



HAL
open science

Valorisation des sédiments marins contaminés par solidification/ stabilisation à base de liants hydrauliques et de fumée de silice

E. Silitonga

► **To cite this version:**

E. Silitonga. Valorisation des sédiments marins contaminés par solidification/ stabilisation à base de liants hydrauliques et de fumée de silice. Interfaces continentales, environnement. Université de Caen, 2010. Français. NNT: . tel-00705226

HAL Id: tel-00705226

<https://theses.hal.science/tel-00705226v1>

Submitted on 7 Jun 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



UNIVERSITE de CAEN/BASSE NORMANDIE

U.F.R : SCIENCES CAEN

ÉCOLE DOCTORALE SIMEM

THESE

présentée par

Ernesto SILITONGA

et soutenue

28 Avril 2010

en vue de l'obtention du

DOCTORAT de L'UNIVERSITE de CAEN

Spécialité : Génie civil

(Arrêté du 07 août 2006)

**Valorisation des sédiments marins contaminés par
solidification/ stabilisation à base de liants
hydrauliques et de fumée de silice**

Directeur de thèse : **Monsieur Salim MEZAZIGH**

MEMBRES du JURY

Mme Irini DJERAN-MAIGRE, Professeur, INSA de Lyon (rapporteur)

M. Zoubair LAFHAJ, Professeur, Ecole Centrale de Lille (rapporteur)

M. Daniel LEVACHER, Professeur, Université de Caen

M. Philippe DHERVILLY, Directeur industriel, ARD Caen Normandie

M. Salim MEZAZIGH, Maître de Conférences, HDR, Université de Caen

M. Matoren KHAY, Ingénieur, Directeur CER de Rouen

Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer mes profonds remerciements à monsieur Salim Mezazigh, mon directeur de thèse, pour m'avoir accueillie dans laboratoire M2C. Merci pour les précieux conseils scientifiques, pour m'avoir appris de nombreuses expériences, son aide sans limite, sa générosité et sa disponibilité, et surtout sa patience pendant la rédaction de ce travail.

J'adresse mes remerciements les plus chaleureux à Daniel Levacher, professeur à l'université de Caen, pour tous les précieux conseils qu'il m'a donnés, pour la confiance qu'il m'a témoigné et sans qui ce travail n'aurait pas vu le jour.

Je remercie madame Irini Djeran-Maigre et monsieur Zoubeir Lafhaj d'avoir bien voulu me faire l'honneur d'accepter d'être rapporteuses de ma thèse.

Je tiens à exprimer mes profonds remerciements à monsieur Matoren Khay, et monsieur Philippe Dhervilly, pour avoir accepté d'examiner mon travail.

Tous mes remerciements vont également à monsieur Hervé Mangnan, Directeur, Nathanaël Delporte, Adjoint directeur, Michel Gesret, Contrôleur à la Direction de l'Aménagement du Conseil Général du Calvados pour l'aide précieux qui nous ont apporté et les moyens important mis à notre disposition dans la réalisation de ce projet d'étude.

Sans oublier monsieur Philippe Berthe, Responsable de laboratoire et monsieur Fabien Novo, pour nous avoir accueilli et permis de réaliser des essais au sein de leur laboratoire de la DDE à Carpiquet

Je tiens à remercier tous mes camarades du laboratoire, plus particulièrement ceux qui se reconnaîtront, pour leur soutien et leur bonne humeur.

Je remercie chaleureusement mon père, ma mère, mes sœurs, et ma famille pour tous les support et la patience.

SOMMAIRE

CHAPITRE 1	
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE 2	
ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	
2.1. Problématique des sédiments dragués.....	4
2.1.1. Histoire des sédiments dragués en France.....	4
2.1.2. Origine et composition des sédiments.....	7
2.1.3. Facteurs d'adsorption des contaminations.....	7
2.1.3.a. Granulométrie.....	8
2.1.3. b. Matière organique.....	9
2.1.3.c. Effet des matières organiques sur la stabilisation des sédiments.....	9
2.2. La contamination des sédiments.....	11
2.2.1. Origine de la pollution.....	11
2.2.1.a Les éléments nutritifs.....	11
2.2.1.b Les métaux lourds.....	11
2.2.1.c. Les micro-polluants organiques.....	13
2.2.2. Exemples de méthodes de stabilisation des métaux lourds dans les sols.....	14
2.2.3. Règlement de la gestion des sédiments.....	16
2.2.3.1. Le statut juridique d'un déblai de dragage extrait de son milieu d'origine.....	16
2.3. Stabilisation des sédiments.....	18
2.3.1. Ciment.....	18
2.3.1.1. Traitement des sédiments au ciment.....	19
2.3.2. Chaux.....	21
2.3.2.1. Action de la chaux.....	21
2.3.3. Liant pouzzolanique.....	23
2.3.3.1. Cendre volante	23
2.3.3.1. Classification géotechnique.....	23
2.3.3.2. Utilisation dans les infrastructures routières.....	23
2.3.1.3. Les Cendres volantes silico-alumineuses classiques.....	24
2.3.3.2. Les fumées de silice.....	27
2.3.4. Correcteur granulométrique.....	29
2.4. Sédiments marins dans la structure de la chaussée.....	30
2.4.1. Utilisation en travaux routière.....	31
Conclusion	34
CHAPITRE 3	
CARACTERISTIQUES DES SEDIMENTS MARINS	
3.1. Les sédiments marins	35
3.1.1. Origines des sédiments.....	35
3.1.2. Mode de prélèvement, transport et chambre de ressuyage.....	35
3.2. Caractéristiques physico-chimiques des sédiments.....	39
3.2.1. Analyse granulométrique par laser.....	39
3.2.2. Méthode de mesure de la masse volumique absolue par pycnomètre	40

3.2.2.1. Principe.....	40
3.2.2.2. Résultats	40
3.3. Teneur en matières organiques.....	41
3.4. Limites d'Atterberg des sédiments (NF P 94-051).....	42
3.4.1. Principe	42
3.4.2. Résultats.....	42
3.4.2.1. Limite de liquidité (W_L).....	42
3.4.2.2. Limite de plasticité (W_P).....	43
3.5. Essai au bleu de méthylène (NF P 94-068).....	44
3.6. Essais Proctor Normal et Modifié (NF P 94-093).....	45
3.7. Analyse minéralogique des sédiments par diffraction rayon X (DRX)	46
3.7. Analyse géochimiques par l'essai de lixiviation.....	49
3.7.1. Résultats des analyses REPOM (2001-2004).....	49
3.7.2. Résultats des analyses par IN VIVO (2002).....	51
3.7.3. Campagne d'échantillonnage (Conseil Général du Calvados, Octobre 2004 et Juillet 2005).....	52
3.7.4. Campagne d'échantillonnage (Conseil Général du Calvados, 18 avril 2008 et 05-Janvier 2009).....	53
CHAPITRE 4	
MATERIAUX ET METHODES DE PREPARATION DES ECHANTILLONS	
4.1. Les fumées de silice.....	57
4.1. 1. Analyse granulométrique par laser.....	57
4.1. 2. Caractéristiques minéralogiques.....	59
4.2. Les cendres volantes.....	60
4.2. 1. Analyse granulométrique par laser.....	60
4.2.2. Caractéristiques minéralogiques.....	63
4.2.3. Essai Chapelle.....	64
4.3. La Chaux.....	66
4.4. Le ciment Portland.....	67
4.5. Les sables.....	68
4.5. 1. Analyse granulométrique.....	68
4.5.2. Teneur en matières organiques.....	69
4.6. Préparation des échantillons.....	70
4.6.1. Détermination des dosages en liants.....	70
4.6.2. Préparation des sédiments	70
4.6.3. Confection des éprouvettes.....	71
4.6.3.1. Confection des éprouvettes 50*50 (l'essai la résistance en traction).....	71
4.6.3.2. Confection des éprouvettes 40*80cm.....	73
4.6.4. Protocole de compactage.....	74
4.7. Résistance a la compression simple après traitement	75
4.8. Essai de mouillage-séchage	76
4.8.1. Principe.....	76
4.8.2. Présentation du programme des essais de gel dégel et de Mouillage-séchage.....	76
4.9. Essai de gel-dégel.....	78
4.9.1. Principe	78

CHAPITRE 5

VALORISATION DES SEDIMENTS

5.1. Traitement des sédiments du Port en Bessin avec 2% de ciment	81
5.1.1 Choix de la chaux	81
5.1.1.1 Traitement sans ajout de sable.....	82
5.1.1.1.a. Condition de mise en œuvre de mélanges.....	82
5.1.1.1.b. Résistance en compression simple.....	88
5.1.1.2 Traitement avec un ajout de 5% de sable.....	86
5.1.1.2.a. Condition de mise en œuvre de mélanges.....	86
5.1.1.3 Traitement avec un ajout de 10% de sable.....	90
5.1.1.3.a. Condition de mise en œuvre de mélanges.....	90
5.1.1.3.b. Résistance en compression simple.....	92
5.1.1.4 Traitement avec un ajout de 15% de sable.....	94
5.1.1.4.a. Condition de mise en œuvre de mélanges.....	94
5.1.1.4.b. Résistance en compression simple.....	96
5.1.2. Choix de la fumée de silice.....	98
5.1.2.1. Traitement sans ajout de sable.....	99
5.1.2.1.1. Résultats et analyse des essais de la résistance en compression simple.....	99
5.1.2.1.2. Résultats et analyse des essais de gel-dégel.....	101
5.1.2.1.2.a. Evolution de la perte de masse.....	101
5.1.2.1.2.b. Evolution de la résistance en compression simple.....	101
5.1.2.1.3. Résultats et analyse des essais de mouillage-séchage.....	103
5.1.2.2. Traitement avec ajout de 5% de sable.....	105
5.1.2.2.1. Résultats et analyse des essais de résistance en compression simple.....	105
5.1.2.2.2. Résultats et analyse des essais de gel-dégel	107
5.1.2.2.2.a. Evolution de la perte de masse.....	107
5.1.2.2.2.b. Evolution de la perte de résistance en compression Simple.....	108
5.1.2.2.3. Résultats et analyse des essais de mouillage-séchage	110
5.1.2.3. Traitement avec l'ajoute de 15% de sable.....	111
5.1.2.3.1. Résultats et analyse des essais de la résistance en compression simple.....	111
5.1.2.3.2. Résultats et analyse des essais de gel-dégel.....	112
5.1.2.3.2.a. Evolution de la perte de masse.....	113
5.1.2.3.2.b. Evolution de la résistance en compression simple.....	113
5.1.2.3.2.c. Résultats et analyse des essais de mouillage-séchage.	116
5.1.3. Choix de la cendre volante.....	117
5.1.3.1. Sans ajout de sable.....	117
5.1.3.1.1. Résultats et analyse des essais de la résistance en compression simple.....	117
5.1.3.1.2. Résultats et analyse des essais de gel-dégel.....	118
5.1.3.1.2.1. Evolution de la perte de masse.....	118
5.1.3.1.2.2. Evolution de la résistance en compression simple.....	119
5.1.3.1.2.2.a. Eprouvettes à 7 jours.....	119
5.1.3.1.2.2.b. Eprouvettes à 28 jours.....	120
5.1.3.1.3. Résultats et analyses des essais de mouillage-séchage.....	121
5.1.3.2. Avec un ajout de 5% de sable.....	122
5.1.3.2.1. Résultats et analyse des essais de la résistance en	122

Compression simple.....	122
5.1.3.2.2. Résultats et analyse des essais de gel-dégel.....	123
5.1.3.2.2.1.a. Eprouvettes à 7 jours.....	124
5.1.3.2.2.1.a. Eprouvettes à 7 jours.....	125
5.1.3.3. Avec un ajout de 15% de sable.....	127
5.1.3.3.1. Résultats et analyse des essais de la résistance en compression simple.....	127
5.1.3.3.2. Résultats et analyse des essais de gel-dégel.....	127
5.1.3.3.2.1. Evolution de la perte de masse.....	128
5.1.3.3.2.2. Evolution de la résistance en compression simple.....	129
5.1.3.3.2.2.a. Eprouvettes à 7 jours.....	129
5.1.3.3.2.2.b. Eprouvettes à 28 jours.....	130
5.1.3.3.3. Résultats et analyses des essais de mouillage-séchage	131
5.2. Traitement avec 5% de ciment et 3% de la chaux.....	132
5.2.1. Références de mise en oeuvre des mélanges.....	132
5.2.2. Traitement sans ajout de sable.....	135
5.2.2.1.a. Résultats et analyse des essais de gel-dégel.....	136
5.2.2.1.b. Résultats et analyse des essais de mouillage-séchage.....	138
5.2.3. Traitement avec un ajout de 5% de sables.....	139
5.2.3.1.a. Résultats et analyse des essais de gel-dégel.....	141
5.2.3.1.b. Résultats et analyse des essais de mouillage-séchage.....	143
5.2.4. Traitement avec un ajout de 10% de sable.....	144
5.2.2.1.a. Résultats et analyse des essais de gel-dégel.....	146
5.2.2.1.b. Résultats et analyse des essais de mouillage-séchage.....	148
5.2.5. Traitement avec un ajout de 5% de sables.....	149
5.2.5.1. Résultats et analyse des essais de gel-dégel.....	151
5.2.5.2. Résultats et analyse des essais de mouillage-séchage.....	153
5.3. DETERMINATION DE LA RESISTANCE EN TRACTION.....	154
5.3.1. Résultats des mesures à 28 jours.....	155
5.3.1.1. Effet de sable.....	156
5.3.1.2. Effet de la fumée de silice.....	157
5.3.1.3. Effet des cendres volantes.....	157
5.3.2. Résultats des mesures à 90 jours.....	158
5.3.2.1. Effet de sable.....	158
5.3.2.2. Effet de la fumée de silice.....	160
5.3.2.3. Effet des cendres volantes.....	160
5.4. PERMEABILITE DES SEDIMENTS.....	161
5.4.1. Méthode de réalisation des essais	163
5.4.2. Résultats.....	164
5.5. ESSAI DE LIXIVIATION.....	168
5.5.1. L'essai de lixiviation dynamique (l'essai de lixiviation à ph variable).....	170
5.5.1.1. Zinc.....	170
5.5.1.2. Sulfates.....	171
5.5.1.3. <i>Cadmium</i>	172
5.5.1.4. Nickel.....	173
5.5.1.5. Chlorures.....	174
5.5.1.6. Plomb.....	175
5.5.1.7. Cuivre.....	176
5.5.2. L'essai de lixiviation dynamique (l'essai de lixiviation à pH stable).....	177
Conclusion	178

CHAPITRE 6	
REALISATION D'UNE PLATE FORME EXPERIMENTAL SUR SITE REEL EN	
VUE DE VALIDATION DES RESULTATS EXPERIMENTAUX EN	
LABORATOIRE	
6.1. Introduction.....	180
6.2. Mise en place.....	180
6.3. Analyse des résultats et interprétations.....	191
6.3.1. L'essai de Dynaplaque 2.....	191
6.3.1.a. L'effet d'une protection imperméable.....	192
6.3.1.b. L'effet de protection de fumée de silice.....	193
6.3.2. Analyse caractéristiques géochimiques par l'essai lixiviation.....	194
CONCLUSION	198
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	202
Liste des figures	210
Liste des tableaux.....	218
Annexe A	222
Annexe B	226

CHAPITRE 1

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION

Le territoire français compte plus de 525000 km de cours d'eau qui transportent chaque année, environ 45 millions de tonnes de sédiments (Foucher 2005). L'accumulation des sédiments, et leurs pollutions éventuelles, au fond des voies de navigation telles que les chenaux, des cours d'eau et dans les installations portuaires est souvent accentuée par l'activité humaine.

Pour maintenir ou restituer l'accès de ces infrastructures aux bateaux, il s'avère indispensable de procéder régulièrement à des dragages d'entretien. En moyenne 50 millions de m³ de sédiments sont dragués par an dans les ports français et rejetés dans le milieu marin ou stockés dans des zones de dépôt à terre.

