs de compacités pour les mélanges entre les sédiments et les laitiers 1

ANNEXE 3

Structure à couche de base en sédiment traité

Trafic:

Moyenne journalière annuelle	MJA	= 295PL/Jour
Taux de croissance géométrique	t	= 7,5%
Durée initiale	p	= 20ans
Coefficient d'agressivité du sédiment traité	CAM	= 1,3
Coefficient d'agressivité du sol	CAM	= 1
Coefficient d'agressivité de la GNT	CAM	= 1
Risque de calcul	r	= 5%

Matériaux utilisés:

Couche de surface: Béton bitumineux (BB)

Assise de chaussée: Sédiments traités aux laitiers d'aciérie (SL)

Sol support E = 50MPa, $\nu = 0,35$

Caractéristiques des matériaux utilisés

Matériaux	E (MPa)	ν	σ_6 ou ε_6 (10°C, 25Hz)	Pente de la fatigue (- 1/b)	écart-type (SN)
BB	5400	0,35	$150 \cdot 10^{-6}$	5	0,25
SL	5480	0,25	0,59 MPa	12	0,8
GNT	150	0,35	/	/	/
Sol support	50	0,35	/	/	/

Calcul des paramètres du trafic

Facteur de cumul sur la période de calcul		43,1
Nombre cumulé de poids lourds pour p années	N	= 4630025
Nombre d'essieux équivalents pour couche F1	NE	= 6019032,50
Nombre d'essieux équivalents pour sol	NE	= 4630025

Hypothèses de liaison entre les couches

Les interfaces entre les couches sont collées

Critères à vérifier

La contrainte de traction à la base des couches traitées aux liants hydrauliques reste inférieure à une valeur admissible.

La déformation verticale à la base de couche de fondation et à la surface du sol support est inférieure à une valeur limite

Détermination de la déformation verticale à la base de couche de fondation et à la surface du sol support

$$\varepsilon_{z,ad} = 0,016.(NE)^{-0,222} = 0,0005301$$

Contrainte de traction à la base de la couche traitée au liant hydraulique

$$\sigma_{t,ad} = \sigma_t(NE).k_r.k_c.k_s.k_d$$

- $\sigma_t(NE)$ est le contrainte pour laquelle la rupture en flexion sur éprouvette de 360jours est obtenue pour NE chargement

$$\sigma_t(NE) = \sigma_6.(NE/10^6)^b = 0,768312841 \text{ MPa}$$

- k_r est un coefficient qui ajuste la valeur de déformation admissible au risque de calcul retenu en fonction des facteurs de dispersion sur l'épaisseur

$$k_r = 10^{-ub\delta}$$

- u est la variable centrée réduite associée au risque r , Avec $r = 5\%$, on a $u = 1,645$
- b est la pente de la loi de fatigue du matériau $b = -1/12$
- δ est l'écart type de la distribution de $\log N$ à la rupture, avec $Sh = 2,5$; $c = 0,02$

$$\delta = 1$$

$$kr = 0,729317554$$

- k_d est un coefficient introduit pour prendre en compte l'effet des discontinuités pour la couche de base. $k_d = 1$
- k_c est un coefficient de calage destiné à ajuster les résultats du modèle de calcul au comportement observé de chaussées du même type. $k_c = 1,5$
- k_s est un coefficient minorateur tenant compte de l'effet d'hétérogénéités locales de portance d'une couche de faible rigidité supportant les couches liées

Module	$E < 50\text{MPa}$	$50\text{MPa} \leq E < 120\text{MPa}$	$120\text{MPa} \leq E$
k_s	1/1,2	1/1,1	1

Contrainte admissible à la base de la couche de grave traitée

$$\sigma_{t,ad} = 0,840516062 \text{ MPa}$$

Contraintes et déformations calculées

Valeurs de déformation et contrainte à l'interface de chaque couche pour la structure 6/20/25 et 6/21/25

Sollicitation	6/20/25 ^{**}	$\sigma_{t,ad}$	$\varepsilon_{z,ad}$
σ_t base SL (MPa)	0,71	0,68	-
ε_z fondation GNT (10^{-6})	69,5	-	500
ε_z sol support (10^{-6})	56	-	530

^{**} 6cm de BB/20cm de SL/25cm de GNT