Les sédiments de dragage sont également utilisés, sous différentes formes, dans le domaine du génie civil en tant que matériau de construction d'où le développement d'une valorisation des sédiments en utilisant la technique de solidification/stabilisation à base de liants. Cette technique nécessite une étude continue et rigoureuse des caractéristiques intrinsèques des matériaux (porosité, perméabilité, saturation...etc.).

Dans le domaine routier, l'utilisation des matériaux à base de liant hydrauliques nécessite une étude complète afin de maîtriser au mieux le matériau en place. Le passage des sédiments à un matériau final utilisable en technique routière s'appuie sur une méthodologie, et nécessite une connaissance parfaite des sédiments. Ainsi, des choix doivent être pris afin d'atteindre l'objectif, en prenant en considération des différentes facettes du procédé. A partir des résultats de l'étape de caractérisation des sédiments une méthodologie de valorisation peut être mise en place.

Pour prédire correctement le comportement des matériaux poreux sous les diverses conditions auxquelles ils peuvent être soumis, on devra, avant tout, prendre connaissance de leur microstructure. Dans le cas des matériaux poreux, la microstructure entraîne une conséquence inévitable. La surface interne totale des matériaux (constituée par les surfaces limites des vides intérieures) est exposée aux attaques de l'environnement (gel-dégel, mouillage-séchage, lixiviation des métaux lourds), si les vides communiquent avec l'extérieur, les agents étrangers peuvent alors pénétrer jusqu'au «cœur» du matériau. Par conséquent, il est important que les sédiments traités aient une porosité aussi faible que possible par l'utilisation des liants (cendres volantes, fumée de silice et ciment).

Des travaux de recherche effectués sur le traitement des sédiments revalorisés ont été entrepris depuis une dizaine d'années et ont fait l'objet de plusieurs publications comme relaté dans l'étude bibliographique présentée dans ce rapport. L'essentiel a porté sur la caractérisation physique, puis mécanique en fonction des dosages en ciments et additifs. Ainsi, les travaux de recherche entrepris dans cette thèse entre dans le cadre de la poursuite des recherches dans ce domaine. Elle définit les modalités d'étude, ayant pour objet la valorisation des sédiments de dragage du Port En Bessin en vue d'obtention d'un matériau final utilisable en techniques routières.

Cependant, une meilleure stabilisation, voire une valorisation ne peut avoir lieu que par une meilleure connaissance des propriétés physico-chimique et mécanique de ces résidus. Ainsi la première phase de l'étude consiste en une caractérisation des boues aussi bien dans leur composition que dans leur comportement aux contraintes mécaniques.

La caractérisation des sédiments constitue donc la première partie de l'étude. L'objectif est d'évaluer les propriétés physiques, chimiques et mécaniques de ces matériaux. Cette évaluation va permettre, dans un second temps de reconnaître et de décrire les paramètres importants qui régissent le comportement général des sédiments. Les caractéristiques mécaniques seront aussi étudiées dans la partie formulation. Elles sont liées à l'étude de l'amélioration du comportement des sédiments pour la valorisation, à travers l'étude des phases de préparation à la formulation et de stockage.

La valorisation en génie civil a été privilégiée, du fait des volumes importants des matériaux de dragage à traiter (25000 m³). Un matériau destiné à une application en génie civil doit répondre à des normes précises. Ainsi, un nombre minimal d'analyses chimique et géotechniques ont été effectuées en fonction de cette utilisation, conformément aux normes et à la classification des matériaux. Après les formulations de traitements établies, des applications sur terrain ont été réalisées, au travers d'une planche expérimentale: c'est la deuxième phase de cette étude.

En technique routière, la surface d'un ouvrage peut être de quelques mètres carrés (environ 25 m² dans notre cas) à plusieurs milliers de mètres carrés. Ces planches expérimentales permettent l'étude en conditions réelles d'utilisation du matériau. Des analyses étudient le relargages de certains polluants (métaux lourds, HAP...) et comparent les résultats avec les prévisions réalisées à partir des essais de lixiviation. D'autres paramètres concernant le comportement géotechnique du matériau ont été vérifiés. Ils ont été comparés aux prévisions attendues pour vérifier si l'ensemble des résultats obtenus ne montre pas de dérive par rapport aux prévisions, le matériau peut être ainsi mis en œuvre dans une troisième phase pour la réalisation finalement d'une plate forme routière, en prenant soin de définir strictement les conditions de mise en œuvre.

Le plan de du rapport de thèse est organiser en plusieurs parties:

Dans la première partie, la problématique de gestion des sédiments de dragage/curage en France est exposée. Après une revue des principaux constituants de sédiments, des polluants présents dans ces matériaux, des réglementations en vigueur pour la gestion des critères et les conditions d'utilisation de matériaux sont exposés. Dans cette partie le point est mis sur les méthodes de formulations de matériaux mais également les méthodes de traitement aux liants hydrauliques et pouzzolanique.

Dans la deuxième partie, les résultats de caractérisation des paramètres physiques, du comportement mécanique, de la nature minéralogique et chimique, de l'impact sur l'environnement sont présentés. Ces paramètres ont permis d'évaluer les performances mécaniques de ces matériaux.

La troisième partie présente la méthodologie générale adoptée pour répondre aux critères d'utilisation des sédiments étudiés en techniques routière. A ce stade, l'accent est particulièrement mis sur la phase de préparation des sédiments, le choix des ajouts liants, mais également la proposition des constituants dans les mélanges développées sur la base de l'expérience requise au département sur de matériaux similaires.

La quatrième partie, est consacré à la mise en place d'une plate forme expérimentale en techniques routières suivi par des mesures et des essais sur site, soumis à des contraintes réelles d'utilisation. La plate-forme a pour objectif de valider la technique élaborée en laboratoire, qui doit remplir les critères fixés dans les normes.

CHAPITRE 6

**REALISATION D'UNE PLATE
FORME EXPERIMENTAL SUR SITE
REEL EN VUE DE VALIDATION DES
RESULTATS EXPERIMENTAUX EN
LABORATOIRE**

6.1. Introduction

L'objectif de ce travail sur chantier est de valider les résultats obtenus en laboratoire, qui doivent remplir les critères de référence fixés dans les normes et guides d'application tel que le GTR. Des contrôles lors du chantier et un suivi environnemental et mécanique doivent vérifier les données les hypothèses et les mesures obtenues en laboratoire. D'après ces derniers le mélange 5% de sable, 5% de ciment, 3% de chaux et 1% de fumée de silice fourni la meilleure résistance mécanique par rapport aux autres mélanges étudiés. Les formulations élaborés en laboratoire ont permis d'atteindre des caractéristiques mécaniques acceptables pour l'utilisation en assise de chaussée. Les travaux sur chantier présentés ci-après sont basés sur cette formulation.

6.2. Mise en place

La zone de préparation du mélange et de réalisation de la planche expérimentale ont été installée à côté de la zone de la chambre de ressuyage des vases. Nous avons réalisé deux types de planches, une planche avec un mélange traité sans fumée de silice et l'autre avec de la fumée de silice. Le mélange traité avec de la fumée de silice est devisée en deux parties : la première sablé et imperméabilisé à l'aide d'une géomembrane et la seconde sans découvert (voir 1 et 2 sur la figure VI-1A).



Figure VI-1: (A) partie de la chambre de dépôt où les sédiments ont été récupérés, (B) et (C) zone de préparation des mélanges.

La figure VI-1 (A) montre les deux planches réalisées pour les deux différents mélanges. D'abord chaque planche est préparée avec une couche l'imperméabilisé pour empêcher les polluants portés par les sédiments de polluer l'environnement autour de zone de préparation des planches (voir B sur la figure VI-1) puis, suivi par la couche de géotextile (Voir figure VI-1C).

Les sédiments utilisés sont récupères directement du bassin d'essorage des vases est mise en place selon la formulation des liants choisis dans la zone de préparation (voir B et C sur la figure VI-3).

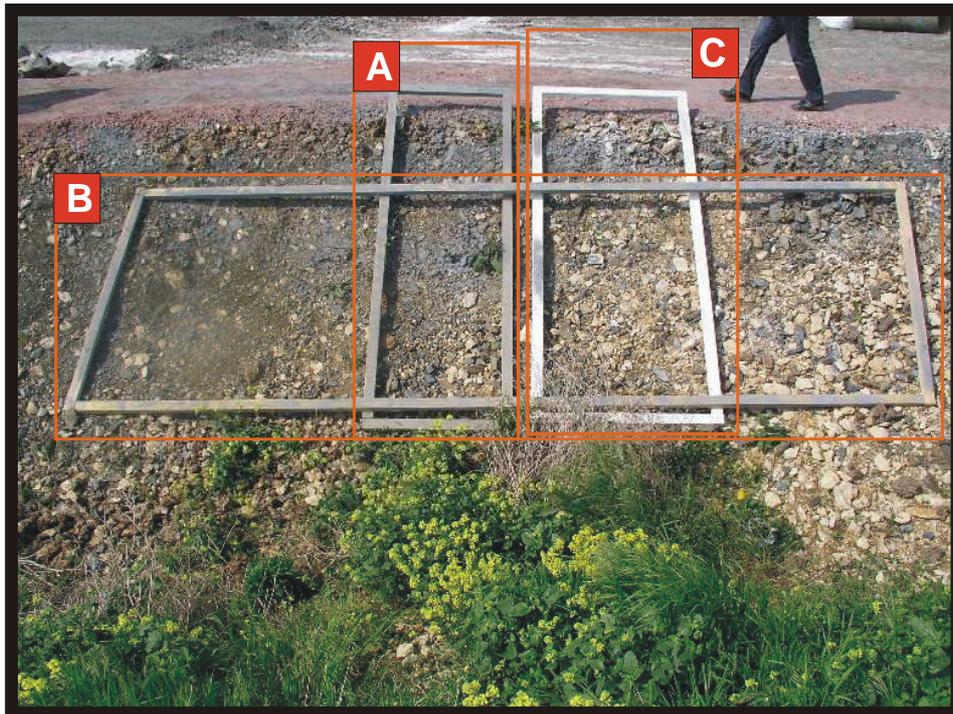


Figure VI-2 : Cadres pour le dosage en (A) pour le ciment et le sable, (B) pour la chaux (C) pour la fumée de silice

Pour réaliser le dosage en pourcentages des liants utilisés, nous avons utilisé des cadres mesure. A chaque type de liant un cadre mesure a été confectionné en fonction des proportions du liant retenu. La figure VI-2 et VI-3 présents ces cadres mesures.

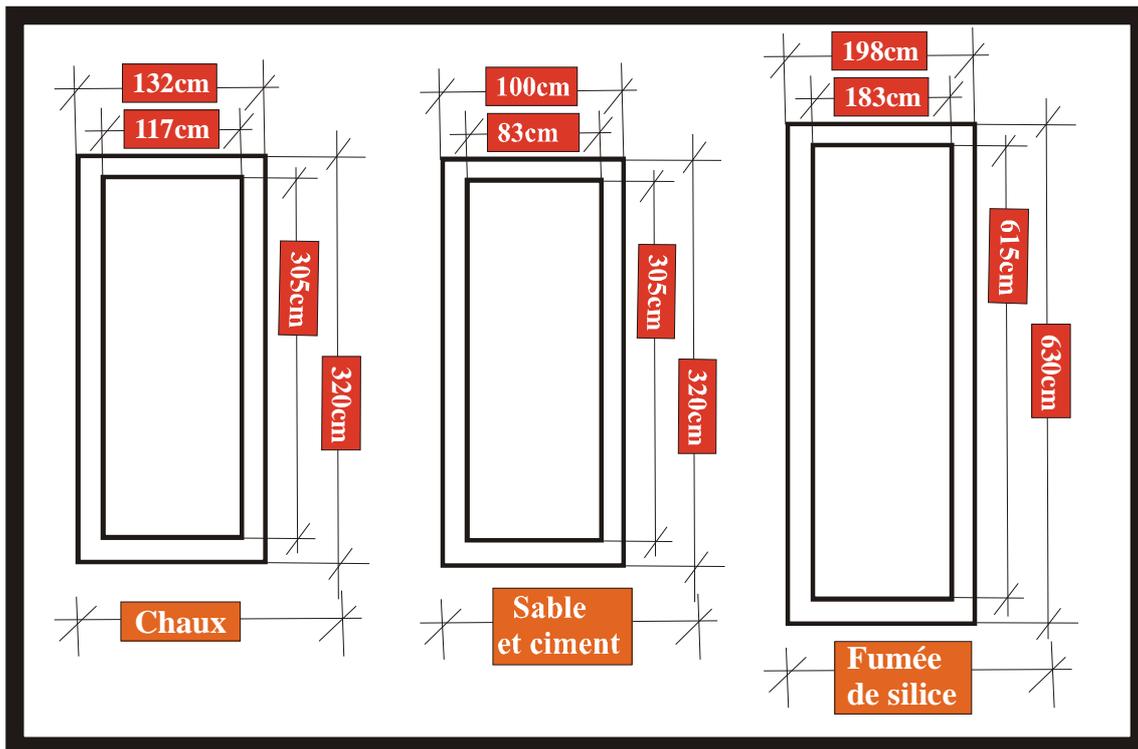


Figure VI-3 : Mensurations de cadres mesure

Afin de stabiliser les matières organiques, de réduire la teneur en eau et d'accroître les caractéristiques mécaniques sur une période mise en place, le traitement à la chaux est réalisé 6 heures avant les autres liants et le sable, afin de permettre à la chaux d'agir sur le matériau. Sur la figure VI-4, nous pouvons voir le procédé de mise en place de la chaux, étape par étape, en utilisant le cadre mesure 132*320 cm. Pendant toute la mise en planche du liant, nous avons utilisé un survêtement imperméable et un masque d'aspiration isolant comme équipement de protection des travailleurs.



Figure VI-4 : Procède de mise en place de la chaux.



Figure VI-5 Malaxage en place

Après la mise en place de la chaux, l'étape suivante étant le malaxage en place réalisé d'un engin spécifique (voir figure VI-5). Afin d'homogénéiser le sédiment traité le malaxeur à réaliser trois passages après le traitement à la chaux. La figure VI-6 présente l'état des sédiments traités après chaque passage.



Figure VI-6 : Etat des sédiments après le passage d'engin de mélaxage.

Figure VI-6(A) montre les sédiments traités après le 1^{er} passage de l'engin de mélange, on constate qu'après le 1^{er} passage, la chaux commence à se mélanger avec les sédiments, ensuite en (B). Au 2^{ème} passage, les sédiments sont plus fins et plus homogènes. L'état du sédiment devient plus fins et plus homogène après le 3^{ème} passage d'engin. En observant plus en détail nous pouvons constater que la couleur blanche de la chaux s'estompe sur la surface des sédiments avec le nombre de passage d'engin. En effet, le sédiment est un agglomérat de particules solides et de fluides interstitiels. Avant la présence de la chaux, le sédiment se présentait sous la forme d'un massif continu. L'ajout de chaux provoque la floculation des argiles et facilite ainsi la fragmentation du limon dans les sédiments lors du malaxage. Les fragments de sols chaulés constituent des grumeaux de taille centimétrique (voire décimétrique).



Figure VI-7 : Mise en place du sable et du ciment

L'opération suivante est la mise en place du sable et du ciment en utilisant le cadre de mesure de 100 cm de largeur et 320 cm de longueur. La méthode de mise en place de ciment et de sable est exactement similaire avec celle de la chaux. La figure VI-7 montre le procès de mise en place. L'ajout du ciment ainsi que la chaux excédentaire après la floculation des argiles permet de créer la liaison entre les grumeaux. Nous pouvons donc supposer que le ciment ne pénètre pas à l'intérieure des grumeaux. La prise et le durcissement du ciment d'une part et la réaction pouzzolanique entre la portlandite et les argiles d'autre part contribuent à la rigidité des sédiments après l'ajout de ciment.



Figure VI-8 : Mise en place de fumée de silice.

La mise en place de la fumée de silice est directement effectuée après celle du sable et du ciment. Cette opération est effectuée à l'aide du cadre mesure réservé pour la quantité de fumée de silice. Le procès de mise en place de fumée de silice est exactement similaire à celui de la chaux et du ciment, mais en utilisant un cadre mesure de taille différente. Le dosage étant d'un sac de 25 kg de fumée de silice pour le cadre mesure (figure VI-8)



Figure VI-9 : Procès d'une mise en place de fumée de silice

L'étape de malaxage est effectuée après la mise en place de fumée de silice. Pour avoir un matériau bien homogène, nous avons effectué l'opération de malaxage avec trois de passages d'engin (voir figure VI-9).

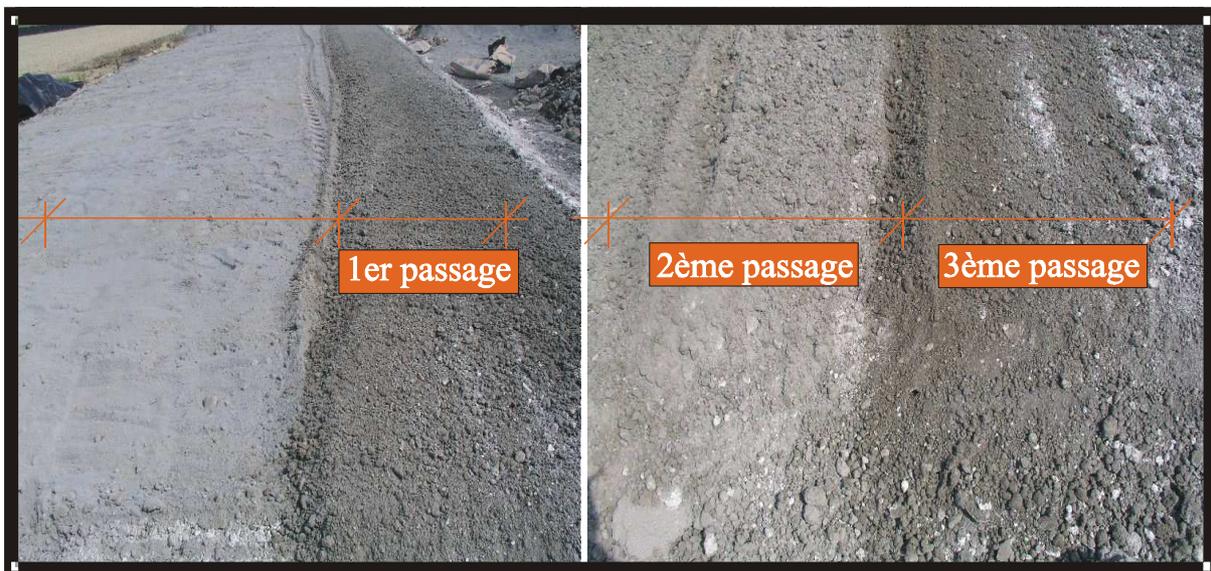


Figure VI-10 : Procès d'une mise en place de fumée de silice

La différence d'état de matériau peut être observé sur la figure VI-10. Nous pouvons constater l'évolution du changement d'état de matériau avec le nombre de passage d'engin. La taille de matériau devient plus fines est plus homogène avec le nombre de passage d'engin. Nous pouvons constater également que la couleur des

sédiments traités matériau deviennent plus foncé après le 3^{ème} passage. Preuve de la bonne efficacité de l'homogénéisation par l'engin.



Figure VI-11 : Opération de compactage du matériau

Après l'opération de malaxage, un compactage des matériaux est effectué à l'aide d'un engin compacteur le roulant vibrant ce compactage est réalisé afin d'améliorer l'homogénéité de la taille et la forme des particules de matériau, en espérant une diminution de la porosité et obtenir les densités voulues. La figure VI-11 montre l'opération de compactage.



Figure VI-12 : Opération extraction du matériau.

Après avoir réalisé le compactage, le matériau est récupéré avec un excavateur et transporté par un engin à la planche d'essai. La figure VI-12 montre cette opération d'extraction du matériau de la zone de préparation du mélange et son transport à la planche d'essai. Sur la planche d'essai un troisième engin est utilisé pour l'épandage du matériau. La figure VI-13 montre l'opération de préparation de la 1^{ère} couche sur la planche d'essai. Après la mise en place du matériau dans la planche d'essai, une opération de compactage est effectuée à l'aide d'un rouleau vibrant (voir VI-14). Pour avoir un matériau bien compacté avec un minimum de

porosité, cinq passages ont été effectués par le rouleau vibrant. La profondeur de la 1^{ère} couche obtenue est d'environ 25-30 cm. Cette opération constitue la fin de la réalisation de la 1^{ère} couche de la planche d'essai.



Figure VI-13 : Opération de mise en du matériau sur la planche d'essai.



Figure VI-14 : l'opération de compactage la 1^{ère} couche.



Figure VI-15 : Opération de mise en matériau de la 2^{ème} couche

La préparation de la 2^{ème} couche commence avec l'opération de mise en place du matériau. La méthode est similaire à celle de la préparation de la 1^{ère} couche. La figure VI-15 montre l'opération de mise en matériau de la 2^{ème} couche.

Figure VI-17 montre l'opération de compactage de la 2^{ème} couche. Pour cette opération sept de passage du rouleau vibrant ont été effectués.



Figure VI-16 : Opération de compactage de la 2^{ème} couche

Pour évaluer la performance mécanique de la planche d'essai, nous avons effectué un essai de mesure de portance à l'aide de la Dynaplaque 2. La figure VI-18 nous présente la mise en œuvre de l'essai de portance.



Figure VI-17: L'opération de mesure de portance par la Dynaplaque 2.

Nous avons effectué huit points de mesure de portance sur la planche d'essai. Six points sur la planche traitée avec la fumée de silice et deux points sur la planche traitée aux liant hydraulique sans un ajout de fumée de silice. La figure VI-19 montre l'implantation des points de mesure pour Dynaplaque 2.

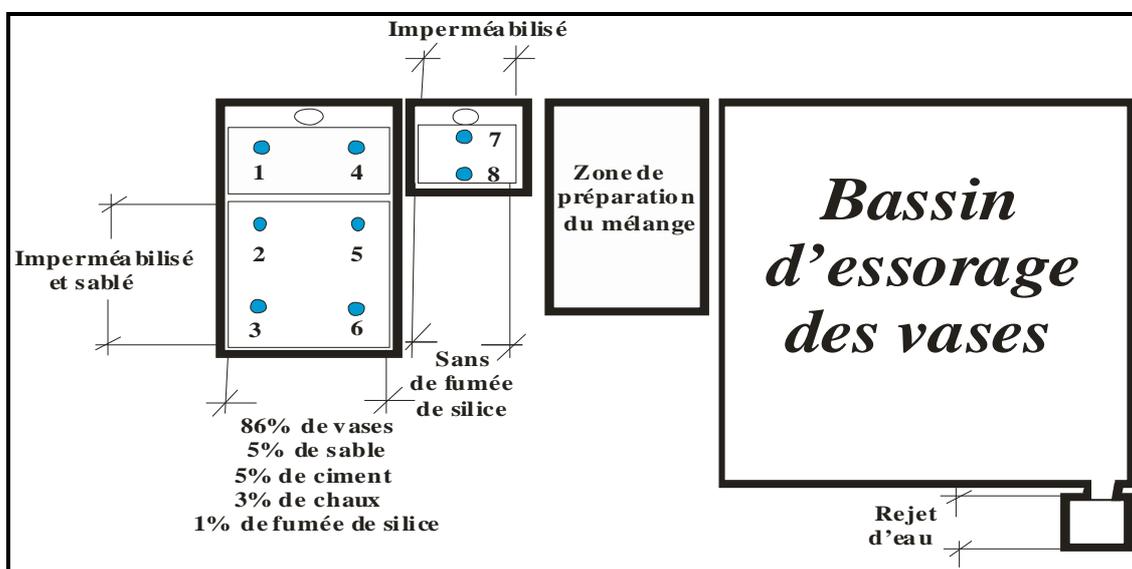


Figure VI-18: zone de préparation des planches

6.3. Analyse des résultats et interprétations

6.3.1. L'essai de Dynaplaque 2

Tableau VI-1 : Résultats des mesures de portance par Dynaplaque 2

Jours	N°1 (sans protection)	N°2	N°3	N°4 (sans protection)	N°5	N°6	N°7 (sans FS)	N°8 (sans FS)
0	19	19	19	19	19	19	19	19
7	40	39	35	29	39	45	22	20
14	47	67	53	37	47	59	19	19
21	51	69	54	41	55	74	26	27
28	54	70	60	38	56	72	19	25
35	59	75	86	43	64	89	26	24
42	64	72	75	45	65	67	21	21
49	71	93	76	44	71	96	30	29
56	70	85	83	47	75	88	25	24
63	72	79	81	47	81	70	23	20
70	68	68	71	52	78	73	20	21
77	68	68	68	43	84	99	35	27
91	64	107	90	54	80	88	32	26
98	56	79	90	57	90	116	23	23
105	86	88	120	65	90	95	30	21
119	77	81	96	68	103	97	24	20
126	63	105	87	51	61	70	35	25
133	52	130	105	72	53	99	43	34
140	92	112	94	70	46	111	32	32
147	62	112	100	68	58	110	32	32
154	55	116	105	61	91	114	36	31

Les mesures d'évolution de la portance de la assisse de la planche d'essai par Dynaplaque 2 est effectuée tout les sept jours pendant 154 jours après la mise en place de matériau Le tableau VI-1 présente les résultats de ce essai de portance.

6.3.1.a. L'effet d'une protection imperméable

Comme le montre la figure VI-19 le carré des points 2, 3, 5 et 6 est protégé par une couche imperméable, alors que deux points (1 et 4) sont laissé sans protection.

Sur la figure VI-19 nous pouvons observer l'évolution de la valeur de portance de la planche traitée avec de la fumée de silice. La valeur de portance à 28 jours des points situés dans la zone avec une protection imperméable présente des valeurs plus importantes que celles des points sans protection. Les points avec protection imperméable (n°6 et 2) ont des valeurs de portance plus importantes que les autres (voir A1 sur la figure VI-19) suivi par les autres points imperméabilisés (n°3 et 5) et enfin le point sans protection (n°1). En revanche, le point n°4 a une valeur de portance très faible par rapport à toutes les autres mesures effectués (voir A3 sur la figure VI-19).

L'évolution de la valeur de portance à 91 jours met en évidence un effet de protection imperméable plus accentué sur les portances. La différence entre les points avec et sans protection devient plus claire. En regardant B3 de la figure VI-19, nous pouvons observer nettement que les points sans protection (n°1 et 4) montrent des valeurs de portances très faibles par rapport aux points avec protection imperméable. On peut attribuer cet effet se produit à la présence de l'eau qui empêche le procès de solidification du matériau. L'acidité de l'eau de pluie peut perturber les réactions chimiques des sédiments avec les liants ajoutés. Les points avec une protection imperméable montrent des valeurs de portances assez variables. Ces résultats peuvent être dues à beaucoup de facteurs : la taille, le caractéristiques des sédiments et le compactage au niveau de chaque point.

L'évolution des valeurs de portance à 154 jours montre même tendance de l'effet de la protection avec une augmentation de la portance par rapport à celle de 91 jours. Ces résultats confirment que l'effet de la protection sur la solidification du matériau. En effet, en regardant B3 et C2 sur la figure VI-20, nous pouvons constater que la valeur de la portance des points sans protection montrent une assez faible amélioration. Nous pouvons considérer la présence de l'eau de pluie dans le matériau perturbe la réaction pouzzolanique de la fumée origine d'une résistance additionnelle à long terme.

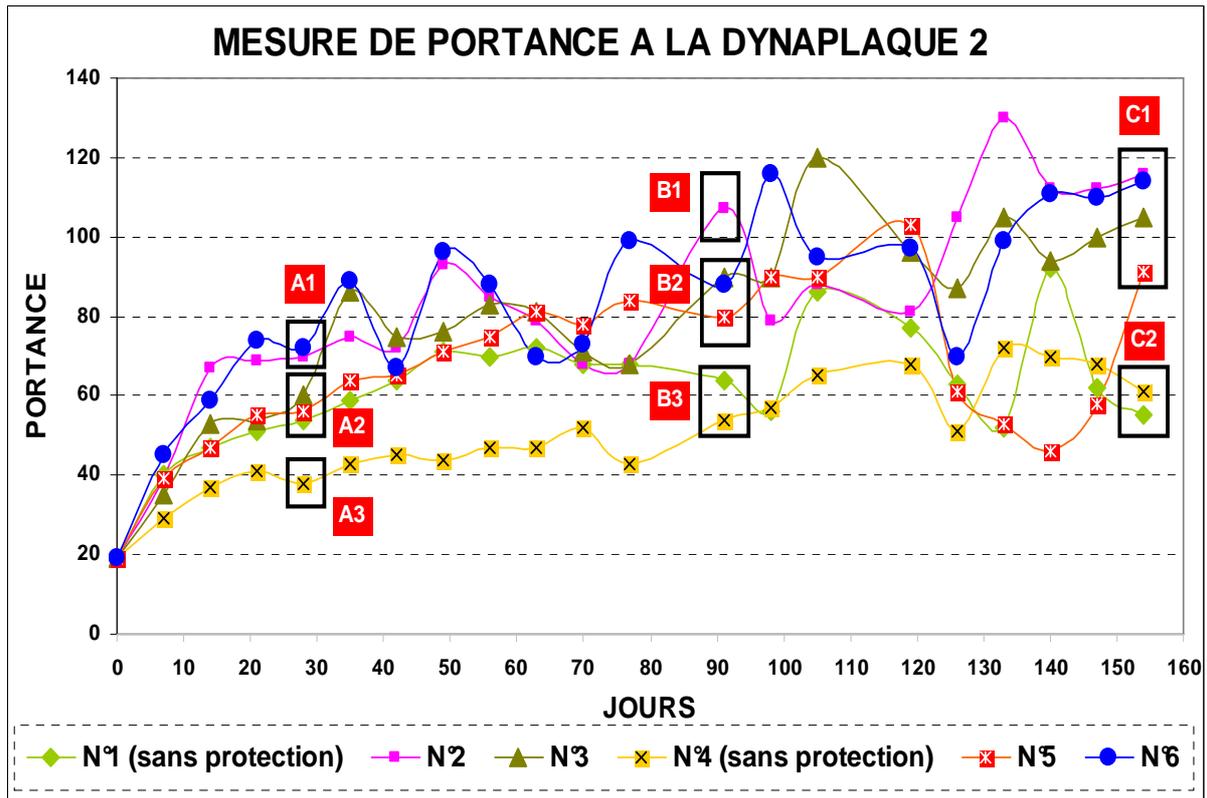


Figure VI-19 : Portance de la planche avec un ajout de fumée de silice

6.3.1.b. L'effet de protection de fumée de silice

La figure VI-20 nous montre l'évolution de la portance de la planche d'essais traitée avec de la fumée de silice et celle sans fumée de silice. A l'âge de 28 jours, nous pouvons remarquer un effet d'ajout de la fumée de silice très important. La différence entre la valeur des points traités avec la fumée de silice (voir A1 sur la figure VI-20) et sans fumée de silice (voir A2 sur la figure VI-20) est de l'ordre de 2 à 3 fois plus. La différence de portance devient plus importante avec l'âge. Nous avons constaté précédemment que l'évolution de la portance est améliorée pour la planche d'essai traitée avec de la fumée de silice et avec une protection imperméable. Par contre, pour la planche sans ajout de fumée de silice, la valeur de la portance ne montre que peu d'amélioration jusqu'à l'âge de 91 jours.

A 154 jours, l'effet de la fumée de silice reste toujours important. Nous pouvons constater que les valeurs de portance de la planche traitée avec la fumée de silice et avec une protection imperméable se situent entre 90 et 120 MPa (voir C1 sur figure VI-20). En revanche, les valeurs de portance de la planche d'essai sans fumée de silice se situent entre 20 et 40 MPa (voir C3 sur figure VI-20).

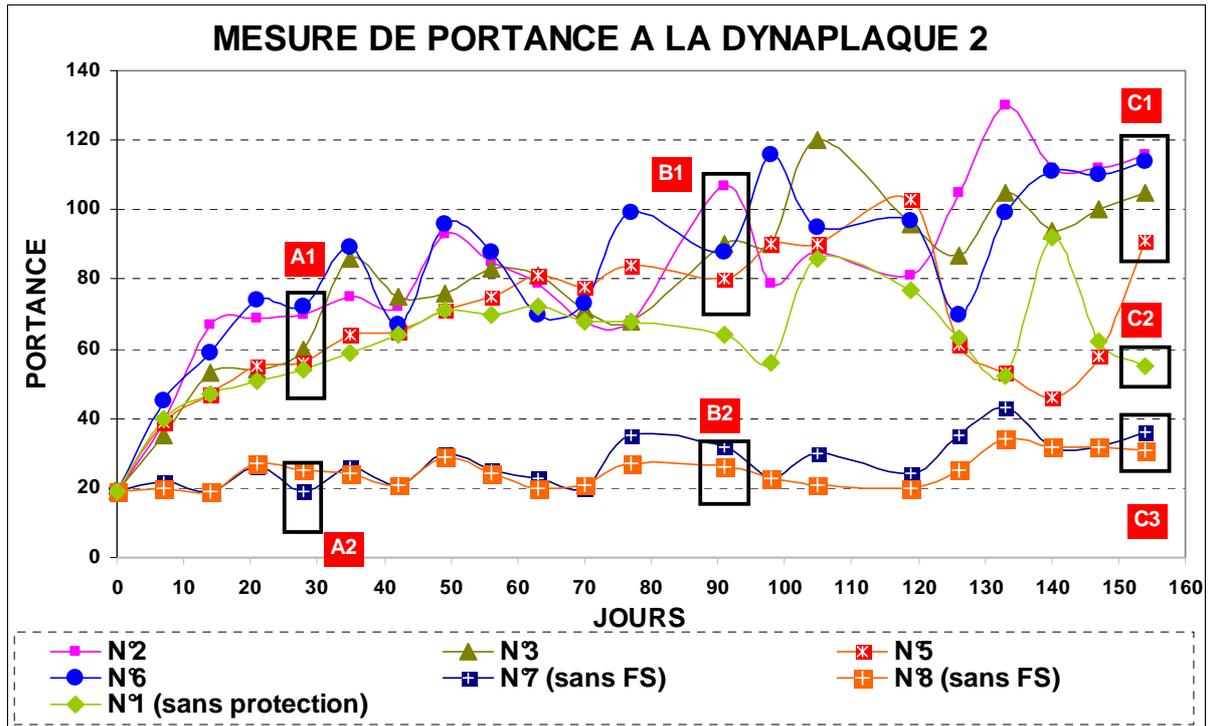


Figure VI-20 : Les valeurs de portance de planche avec et sans un ajout de fumée de silice

En comparant les valeurs de portance de la planche sans ajout de fumée de silice (voir C3) avec celles de planche avec la fumée de silice et sans protection (voir C2), nous pouvons constater que l'effet de la fumée de silice entraîne toujours une augmentation des performances mécaniques des matériaux. Les résultats obtenus par cet essai sur chantier confirment l'effet positif que fournit la fumée de silice sur les matériaux, l'amélioration des performances mécaniques des matériaux traités.

6.3.2. Analyse des caractéristiques géochimiques par l'essai de lixiviation

Des essais de lixiviation des sédiments représentatifs du bassin n°2 a été effectué en 2009 afin d'identifier les caractéristiques géotechniques. Les résultats des essais de lixiviation effectués entre deux périodes avant et après traitement des sédiments ont été analysés.

La comparaison de deux résultats d'analyse des essais de lixiviation a été effectuée. Les résultats d'analyse des sédiments de Port en Bessin (non traité) prélevés des bassin d'essorage des vases, en janvier 2009, le traitement des sédiments sans fumée de silice, est présenté dans la colonne A sur le tableau VI-2. Les résultats d'analyse des sédiments traités avec fumée de silice sont montrés sur la colonne B.

Les résultats d'analyse des essais de lixiviation sont présentés sur le tableau IV-2. Les analyses des sédiments montrent : des teneurs en cuivre (Cu) plomb (Pb), nickel (Ni), chlorures (Cl) et sulfates (SO₄) assez importantes. Ces résultats permettent de classer les sédiments déchet non dangereux d'après les valeurs de référence (Décision du Conseil n° 2003/33/CE). La teneur des autres polluants, spécialement le polluant le plus dangereux (le cadmium) ne dépasse pas le seuil du déchet inerte.

Tableau VI-2 : Caractéristique géochimique (métaux lourds) des sédiments de bassin n°2

Micropolluants	A (Sans FS)	B (Avec FS)	Déchet inerte	Déchet non dangereux	Déchet dangereux
As (mg/kg)	0,13	<0,01	0,5	2	25
Cd (mg/kg)	<0,01	<0,005	0,04	1	5
Cr (mg/kg)	<0,05	<0,01	2	50	100
Cu (mg/kg)	<0,03	0,19	0,01	0,2	2
Hg (mg/kg)			0,01	0,2	2
Pb (mg/kg)	<1	<1,03	0,5	10	50
Ni (mg/kg)	<0,5	0,52	0,4	10	40
Zn (mg/kg)	<0,2	0,21	4	50	200
Se (mg/kg)	<0,1	<0,10	0,1	0,5	7
Mercuré AA (mg/kg)	<0,001	<0,001			
Chlorures en Cl	6980	651	800	15000	25000
Sulfates en SO ₄	2110	134	1000	20000	50000
Florures en F	7,40		10	150	500
COT	289	238	500	800	1000

Par contre, nous pouvons remarquer que le résultat d'analyse après le traitement à la fumée de silice (B) montre une diminution assez importante de la teneur en chlorures et sulfates.

Dans les lixiviats des sédiments après le traitement, on observe une concentration plus importante en cuivre que celle dans les sédiments bruts. Ceci pourrait résulter de la présence des matières organiques. Fantozi (Fantozi 2003) montre dans leur essai que le milieu basique des lixiviats pour des formulations (pH=11 à 12) entraîne une dissolution des matières organiques qui peuvent conduire à une forte mobilité des ions de cuivre même si leur activité » est faible ou très faible en solution

Tableau VI-3 : Caractéristiques géochimiques (micropolluants) des sédiments de bassin n°2

PCB Totaux (mg/kg)	B	N1	N2
PCB 28	<0,02	0,025	0,05
PCB 52	<0,02	0,025	0,05
PCB 101	<0,02	0,5	0,1
PCB 118	<0,02	0,025	0,05
PCB 138	<0,02	0,05	0,1
PCB 153	<0,02	0,05	0,1
PCB 180	<0,02	0,025	0,05

Le tableau VI-3 présente les résultats d'analyse de lixiviation sur les micropolluants des sédiments marins du Port en Bessin. D'après les recommandations GEODE, on constate qu'aucune des valeurs des micropolluants ne dépassent le seuil de N1.

CHAPITRE 2

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Introduction

L'étude bibliographique a été menée avec un but d'orienter nos recherches et à comprendre les mécanismes physico-chimiques qui seront mis en jeu lors des stabilisations des sédiments marins à base de liants hydrauliques (chaux et ciment) plus éventuellement ajoutés des liants pouzzolaniques (fumée de silice et cendre volante). La stabilisation des sols fins aux liants hydrauliques est une technique bien connue en génie civil, dont les mécanismes physico-chimiques sont compris. L'expérience de ce type de traitement apporte une base de travail intéressante pour aborder un traitement similaire avec un ajout de liants pouzzolanique.

2.1. Problématique des sédiments dragués.

2.1.1. Histoire des sédiments dragués en France

Le littoral français, avec environ 6500 km de côte d'une grande diversité, est devenu un espace où les activités marines et terrestres, de la pêche, des cultures marines se côtoient.

La sédimentation des matières en suspension d'origine continentale ou marine peut empêcher l'accès des navires aux installations portuaires. Le dragage portuaire constitue une activité vitale pour l'exploitation des ports. D'après Alzieu (Alzieu *et al.* 1999) nous pouvons distinguer trois types de dragage : le dragage d'entretien, le dragage d'approfondissement et le dragage d'aménagement de nouvelles aires portuaires. D'après les sources chiffrées de ministère de l'Équipement des transports et du Logement (citée dans la thèse de Agostini. 2006) les volumes les plus importants de matériaux déplacés le sont par les grands ports (figure II-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 6,2 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, draguent un volume moyen annuel de 6,2 millions de mètres cubes, composés par environ 20% de sable et 80% de vase. D'après Foucher (Foucher 2005) ces cinq grands ports maritimes draguent un volume moyen annuel de 4 millions tonnes (Tableau II-2), par contre les quantités draguées des ports situés sur la Méditerranée sont les plus faibles, l'entretien du port de Marseille en 2002, à nécessité le dragage d'environ 173 000 tonnes. La part importante que prennent ces grands ports (3/4 des volumes dragués) ne doit pas faire oublier les dragages, moins conséquentes en volume, des multiples autres enclaves portuaires, qui peuvent poser des problèmes du fait de la nature et de la concentration des polluants (Alzieu 1999)

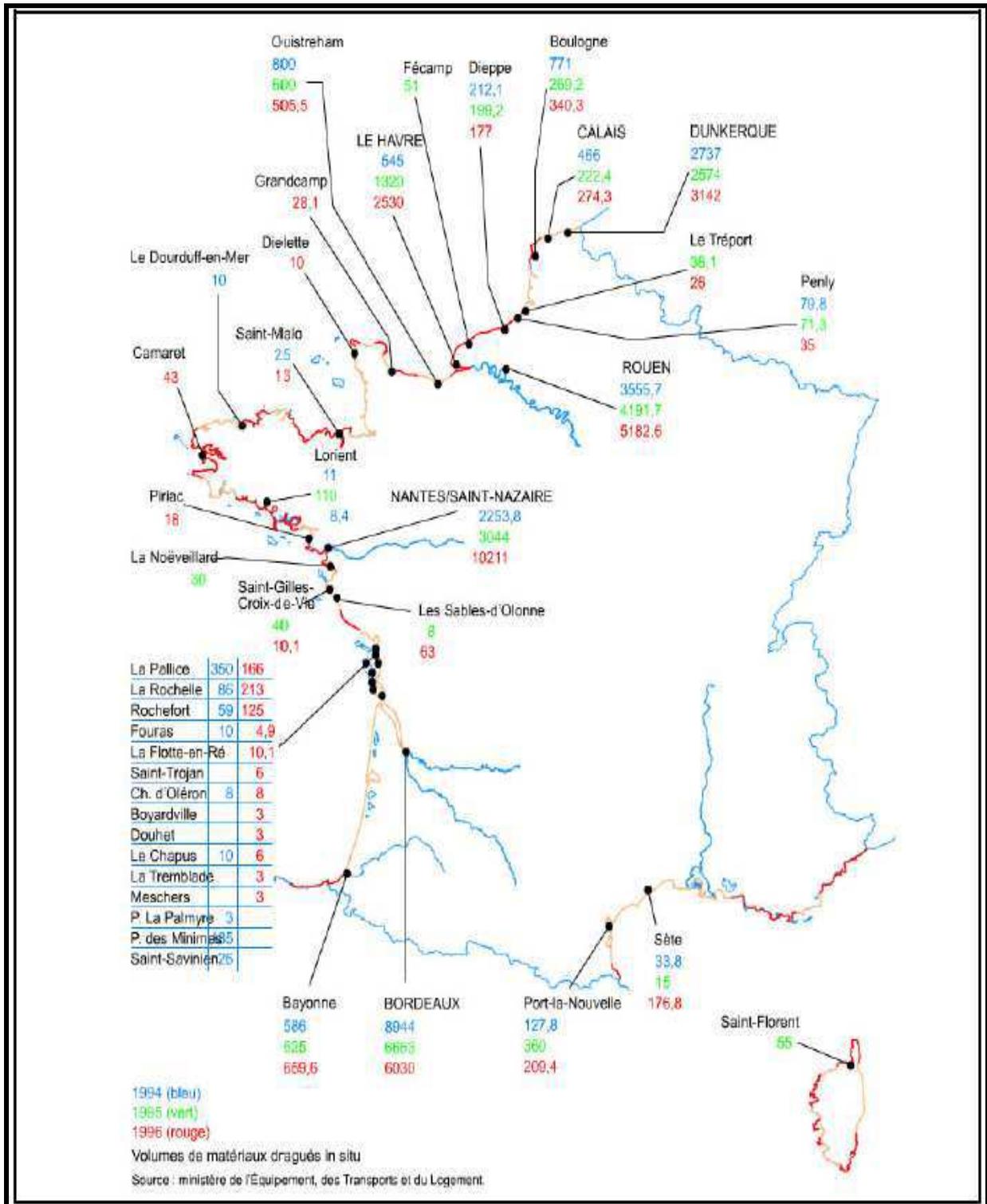


Figure II-1 : Données relatives aux matériaux dragués dans les ports français en 1994, 1995 et 1996. www.ifremer.fr (cité dans la thèse de Agostini 2006)

Tableau II-1 : Quantité de matériau dragué dans quelques port français d'après Foucher (Foucher 2005) (valeur exprimé en mille tonnes du matériau sec)

Port	2001	2002	2003
Bordeaux	6523	5897	7275
Rouen	5979	5871	5265
Nantes/Saint-Nazaire	4820	4190	1655
Dunkerque	2071	1821	1473
Calais	561	236	532
Boulogne	722	708	445
Le Havre	15013	5677	788
La Rochelle	406	8	166

A ceux ci s'ajoutent les dragages, moins conséquents en volume, des multiples autres enclaves portuaires. Environ 50 millions de mètres cubes de sédiments sont dragués en moyenne par an.

Tableau II-2 : Quantité de matériau de dragage déversé en mer dans quelques pays européens, source OSPAR 2004-2005 (cité dans la thèse de Thanh)

Pays	2001	2002	2003
Allemagne	20,98	22,46	7,79
Angleterre	18,54	16,37	17,52
Belgique	28,6	27,59	24,81
France	21,07	/	/
Pay Bas	12,84	10,75	7,72
Danemark	1,75	1,79	2,69
Irlande	1,48	0,78	0,69
Norvège	1	0,64	
Espagne 3,08	5,09	/	/
Portugal	0,92	0,58	0,71
Suède	/	0,38	/
Islande	0,52	/	/

Selon l'enquête annuelle de la commission d'OSPAR (Tableau II-2) nous pouvons constater que la plupart des matériaux dragués et immergés sont effectués par cinq pays, Belgique, Allemagne, France et Pays-bas (cité dans la thèse Thanh T. N. 2009). Lorsque la zone dragage est à proximité de site industriel polluant, dues aux activités humaines et industrielles, les sédiments à draguer peuvent s'avérer fortement contaminées. Parmi les substances chimiques émises dans l'environnement certaines s'accumulent dans les sédiments au fond des rivières ainsi que dans les estuaires et les fonds marins. Les substances néfastes sont des composés organique et de métaux dont certain sont particulièrement dangereux, tous ces polluants posent un problème majeur sur la gestion des sédiments. La difficulté de gérer les sédiments pollués fait que le devenir de ces produits devient complexe. Dans la partie suivante nous allons présenter l'origine des sédiments, polluants et l'aspect réglemente.

2.1.2. Origine et composition des sédiments

Les sédiments vaseux appartiennent à une large famille de sédiments fins argileux, plus ou moins organiques, peuvent atteindre des teneurs en eau très supérieure à la limite de liquidité. Elles contiennent une phase minérale dont la granulométrie

D'après Schneider (Schneider, 2001) les sédiments ont principalement deux origines :

- a. L'origine endogène de la sédimentation provient de la production autochtone du milieu. Cette production primaire engendre des débris de macrophytes (plantes aquatiques, cadavres de microphytes et d'animaux).
- b. L'origine exogène vient d'un apport de matières allochtones. Celles ci sont issues du ruissellement des fleuves, effluents ou de l'atmosphère (cf. photo 1-1). Cet apport peut être d'origine naturelle érosion des sols, décomposition de la matière végétale), ou anthropique (apports de matière suspension, de matières organiques, de nutriments ou de micro-polluants en raison des rejets agricoles, industriels et domestiques)

La formation de sédiment vaseux est liée à la sédimentation de particules élémentaires ou agglomérées, provenant de l'érosion des sols et des roches. Ce sédiment est transporté et déposé par le cours d'eau, et n'ayant pas encore subi de transformation diagénétique (passage à une roche sédimentaire par compression des sédiments, accompagnée d'une évacuation de l'eau et de la pression).

La composition minérale des sédiments diffère selon leur provenance (Schneider, 2001) :

- a. Les blocs, les cailloux, les graviers et les sables sont des sédiments terrigènes c'est-à-dire, issus de l'érosion des sols ; leur nature chimique dépend principalement des terrains érodés.
- b. Les sables sont essentiellement quartzeux (silice SiO_2) ou silicatés (mica, feldspath), souvent accompagnés de minéraux lourds (amphiboles, grenats, disthène...) qui dépendent de la nature des sols érodés. On trouve aussi des sables calcaires (ex : les sables de la Seine).
- c. Enfin, les particules les plus fines, limons, boues et vases, sont composées de minéraux argileux d'origine terrigène, et aussi des squelettes d'organismes d'origine endogène

2.1.3. Facteurs d'adsorption des contaminations

Adsorption des contaminants dans les sédiments marins est un phénomène de surface par lequel des atomes ou des molécules se fixent sur la surface solide d'un substrat selon divers processus. Certains minéraux comme les argiles ou les zéolites sont d'excellents adsorbants, grâce à leur très grande surface spécifique. On appelle désorption la transformation inverse de l'adsorption, par laquelle les molécules ou les atomes adsorbés se détachent du substrat.

2.1.3.a. Granulométrie

Les différents sédiments font l'objet de classifications granulométriques, c'est-à-dire de classification sur la taille des particules. Le tableau III-3 montre une classification de sols en vue de dragages d'après l'AIPN (Association Internationale Permanente des Congrès de Navigation). Il existe plusieurs nomenclatures qui varient avec les auteurs, la classification de sédiment suivant différentes auteurs sont présentés sur le tableau II-3

Tableau II-3: Classification des sols en vue des dragages d'après l'AIPCN

Dénomination		Identification par taille des grains	Commentaires
Blocs, Cailloux	Granuleux (sans cohésion)	> 200 mm 60 à 200 mm	
Graviers		Gros : 20 à 60 mm, Moyens : 6 à 20 mm Fins : 2 à 6 mm	
Sables		Gros : 0,6 à 2 mm Moyens : 0,2 à 0,6 mm Fins : 0,06 à 0,2 mm	
Limons	Doués de cohésion	Gros : 20 à 60 µm Moyens : 6 à 20 µm Fins : 2 à 6 µm	Les limons humides sont pétrissables, une simple pression des doigts pulvérise les mottes séchées
Argiles		< 2 µm	Présentent une cohésion et une plasticité importantes. Un échantillon humide colle aux doigts et paraît lisse et onctueux au toucher. Les fragments secs ne se réduisent pas en poudre. Au cours du séchage ils se contractent et se fissurent en acquérant une haute résistance au cisaillement.
Tourbes et terres organiques	Organiques	Non applicable	Sont identifiables par leur couleur noire ou brune et souvent par leur forte odeur et par la présence de matières fibreuses ou ligneuses.

Les sédiments peuvent fixer les contaminants durant plusieurs dizaines d'années. Une modification physico-chimique des solides peut faire varier la biodisponibilité des contaminants, notamment à mesure que la profondeur d'eau augmente (condition aérobie puis anaérobie). Les contaminants organiques n'interviennent pas dans ces transformations, et 40 à 70% des métaux lourds et la majorité des hydrocarbures chlorés peu solubles se maintiennent dans les solides en suspension et pénètrent dans les sédiments.

On distingue quatre types de processus d'adsorption des contaminants :

- a. Précipitation des métaux lourds sous forme de carbonates
- b. Adsorption ou co-précipitation sur les surfaces minérales (oxydes) ou biologiques (accumulation)
- c. Dispersion des composés organiques et minéraux parmi les solides en suspension
- d. Décantation de certaines substances en aval d'un lieu de rejet, d'une embouchure ou d'un élargissement

Les résultats de l'analyse granulométrique et la connaissance de la répartition des contaminants en fonction de la distribution granulométrique sont des indicateurs pour la décontamination. Dans ses travaux de recherche, sur la caractérisation des sédiments du Port Hambourg et d'une zone portuaire de Montréal, Gosseline (Gosselin et al. 1999) démontre que la fraction fine (argile et limon) contenait presque la totalité de la contamination alors que la fraction grossière des sédiments traité comportait pratiquement nulle. Les analyses de recherches ont démontré Les contaminants inorganiques présents étaient situés dans la portion fine (<45µm). Dans le cas des contaminants inorganiques, la décontamination dépend étroitement de la granulométrie du matériau

2.1.3. b. Matière organique

Les matières organiques des sédiments peuvent se présenter sous formes diverses, il s'agit de débris végétaux, soit des micro-organisme algaires, virus, bactéries ou débris végétaux.

D'après Schneider (Schneider 2001) La proportion de matière organique dans la matière sèche des sédiments varie entre 90%, dans le cas de la tourbe, et 2% pour les sables de rivière. La composition de cette matière organique est généralement identique d'un type de sédiment à un autre. En général, la proportion de matière organique est de l'ordre de 2 à 10% pour les sédiments des cours d' "eaux vives" et elle est constituée à 60% de composés humiques.

D'après Busnot (Busnot 1991) la fraction organique d'un sédiment comprend deux catégories :

- a) Les substances non humiques, regroupant les substances non humiques, correspond à des composés relativement simple et de structure connue appartenant à la chimie classique.
- b) Les substances humiques, rassemblent des composés qui ne peuvent être rattachés à aucun groupe de la chimie ou de la biochimie. La fraction organique par les substances humiques peut constituer d'une famille de macromolécules organiques d'origine naturelle. Elle provient de l'évolution des matières organique fraîches sous des processus chimiques et enzymatiques. L'analyse de Colin (Colin 2003) a démontré que cette substance humique peut constituer entre 85 et 90% de la fraction organique totale du sol.

2.1.3.c. Effet des matières organiques sur la stabilisation des sédiments.

La présence des matières organiques provoque une modification des caractéristiques géotechniques du sol. En effet l'interaction entre les matières organiques et les fractions minérales qui modifient les caractéristiques géotechniques du sol.

La figure II-2 montre les résultats de travaux de recherche menant à la stabilisation des sédiments du port d'Ouistreham, les analyses ont démontré que

l'addition de matière organique dans les sédiments augmente sa limite de liquidité (Rekik B. et Boutouil M. 2008). De même l'étude d'expérimentale menée par Odell (Odell *et al.* 1996) et a montré que l'addition de matière organique dans le sol augmente sa limite plasticité. Colin (Colin 2003) a mentionné que la présence de matières organiques provoque une diminution de la perméabilité des sédiments traités.

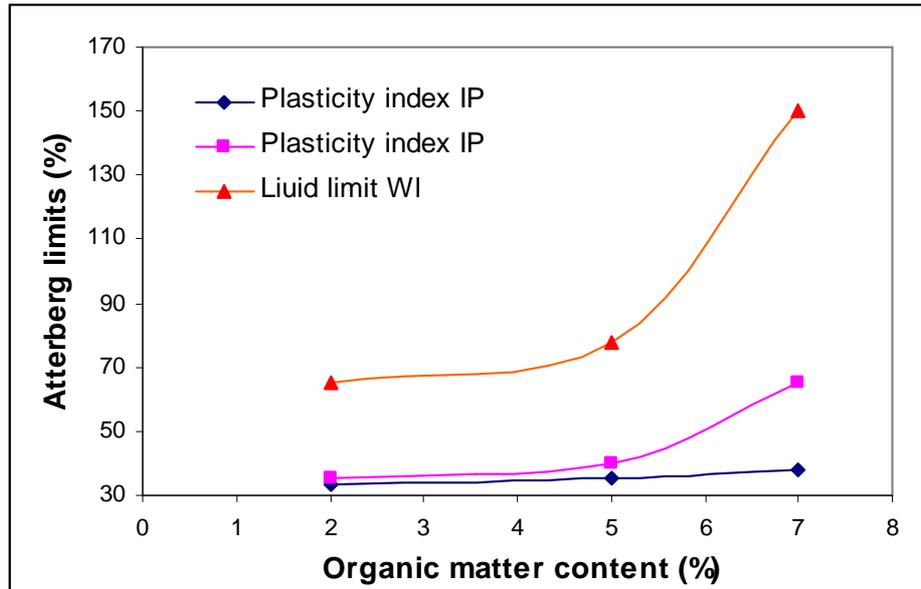


Figure II-2 : L'évolution de limite d'Atterberg avec différents pourcentage de matières organiques

Concernant l'étude de l'influence de la présence de matières organiques sur la stabilisation des sédiments, plusieurs chercheurs ont constaté que les matières organiques affectent l'efficacité de la stabilisation des sédiments au ciment. Tremblay (Tremblay *et al.* 2002) ont mentionné que la résistance au cisaillement des sédiments contaminés par des matières organiques après traitement au ciment est en fonction de la nature des matières organiques présentes dans les sédiments traités. Lorsqu'un traitement au ciment est envisagé, la MO peut perturber les réactions du liant en retardant le processus d'hydratation ou en l'inhibant (Tremblay et al., 2002). Ces perturbations se manifestent par une réduction de l'efficacité du traitement et de la résistance mécanique du matériau traité.

L'influence de la teneur en MO et du dosage en ciment a été mise en évidence dans les travaux de Rekik (Rekik 2008). Du fait de leur finesse et de leurs teneurs en eau élevées, ces matériaux sont très compressibles. La réduction de la teneur en MO permet de réduire légèrement leur compressibilité et d'accélérer le processus de consolidation primaire. Lorsque le traitement est effectué à une teneur en eau élevée tel est le cas dans cette étude, il réduit leur compressibilité et augmente leur pression de préconsolidation (σ'_{pc}). La teneur en MO est un facteur important lorsqu'un traitement au ciment est envisagé tant de point de vue efficacité du traitement que de point de vue économique. En effet, les résultats de cette étude montrent que les propriétés du sédiment contenant 7% de MO traités avec 10% de ciment sont comparables à celles du sédiment contenant 2% de MO traité avec 5% de ciment. (Figure II-3)

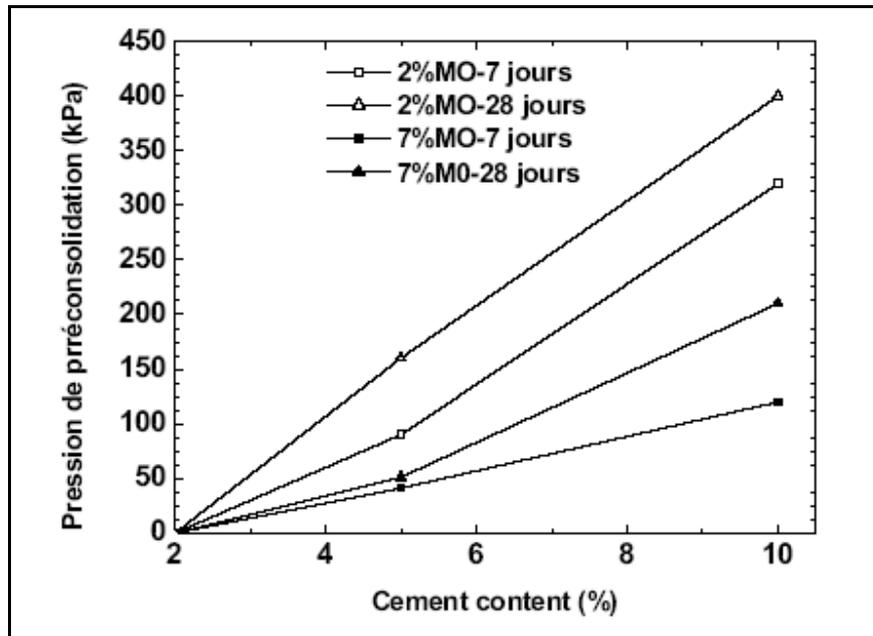


Figure II-3 : Evolution de la pression de pré consolidation (σ'_{pc}) en fonction du dosage en ciment et de la teneur en MO.

2.2. La contamination des sédiments

2.2.1. Origine de la pollution

La contamination a commencé à la fin du siècle dernier. Cette pollution est principalement due aux rejets industriels et urbains. Les contaminants à l'origine de cette pollution sont généralement classés en trois grands groupes (SCHNEIDER 2001)

2.2.1.a Les éléments nutritifs

Ces éléments nutritifs contiennent notamment le phosphore et des composés azotés comme l'ammoniaque. Ils proviennent des rejets d'eaux usées urbaines et d'effluents agricoles et industriels. Ils sont à l'origine de l'eutrophisation des milieux.

2.2.1.b Les métaux lourds

Ces métaux lourds, ils se retrouvent souvent à l'état de traces, indispensables au métabolisme pour la plupart (sauf le plomb, le mercure et le cadmium.) Une fois dépassé un seuil de tolérance, les métaux sont considérés comme toxiques. Ils sont alors incompatibles avec les phénomènes vitaux et certains d'entre eux ont des propriétés cancérogènes et mutagènes.

Les principaux métaux lourds sont le cadmium, le chrome, le cuivre, le plomb, le mercure, le nickel, le sélénium, l'arsenic (métalloïde) et d'autres éléments spécifiques au passé industriel (argent).

Les métaux lourds peuvent être fixés sur les particules minérales et les matières organiques des sédiments. Un autre mode d'immobilisation peut être lié aux phénomènes de précipitation. Les métaux précipitent alors sous des formes plus ou moins insolubles d'oxydes, d'hydroxydes, de carbonates, de phosphates, ou de sulfures. Les métaux piégés dans le sédiment sont en général en équilibre avec l'eau interstitielle. Mais la moindre perturbation de l'environnement peut remobiliser les métaux.

Tableau II-4 : Sources de pollution des métaux lourds citée dans le guide méthodologique d'enlèvement des sédiments, (Baize et Janiec, 1994)

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

La présence de polluants dans les sédiments peut entraîner, en cas d'épandage, des nuances que ce soit par la contamination des eaux souterraines ou bien par une inhabitation de la croissante des végétaux ou encore par transfert dans les plantes et les organismes (contamination de la chaîne alimentaire).

Les origines de la présence des métaux dans les vases sont variées et chaque métal comme le montre le tableau II-4 détaille les sources de pollution des métaux lourds d'après Baize et Janiec (1994)

Les plus dangereux sont le mercure et le cadmium qui ne possèdent aucune activité biologique favorable; ils bloquent l'activité enzymatique indispensable au métabolisme (oxygénation, digestion, reproduction) alors que le plomb, le nickel, le chrome ou le zinc, s'accumulent dans les organes comme le foie et des reins ce qui entraîne la mort. Deux facteurs accentuent la gravité des polluants métalliques. D'une part, ils s'accumulent dans l'environnement et en particulier dans les sédiments. Cependant les sédiments ne constituent pas un simple réservoir, ils doivent être considérés comme de véritables réacteurs biochimiques, ils les adsorbent, les transforment en modifiant leur biodisponibilité et les recyclent vers la colonne d'eau et la flore et la faune.

La concentration totale d'un métal dans l'eau ou dans un sol ne permet pas de déduire les risques de toxicité ou la mobilité dans l'environnement. En effet, de nombreuses études ont montré que la toxicité des métaux lourds est étroitement liée à leur forme chimique (ion; complexes minéraux : hydroxydes, carbonates ou complexes avec les acides humiques, fulviques, aminés). Cependant le plus souvent, les formes hydratées sont plus toxiques (Cu, Cd, Zn) que les formes complexées, et la toxicité décroît avec la stabilité des complexes (BARRON, 1991).

2.2.1.c. Les micro-polluants organiques

Ils représentent le troisième grand groupe de contaminants (les HAP: hydrocarbures polycycliques aromatiques, pesticides, solvants chlorés, PCB). Les molécules organiques toxiques sont, pour la plupart, des produits fabriqués par l'homme. Il en existe des dizaines de milliers et 60000 sont couramment utilisées. Par exemple, les composés organiques chlorés, qui n'existent pas naturellement, ne sont pas décomposés par les organiques vivants. Leur durée de vie est de ce fait importante. Les solvants chlorés s'attaquent à la membrane des fibres nerveuses alors que certains pesticides des influx nerveux et anormaux. Ces éléments sont souvent très toxiques, solubles ou adsorbés sur les matières en suspension. En définitive, la sédimentation (donc l'envasement) est un phénomène naturel qui voue le plan d'eau à disparaître naturellement par comblement. Les problèmes que pose cette sédimentation à l'heure actuelle, viennent de l'augmentation de la vitesse d'envasement ainsi que de la toxicité accrue des sédiments.

Les polychlorobiphényles, plus communément appelés PCB, sont des substances organiques de synthèse, considérées comme des polluants chimiques prioritaires. Ces produits sont ininflammables, inertes vis-à-vis des acides, des bases et il faut une température supérieure à 1000°C pour permettre leur dégradation complète. La contamination actuelle résulte d'une persistance exceptionnelle des PCB dans l'environnement, conséquence de leur stabilité chimique. Ce premier caractère, s'ajoute d'une très grande liposolubilité qui explique leur tendance à accumuler dans les tissus lipidiques des organismes vivants. Le milieu marin serait le milieu récepteur principal des PCB et la zone la plus contaminée en France est l'estuaire et la baie de Seine. La contamination des sédiments marins résulterait d'un processus d'adsorption des PCB sur les matières en suspension (MES) aboutissant donc à un transfert vertical de ces composés vers les couches profondes, la fraction adsorbée dans les zones

estuariennes atteignant 89% de la teneur totale (voir 94% à 98% dans les bouchons vaseux) (Marchands *et al.*, 1990)

2.2.2. Exemples de méthodes de stabilisation des métaux lourds dans les sols

Les argiles sont souvent utilisées comme une alternative économique au charbon actif, pour le traitement des eaux. Mais elles peuvent aussi être utilisées comme amendement pour augmenter la C.E.C. (Capacité d'Echange en Cations) du sol. Il existe de nombreux minéraux argileux qui peuvent être utilisés pour leur capacité à retenir les métaux lourds. Parmi les différents minéraux argileux existants, les regards se sont tournés vers la palygorskite car des symptômes de déficience en zinc ont été observés sur des plantes poussant sur des sols riches en palygorskite (Álvarez Ayuso & García-Sánchez, 2003). Une étude a montré que ce minéral permet d'adsorber efficacement le plomb, le nickel, le chrome, et le cuivre à partir d'une solution aqueuse (Potgieter *et al.*, 2006). L'adsorption des métaux dans des solutions monométalliques se fait alors dans l'ordre d'efficacité suivant : $Pb > Cr > Ni > Cu$. De plus, ces capacités d'adsorption ne varient pas beaucoup avec le pH (pH testé : de 3 à 10), sauf pour le plomb qui est difficilement adsorbable à des pH inférieurs à 7.

D'autres auteurs (Álvarez-Ayuso & García-Sánchez, 2003) pointent la taille des particules de palygorskite comme facteur de première importance pour ses capacités de sorption. Cette étude montre que la taille des particules peut faire varier les capacités de sorption de la palygorskite d'un facteur supérieur à 3 pour certains métaux, les particules fines étant plus efficaces.

Nous nous intéressons particulièrement au cas des métaux lourds pour lesquels les mécanismes de l'hydratation nous permettront d'évaluer l'impact sur l'environnement des déchets stabilisés lors de leur stockage ou de leur valorisation. Les métaux lourds (Cd, Cr, Pb, Cu, Zn etc) se trouvent généralement dans les déchets faisant l'objet de procédés de stabilisation. L'interaction ciment-déchet et la spéciation des métaux se trouvant dans la matrice de ciment après l'hydratation sont présentées ci-dessous. La spéciation des métaux est étudiée à l'aide des analyses minéralogique et des techniques de dopage par les déchets synthétiques.

1. Cas du Plomb

Il est présent sous les degrés d'oxydation +2 et +4. Il peut se substituer au calcium dans les hydrates. Le plomb retarde l'hydratation des ciments, car il précipite sous forme, très peu soluble, de sulfate ou de carbonate sur la surface des silicates de calcium et d'aluminium (Cartledge & Butler, 1990 ; Cocke & Mollah, 1993 ; Cocke *et al.*, 1989 ; Fowler & Asavapisit, 1995 ; Macphee & Glasser, 1993). Cela forme une couche imperméable, qui gêne la diffusion de l'eau et par conséquent, l'hydratation. On le retrouve aussi sous les formes PbO ou $Pb(OH)_2$. Il peut également être présent sous la forme d'ion complexe $Pb(OH)_3$, qui forme des sels plus solubles que PbO ou $Pb(OH)_2$ (Cartledge & Butler, 1990). Dans des environnements très basiques, il peut se former des ions complexes pouvant contenir jusqu'à six atomes de Pb (par exemple $[Pb_6O(OH)_6]^{4+}$) (Cocke & Mollah, 1992)

2) Cas du zinc

Le zinc est présent particulièrement dans le gâteau de filtration de traitement des eaux usées issus de procédés de galvanisation ainsi que dans les résidus d'incinération des déchets et de la métallurgie. Le ZnO arrête grandement l'hydratation du ciment et le Zn²⁺ retarde la formation de la Portlandite pendant le premier jour de l'hydratation.

3) Cas du chrome

On le trouve sous les formes +3 et +6, la forme +6 étant la plus toxique pour l'environnement. Son rôle sur la prise du ciment est encore mal cerné. Le chrome peut se substituer à l'aluminium, au calcium ou à la silice dans les hydrates ; dans les C-S-H, CrO₄²⁻ il peut se substituer à SiO₄⁴⁻ (Kindness *et al.*, 1994 ; Lin *et al.*, 1997). Au cours de l'hydratation, le Cr³⁺ est oxydé en Cr⁶⁺ (Diet, 1996 ; Fowler & Asavapisit, 1995). Pour stabiliser le chrome avec du ciment Portland, il faut donc utiliser des agents réducteurs pour favoriser la forme +3, la forme +6 n'étant pas stabilisée avec du ciment Portland (Zamorani *et al.*, 1988). La présence de chrome augmente la formation d'ettringite (Poon *et al.*, 1986)

4) Cas du Cadmium

Son degré d'oxydation est +2 et il peut se substituer au calcium dans les hydrates. Au cours de l'hydratation, il peut se retrouver sous forme d'hydroxyde (Cd(OH)₂) qui a une très faible solubilité en milieu alcalin (Macphee & Glasser, 1993) ou sous la forme CaCd(OH)₄ (Cocke & Mollah, 1992). Cd(OH)₂ peut servir de centre de nucléation pour les C-S-H. De manière générale, les ciments et les agents pouzzolaniques sont efficaces pour stabiliser le cadmium (Heimann *et al.*, 1992) mais pas le laitier (Akhter *et al.*, 1990). La présence de cadmium augmente la formation d'ettringite (Poon *et al.*, 1986).

5) Le cuivre a un effet retardateur sur l'hydratation. Les formes Cu(OH)₂ et CuSiO₃.H₂O sont produites pendant l'hydratation (Kakali *et al.*, 1998).

6) Cas de Mercure

On peut le retrouver sous sa forme HgO (Kakali *et al.*, 1998). Il a été observé que sa présence est souvent accompagnée de carbonates (de calcium et autres), qui se forment avec le dioxyde de carbone atmosphérique, ce qui peut affecter la structure cimentaire (Cocke, 1990 ; Cocke & Mollah, 1993 ; McWhinney *et al.*, 1990). Le mercure est efficacement immobilisé par un ciment enrichi en sulfate.

Le pH joue un rôle important dans l'interaction chimique entre les hydratés du ciment et les métaux lourds. Dans la solution basique, les cations métalliques se combinent avec les anions hydroxydes (OH⁻) pour donner naissance à des hydroxydes métalliques peu ou pas solubles, selon la réaction suivante (Thanh 2009).



2.2.3. Règlement de la gestion des sédiments

2.2.3.1. Le statut juridique d'un déblai de dragage extrait de son milieu d'origine

En France, la dangerosité des sédiments pourrait également être caractérisé à partir des normes sols et boues utilisés dans le domaine des boues de station d'épuration (décret n°97-1133 du 8 Décembre 1997 et arrêté du 8 Janvier 1998).

L'arrêté du 14 Juin 2000 relatif aux niveaux de référence à prendre compte lors d'une analyse de sédiment marins ou estuarien ou milieu naturel ou portuaire. Le tableau II-5 indique les paramètres et valeurs retenus, qui sont susceptible d'être modifiés en fonction de l'évolution des connaissances. Ce sont des seuils de contamination à partir desquelles doit être apprécié l'incidence de l'opération sur le milieu.

Tableau II-5 : Niveaux de référence selon L'arrête du 14 Juin 2000

Paramètres	Référentiel de Qualité immersion (arrêté 14 Juin 2000)	
	N1	N2
Micropolluants		
As (mg/kg)	25	50
Cd (mg/kg)	1,2	2,4
Cr (mg/kg)	90	180
Cu (mg/kg)	45	90
Hg (mg/kg)	0,4	0,8
Pb (mg/kg)	100	200
Ni (mg/kg)	37	74
Zn (mg/kg)	276	552
Fluoranthène	0,4	5
Benzo(b) fluoranthène	0,3	3
Benzo (k) fluoranthène	0,2	2
Benzo (a) Anthracène	0,2	2
Indénopyrène	0,2	1
Benzo (ghi) pérylène	0,2	2

Une décision à été prise par le conseil de l'union européenne le 19 décembre 2002 établissant des critères et procédures d'admission des déchets dans les décharges, conformément à l'article 16 de la directive 1999/31/CE (Aida). Elle a permis la définition de trois seuils pour : les déchets inertes, les déchets non dangereux et les déchets dangereux (Tableau II-6)

En l'absence de valeur guides, des acteurs de la gestion des curages/dragages comme par exemple le port autonome de Rouen et les VNF ont été amenés à développer leur propres valeurs guides.

Tableau II- 6: Extrait des valeurs limites (test de lixiviation sur la base d'un ratio liquide solide de 10 l/kg)

Elément Traces (en mg/kg)	Déchets inertes	Déchets non dangereux	Déchets dangereux
As	0,5	2	25
Ba	20	100	300
Cd	0,04	1	5
Cr	0,5	10	70
Cu	2	50	100
Hg	0,01	0,2	2
Mo	0,5	10	30
Ni	0,4	10	40
Pb	0,5	10	50
Sb	0,06	0,7	5
Se	0,1	0,5	7
Zn	4	50	200
Chlorures	800	15000	25000
Fluorures	10	150	500
Sulfates		20000	50000
Indices Phénols	1	-	-
COT	500	800	1000
Fraction soluble	4000	60000	100000

Le port autonome de Rouen a proposé une grille de classification de la qualité des produits de dragage continentaux dont il assure la gestion. Les sédiments sont classés selon les indices de qualité. Une grille de catégorie de concentration est établie pour les métaux lourds (voir tableau II-7), les PCB et les HAP. Cette classification n'as pas de statut réglementaire officiel mais elle a été mise au point en collaboration avec la DRIRE locale. Ces indices de qualité constituent essentiellement des indices de suivi de l'évolution de la qualité chimique des sédiments sans définir spécifiquement de schéma de gestion.

Tableau II-7 : Valeurs de référence du port autonome de Rouen

Catégorie	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Zn
1	<10	<0,8	<50	<35	<0,3	<25	<100
2	10.- 20	0,8-2,4	50-150	35-100	0,3-1	50-100	100-250
3	20-30	2,4-6	150-250	100-200	1.-2	100-250	250-750
4	30-50	6.-12	250-500	200-300	2.-4	250-500	750-1500
5	50-100	12.-20	500-1000	300-500	4.-10	500-1000	1500-3000
6	>100	>20	>1000	>500	>10	>1000	>3000

Les VNF ont établi des consignes de caractérisation des sédiments continentaux à draguer en terme qualitatif, quantitatif et devenir décollant, visant à proposer à leur

service une procédure unifiée lors de la gestion des curages. Ces seuils, au nombre de deux, permettent d'établir 3 catégories de sédiments :

- a) **Catégorie 1** : en dessous du seuil 1 : la valorisation des produits de dragage est recommandée, elle peut être faite sur des terres agricoles alimentaires; il existe aucune restriction dans le devenir de ces produits.
- b) **Catégorie 2** : aucune teneur des produits dragage en l'un de ces éléments n'est supérieure à la teneur de référence correspondante (seuil 2). Les conditions d'application de la catégorie 2 permettent de valoriser ou de stocker les produits de dragage, seul le régalage sur des terres agricoles est à proscrire.
- c) **Catégorie 3** : la teneur en un ou plusieurs éléments est supérieur à la teneur de référence correspondante (seuil 2). La valorisation ou le stockage des produits nécessite la mise en place d'une étude de faisabilité relative à la destination du produit de dragage.

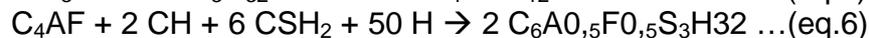
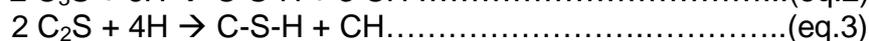
Le seuil 1 correspond aux valeurs limites « sol » pour les métaux telles que définies dans l'arrête du 8 Janvier 1998 (fixant les prescription techniques applicables aux épandages de boues issues du traitement des eaux usées, sur les sols agricoles). Le seuil 2 a été défini arbitrairement ; les valeurs qui composent sont comprises entre les valeurs limites « sol » et « boues » de l'arrête du 8 janvier 1998

2.3. Stabilisation des sédiments

2.3.1. Ciment

Le liant hydraulique les plus utilisés pour la traitement des sédiment pollués est ciment Portland (Yin et Lai 1998).L'hydratation du ciment provoque des corps monolithiques obtenus réduit la superficie disponible pour lixiviat des métaux lourds et la perméabilité du produit. La lixiviation des métaux lourds est liée à la relation de leur solubilité et leur diffusion dans des pores vides de la matrice cimentaire. La réduction de la porosité et la perméabilité rend les matériaux cimentaire plus durables. Donc il semble que les déchets solidifiés avec du ciment améliorent les performances contre la diffusion.

Les principales réactions de l'hydratation peuvent être résumées par ces équations schématiques (en notation cimentière) (Lea, 1970 ; Taylor, 1990) :



Le C3S s'hydrate pour donner du gel C-S-H et de la portlandite (eq.2). La majeure partie de l'hydratation se fait en 28 jours, mais la réaction complète peut durer 1 an. Le C2S s'hydrate aussi pour donner du C-S-H et de la portlandite (eq.3), mais dans ce cas, il se forme moins de portlandite. En présence de gypse, le C3A produit de l'ettringite (eq.4) ; en l'absence de gypse il produit diverses phases cristallines avec différents rapports C/A. Quand le gypse est consommé et qu'il reste encore des C3A non hydratés, il réagit avec l'ettringite pour donner du monosulfate (eq.5). En présence de gypse, l'hydratation du C4AF donne de l'ettringite où l'aluminium est partiellement remplacé par le fer (eq.6). Les phases ainsi formées par un ciment Portland complètement hydraté (seul, dans des conditions normales) sont les suivantes :

- 1) Gel C-S-H : ce sont des silicates de calcium, mal structurés et de stoechiométrie variable, ce qui les distingue des autres hydrates de ciment cristallins, tels que la portlandite (Guillon, 2004). Mais leur étude par diffraction des rayons X a permis de mettre en évidence qu'il ne s'agit pas d'un matériau amorphe, car il existe quand même un ordre local sur plusieurs dizaines d'angström (Taylor, 1990). Il existe trois familles de C-S-H selon leur rapport Ca/Si ; cette composition dépend de la nature de la solution interstitielle (Damidot *et al.*, 1995). Cette phase représente 50 à 70 % de la masse totale des hydrates
- 2) Portlandite : ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ ou CH en notation cimentière) : Ce minéral se présente sous forme de fines plaquettes hexagonales qui s'empilent en amas compacts (10 à 20 % de la masse des hydrates).
- 3) L'ettringite ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ou $\text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_{32}$ en notation cimentière) est le premier minéral qui apparaît lors de l'hydratation ; on parle alors d'ettringite primaire. Elle peut aussi se former post durcissement (ettringite secondaire) (Benzaazoua, 1996). Elle se présente sous forme d'aiguilles. Les monosulfates ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ou $\text{C}_4\text{ASH}_{12}$ en notation cimentière) cristallisent sous forme de plaquettes hexagonales ou de roses des sables. Leur quantité dépend de la quantité de sulfate et de C3A disponible initialement
- 4) Constituants mineurs et clinker non hydraté

2.3.1.1. Traitement des sédiments au ciment

L'action immédiate du ciment est limitée. Cependant lors de l'utilisation d'un liant hydraulique comportant une forte proportion de chaux, la floculation des argiles peut se produire (GTS. 2000) plus généralement les liants hydrauliques sont considérés comme des correcteurs granulométriques améliorent les caractéristiques du sol lors du compactage et de l'essai de portance immédiate (Venuat. 1980)

Les liants hydrauliques les plus utilisés pour la stabilisation des déchets sont des ciment Portland, des ciments, de laitier au clinker et d'autres déchets ayant une propriété pouzzolanique, des ciments de laitier au clinker et d'autres en présence des déchets contenant des polluants complexes. Pendant l'hydratation du ciment deux

principaux phénomènes ont lieu. Le premier, les espèces polluantes sont piégées dans la structure du ciment, cela diminue physiquement leur mobilité. Le second, elles peuvent réagir avec une autre espèce cimentaire pendant les réactions d'hydratation, cela peut changer la spéciation chimique, et les rendre moins soluble et moins mobile.

L'utilisation de liant hydraulique permet donc, en plus de la stabilisation, de solidifier le matériau. La stabilisation se fait par divers mécanismes :

1. Piégeage mécanique : Des contaminants métalliques peuvent agir comme centre de nucléation et restent piégés dans les hydrates ainsi formés (Murat & Sadok, 1990 ; Roy *et al.*, 1992).
2. Précipitation : La matrice cimentaire étant un milieu fortement alcalin, elle favorise la précipitation d'hydroxydes métalliques (Conner, 1990).
3. Adsorption : Les hydrates de ciment possèdent une bonne capacité d'adsorption, et particulièrement les C-S-H (Cocke, 1990).

Intégration dans les hydrates : Tous les hydrates peuvent intégrer des contaminants métalliques par substitution (de Al, Ca, Fe, Si, sulfates) dans le réseau cristallin. Mais les CS-H ont, en plus, la capacité de piéger des contaminants dans leurs espaces interfoliaires (Bhatty, 1987).

Plusieurs études effectuées montrent que les métaux lourds retardent l'hydratation du ciment Portland. Asavapisit (Asavapisit *et al.* 2005) ont démontré que plusieurs oxydes et hydroxydes de métaux comme le Cr, Cu, Zn et Pb provoquent le gonflement du produit cimentaire et entraînent une perte de résistance. Les changements chimiques qui interviennent entre les grains du sédiment et le liant hydraulique, jouent un rôle très important sur la qualité des produits cimentaire.

Zhibo (ZHIBO 2008) et Colin (COLIN. 2003), ont traité des sédiments fins avec du ciment et de la chaux. Les résultats montrent que les performances mécaniques évoluent proportionnellement avec augmentation du dosage du ciment. La figure II-7 présente les résistances en compression simple en fonction des différents dosages en ciment.

Bahar *et al.* (2004), ont traité un sol de la région de Tizi-Ouzou (Est d'Alger) avec du ciment. Ils ont constaté qu'avec l'augmentation du ciment, la résistance en compression simple des échantillons augmente. Ils ont lié ce phénomène au remplissage des pores par les produits cimentaires qui lient les particules du sol. Ils ont également conclu que la teneur en ciment a un effet sur la perméabilité des échantillons. En effet, ils ont constaté que la perméabilité des échantillons passe de $14 \cdot 10^{-8}$ à $0.27 \cdot 10^{-8}$ (m/s) quand la teneur en ciment augmente du 5 % à 20 %. Ce résultat permet d'améliorer la durabilité des échantillons

2.3.2. LA CHAUX

2.3.2.1. Action de la chaux

La chaux, peut être employée avec d'autres additifs ou seule, pour son effet alcalin. L'utilisation de chaux est très efficace dans les sols fortement contaminés. Elle permet de garder le sol à des pH de 9 à 11, minimise la solubilité des métaux qui s'y trouvent, et évite la redissolution rencontrée quand on utilise de la chaux (García *et al.*, 2004). Le rôle de la chaux vis-à-vis de la mobilité de l'arsenic est controversé. Selon certains auteurs, la chaux peut augmenter la mobilité de l'arsenic (Mench *et al.*, 2003 ; Seaman *et al.*, 2003). Selon d'autres auteurs, elle permet de diminuer la lixivabilité de l'arsenic par la formation de complexes As-Ca (Porter *et al.*, 2004).

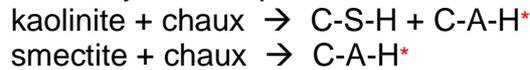
La chaux a trois actions bénéfiques lors du traitement des sols. Un ajout de la chaux permet :

1. la saturation de la capacité d'échange cationique. Dans le sol, les argiles ainsi que les matières organiques ont la propriété de fixer l'ion calcium. Pour les argiles, la capacité d'échange cationique correspond aux échanges :
 - a. des cations interfoliaires. Ces échanges concernent plus particulièrement les argiles TOT (smectite, vermiculite). La substitution des cations interfoliaires est d'autant plus facile que les cations ont une charge plus faible et sont de petite taille. Ainsi on peut classer les cations par ordre croissant de potentiel de remplacement :
 $Na^+ < H^+ < K^+ < Mg^{2+} < Ca^{2+}$
Dans le cas des smectites, l'effet immédiat de la substitution du sodium par du calcium est la réduction du potentiel expansif de ces argiles.
 - b. des cations de bordure. Sur les bordures d'un cristal, les charges ne sont plus équilibrées. Il apparaît alors des fonctions SiOH et AlOH. Ces fonctions sont déstabilisées en milieu basique et constituent alors une source supplémentaire de sites de fixation pour l'ion calcium.

La présence de matières organiques contribue à augmenter la capacité de fixation du calcium. Des complexes avec cet ion sont formés grâce aux groupements fonctionnels qu'elles possèdent.

2. la floculation/agglomération. Les charges négatives portées en surface des particules d'argiles sont responsables de l'établissement d'un champ électrostatique autour d'elles. Ce champ permet le développement de la double couche d'eau entourant les argiles (eau libre et eau liée). L'ajout de chaux modifie la charge superficielle des argiles et donc la structure de la double couche dont l'extension diminue. On observe alors une diminution du volume apparent des particules et une contraction du sol. De plus, il y a la formation de ponts de calcium entre les particules d'argiles. Les floccs ainsi formés sont insensibles au lavage. La floculation améliore la consistance des argiles (limite de plasticité).

3. la liaison des particules argileuses. En milieu basique et saturé en ion calcium, les argiles sont attaquées. Elles libèrent alumine et silice qui réagissent avec le calcium pour former des hydrates calciques similaires à ceux des ciments. Ces hydrates tapissent la surface des particules du sol.



(* C: CaO, S: SiO₂, A: Al₂O₃, H: H₂O)

Les C-S-H formés à partir de la kaolinite correspondent à des hydrates de type mono calcique et dicalcique. D'autres auteurs utilisent les termes de C-S-H (I) et C-S-H (II) correspondant à des températures de déshydratation différentes. Les C-A-H formés à partir des smectites sont des aluminates tri et tétracalciques. Pour la kaolinite, l'aluminate calcique formé est tricalcique. Un dernier composé se formant au cours de la réaction pouzzolanique est signalé, il s'agit de C-S-A-H.

La réaction de la chaux sur les argiles permet donc la consommation des argiles et la formation de nouveaux minéraux aux propriétés liantes. La réalisation de cette réaction est conditionnée par la saturation initiale du sol en chaux. Un test basé sur la mesure du pH permet d'évaluer la teneur en chaux nécessaire pour que ces réactions puissent avoir lieu. Le seuil de pH est fixé à 12,4. La quantité de chaux permettant d'obtenir cette valeur de pH est connue sous le nom de « lime fixation point »

L'ajout de chaux provoque rapidement, en quelques minutes, la floculation des argiles. Cette action entraîne une amélioration de la consistance qui se traduit par une augmentation de la limite de plasticité s'accompagnant ou non d'une augmentation de la limite de liquidité. Cette évolution provoque un déplacement du domaine de plasticité vers des teneurs en eau plus importantes. Le décalage de l'indice de plasticité est lié à la quantité de chaux utilisée. L'évolution de consistance favorise la granulation du sol lors du malaxage (Cimpelli C., Kargoet M. (1974). Différents facteurs influencent cette granulation dont la nature du sol, la teneur en eau et le dosage en chaux (Verhasselt 1978). L'évolution de la consistance débute dès l'épandage de la chaux avec la fragmentation due au retrait de déshydratation. Le malaxage amplifie ensuite le phénomène. Le réarrangement des particules et la consommation de l'eau interstitielle favorisent la contraction des agrégats de sol qui se traduit par la disparition des pores dont le diamètre est compris entre 10 et 100 µm (Khatab 2002).

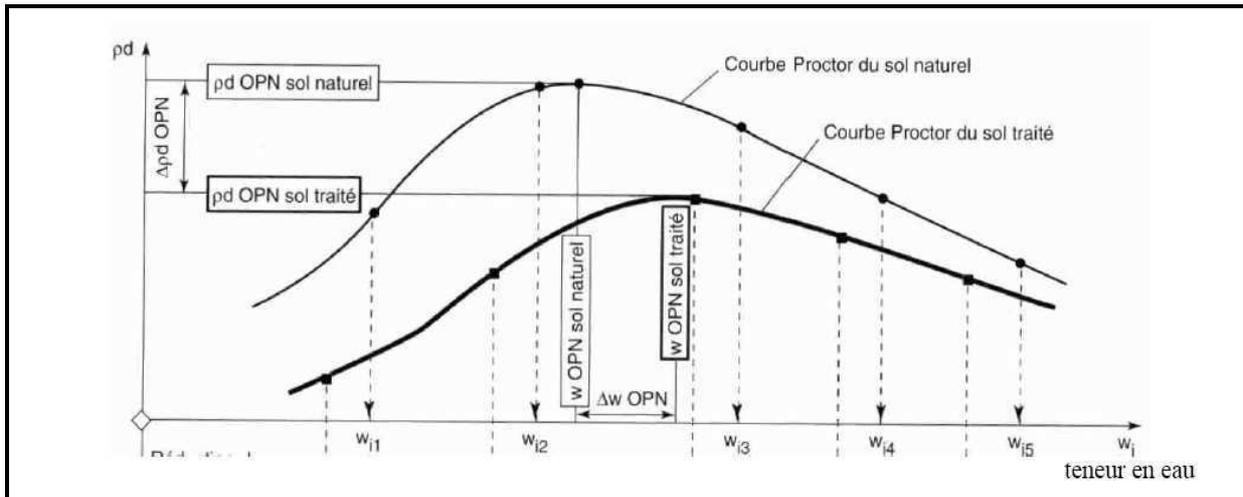


Figure II-4 : Evolution des caractéristiques de l'optimum Proctor suite au chaulage du sol (GTS 2000)

La figure II-4 montre l'ajout de chaux abaisse la valeur de la densité maximale atteinte et décale la position de l'optimum vers des teneurs en eau plus importantes

D'après Cabane (2004), la portance des sols est améliorée. Ainsi l'indice CBR est de 4 à 10 fois plus élevé que pour un sol non traité. Selon Boutonnet et Livet (1984), les sols traités par la chaux, sont rendus insensibles au gel pour une formulation supérieure à 3 % par rapport aux sols non traités dans le cas des limons pour une application dans le domaine des chaussées.

2.3.3. Liant pouzzolanique

Les pouzzolanes sous forme de poudre et en présence d'humidité, réagit chimiquement avec l'hydroxyde de calcium pour former des composées possédant des propriétés liantes, cette réaction se décompose en deux étapes (Silitonga ; cité par Zhibo 2008) :

- a. La dissolution : la dissolution de la chaux contenue dans le mélange va entraîner la saturation en chaux de l'eau et ainsi élever le pH à des valeurs souvent supérieures à 12. Grâce à l'élévation de pH, la silice et l'alumine vont à leur tour se dissoudre. Leur vitesse de dissolution sont variables et dépendent de l'altération des formes cristallines des matériaux.
- b. la cristallisation : à partir d'une certaine concentration en ions silicates et d'aluminates de calcium hydratés. Une matière est dite pouzzolanique si elle a la propriété de se combiner à la chaux en présence d'eau pour former un produit possédant des propriétés des liants.

2.3.3.1. Cendre volante

Le matériau se présente sous la forme d'une poudre dont la granulométrie est comprise entre 0,5 et 315 μm . La finesse Blaine (surface spécifique) est élevée

puisqu'elle est en général supérieure à 200 m²/kg (ce qui n'est pas éloigné des ciments classiques) et même supérieure à 1000 m²/kg dans le cas de certaines cendres de LFC.

2.3.3.1.1. Classification géotechnique

Dans la gamme des sous-produits industriels, la norme NF P 11-300 classe les cendres en catégorie **F2**. Du point de vue géotechnique, il est d'usage de les assimiler à la classe **A1**, compte tenu de leur comportement (sans ajout d'activant ni de chaux), en tant que matériau de remblai.

2.3.3.1.2. Utilisation dans les infrastructures routières

Les cendres volantes sont utilisées pour de nombreuses applications, soit seules soit mélangées à d'autres constituants. Elles peuvent rentrer dans la composition de ciments (conformément à la NFP 15-301), de liants hydrauliques routiers (conformément à la NF P 15-108), de bétons (conformément la NF EN 450) ainsi que de nombreux produits brevetés avec des utilisations diverses et notamment le remblaiement de tranchées (produits auto-compactants), le comblement de cavités ainsi que de produits auto-nivelants.

2.3.3.1.3. Les Cendres volantes silico-alumineuses classiques

a) Utilisation en terrassement

Les cendres volantes ont souvent été utilisées par le passé pour l'élaboration de remblais, en particulier sur des sols compressibles. En effet, en vrac et humides, les cendres présentent une masse volumique de l'ordre de 1 t/m³. Après compactage sous l'énergie du Proctor normal, on obtient une masse volumique sèche comprise entre 1 et 1,3 t/m³, la teneur en eau optimale variant de 20 à 35 %, ce qui reste sensiblement moins dense que les sols. Les courbes Proctor sont relativement plates, ce qui permet de mettre en œuvre le matériau sous une palette de teneurs en eau large. Cependant, un excès d'eau peut conduire à une perte importante de la portance immédiate. Silitonga (Silitonga *et al* 2008) a traité des sédiments fins avec des cendres volantes. Les résultats montrent que qu'en traitant des sédiments fins avec les cendres volantes, la teneur en eau optimale augmente, et la densité sèche diminue (figure II-5). Ces analyses ont été confirmées par Hossain *et al.* (2007) en traitant sol argileux avec des cendres volantes.

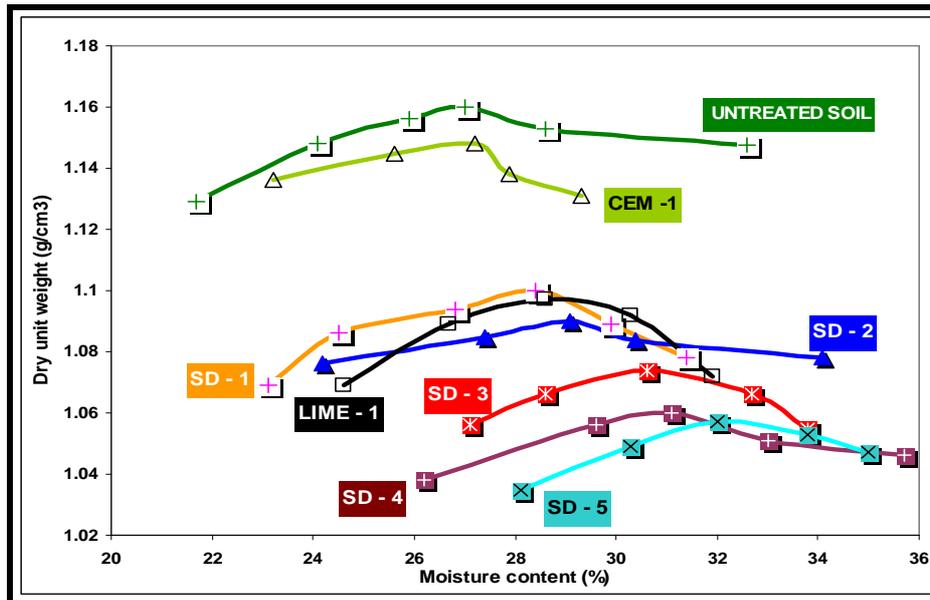


Figure II-5 : Courbes Proctor Normal pour le sédiment non traité et avec traité avec différents pourcentages de cendre volante (Silitonga et al 2008)

Plus généralement, les cendres des remblais ne doivent pas être au contact immédiat de l'eau (pas de remblais en zone inondable), compte tenu de leur très forte hydrophilie. Pour éviter les remontées d'eau, il est préférable d'établir un soubassement perméable à l'aide d'une couche de matériau peu fragmentable et peu dégradable (les classes D21 ou D31 selon NF P 11-300 conviennent), cette isolation du remblai pouvant s'avérer indispensable sur certains sites, alors que le drainage s'avère inopérant. Dans le cas de remblais de faible hauteur (saturation plus rapide du volume, sensibilité au gel accrue due à cette présence d'eau importante), certains problèmes de stabilité ont été rencontrés. Il est donc préférable de privilégier des remblais de grande masse

A noter que dans le cadre d'une utilisation en remblai, le matériau devra satisfaire aux spécifications définies dans la norme A 05-252 de juillet 1990 - "Corrosion par les sols – Aciers galvanisés ou non mis en contact de matériaux naturels de remblai (sols)" et plus particulièrement celles relatives aux "Critères chimiques et électrochimiques d'acceptation d'un matériau de remblai", à savoir résistivité, pH et teneur en sels solubles.

b) Utilisation en couche de forme

Les fonctions de la couche de forme sont multiples (assurer le compactage des couches supérieures, assurer la traficabilité des engins approvisionnant les matériaux de construction de la chaussée, résister au gel,...). Certaines de ces conditions ne permettent d'envisager les cendres volantes qu'avec un traitement aux liants hydraulique ou une activation calcique, alors que des cendres de foyer (la fraction 0-2 mm) ont souvent été utilisées. Certaines couches de forme en cendres volantes traitées à la chaux et au gypse ont déjà été réalisées, technique également utilisée en couche de fondation (cf. utilisation en structure de chaussée).

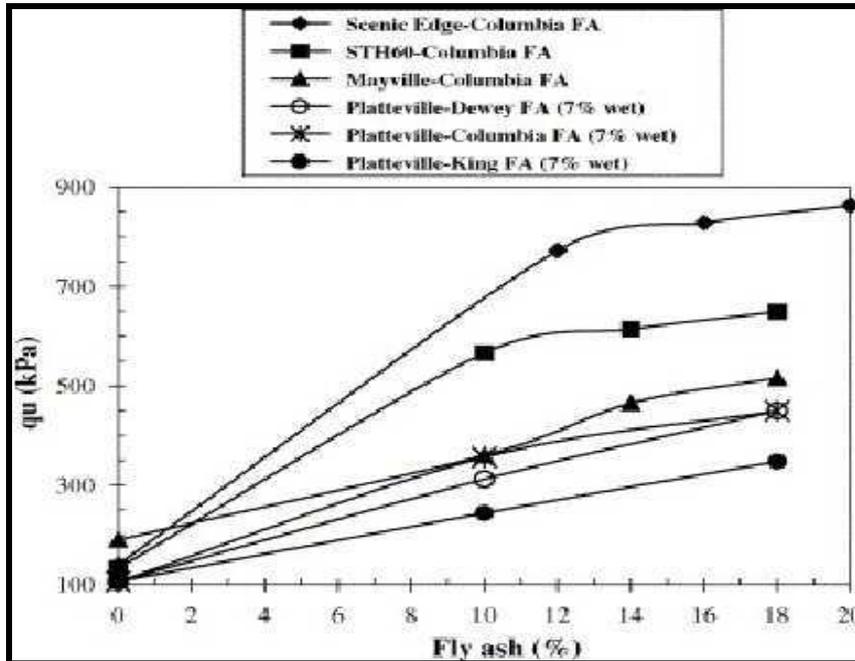


Figure : II-6 relation entre pourcentage de cendres volantes et la résistance en compression simple (Senol, 2006)

Dans le cas des cendres silico-alumineuses, il est à noter que, pour pouvoir être utilisées en technique routière, les passants à 40 μm et 80 μm (cf. XP P 18-540 et X 11-640) doivent être respectivement supérieurs à 40 % et 70 % (cf. NF P98-116).

Senol et al (2006) ont présenté les résultats d'une recherche impliquant différents types de cendres volantes pour la stabilisation de quatre type différents de sol support routier aux Etats-Unis (figure II-6)

Les travaux expérimentaux menés par Silitonga (Silitonga *et al.* 2008) sur un traitement des sédiments marins du Port de Cherbourg. La résistance en compression simple s'améliore avec une augmentation de dosage de ciment (figure II-7)

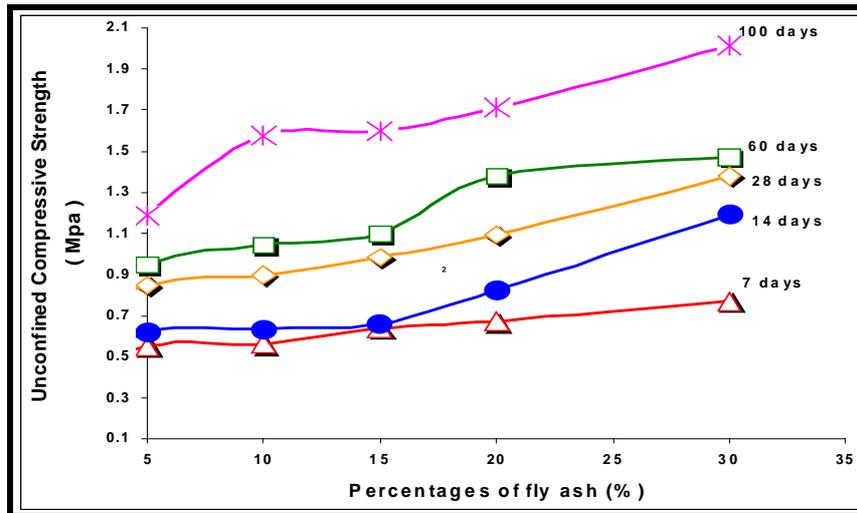


Figure II-7 : Evolution des résistances à la compression

2.3.3.2. Les fumées de silice

Les fumées de silice sont un sous-produit de la fabrication du silicium ou de différents alliages de ferrosilicium. Les fumées de silice sont produites lors de la réduction d'un quartz très pur par du charbon dans un four à arc, à la température de 2000°C.

Les fumées de silice se présentent sous forme de fines particules sphériques d'un diamètre moyen d'environ 0,1 μm . Leur surface spécifique est de 20 m^2/g à 25 m^2/g . La finesse et la forme vitreuse des fumées de silice font d'elles un produit très réactif. Leur teneur en silice vitreuse varie de 75% à 95%. (Malhotra and Kuma,, 1996)

Asavapisit *et al.* (2001) ont observé que la résistance à la compression simple la plus élevée est obtenue avec des mélanges préparés avec 10 % de fumée de silice mais celle-ci diminue avec 20 %. Dans ce cas là, il est possible que l'excès de la fumée de silice a occupé les espaces des pores et a réduit les espaces vides nécessaires pour former les produits de la réaction d'hydratation du ciment. En effet, pour le développement des produits d'hydratation du ciment, on a besoin des espaces vides et l'excès de la fumée de silice peut les limiter.

D'autre part, Asavapisit *et al.* (2005) ont constaté que la fumée de silice a un effet significatif sur la durée de la prise du ciment et l'hydroxyde de plomb. Ils ont observé également qu'avec l'augmentation de quantité de fumée de silice, la durée de prise des échantillons (ciment + hydroxyde de plomb) diminue. Ils ont conclu que la production de C-S-H secondaire due à la réaction pouzzolanique obtenue dans la réaction de la fumée de silice avec $\text{Ca}(\text{OH})_2$, entraîne une création de pores isolés et fins ce qui provoque une augmentation de la résistance de diffusion des matériaux alcalins.

Bagherpour et Choobbasti (2003), ont observé que la présence de la fumée de silice dans le traitement des sols au ciment et la chaux, améliore les performances mécaniques des sols traités. Le sol d'étude a été traité avec 4 pourcents de chaux et 8 pourcents de ciment Portland et de la fumée de silice à un dosage variant de 0 à 5 %. La figure ci-après présente les résultats obtenus.

Gleize *et al.* (2003), ont montré que la présence de la fumée de silice améliore les résistances à la compression simple du mélange ciment Portland + chaux. La haute activité pouzzolannique de fumée de silice crée des échantillons plus denses

Kalkan et Akbulut (2004), ont aussi observé un effet positif de la fumée de silice sur des argiles traitées. Cet effet se manifeste plus particulièrement par une augmentation de la résistance à la compression simple. Ceci est dû à la réaction chimique entre les argiles et les particules de fumée de silice qui entraîne la production des composantes C-S-H. Ils ont également constaté qu'en ajoutant de la fumée de silice dans l'argile, la densité sèche maximale du mélange diminue et la teneur en eau optimale du mélange augmente. L'accroissement de la teneur en eau optimale du mélange dépend de la teneur en fumée de silice ajoutée. D'autre part, selon Kalkan et Akbulut (2004), l'augmentation de la surface spécifique du mélange entraîne l'accroissement de la teneur en eau optimale (Figure II-8).

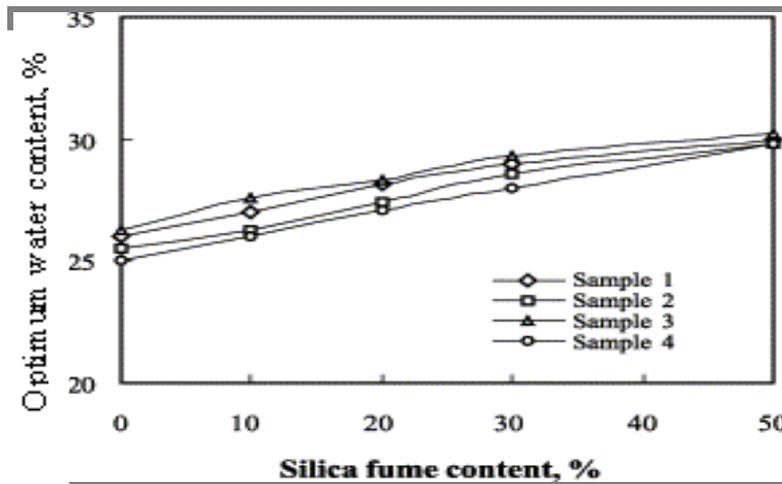


Figure II-8: Effet de la quantité de la fumée de silice sur l'évolution de la teneur en eau optimale (Kalkan et Akbulut, 2004)

Behmanesh (Behmanesh, 2006), a montré que la présence de la fumée de silice diminue la porosité, en présence de 4 % de ciments et sans fumée de silice (série 2-4), la perméabilité est environ 2 fois plus importante que dans le cas de la série 2-5 avec 1 % de fumée de silice. Ceci peut être lié à la taille très fine des grains de la fumée de silice qui permet ainsi de remplir les espaces vides entre les grains dans les matériaux solidifiés. En effet, grâce à la fine structure de la fumée de silice, la cristallisation obtenue par la réaction permet de remplir les vides et par conséquent une réduction de la perméabilité des échantillons (tableau II-8).

Tableau II-8 : Perméabilités des échantillons mesurées par cellule triaxiale (Behmanesh 2008)

Série	Type de sédiment	Mélange (%)	K(m/s)* 10 ⁻⁸
2-1	Sédiments sains	C2, CH2, CV2 et H0	6,8
2-2		C2, CH2, CV2, FS1 et H0	5,1
2-3		CH2, CV2, FS1 et H0	6,5
2-4		C4, CH2, CV2 et H0	5,1
2-5		C4, CH2, CV2, FS1 et H0	3,2
2-6	Sédiments pollués à 2% de l'huile	C2, CH2, CV2 et H2	*
2-7		C2, CH2, CV2, FS1 et H2	5,7
2-8		CH2, CV2, FS1 et H2	7,1
2-9		C4, CH2, CV2 et H2	5,4
2-10		C4, CH2, CV2, FS1 et H2	4,6
2-11	Sédiments pollués à 4% de l'huile	C2, CH2, CV2 et H4	9,4
2-12		C2, CH2, CV2, FS1 et H4	5,7
2-13		CH2, CV2, FS1 et H4	*
2-14		C4, CH2, CV2 et H4	6,5
2-15		C4, CH2, CV2, FS1 et H4	4,7

2.3.4. Correcteur granulométrique

L'objectif principal d'apport d'un correcteur granulométrie est pour améliorer le squelette granulaire afin de réduire les vides. Une augmentation de la compacité permet de développer de performances mécaniques. Les sédiments traités présentant en général une porosité très importante, de l'ordre de 50%, qui suffit à elle seule pour expliquer les faibles performances obtenues. Pour réduire cette porosité, il est possible d'envisager d'ajouter un correcteur granulométrique aux sédiments. Le correcteur ne va pas seulement modifier la compacité du matériau mais aussi l'ensemble des paramètres. Il joue tout d'abord, un rôle de diluant en modifiant les paramètres de nature (diminution de l'argilosité et de la teneur en matière organiques) et il modifie également la mise en œuvre du matériau (Zhibo 2008)

L'utilisation d'un sable fin concassé est donc à privilégier à celles d'un sable roulé et d'un correcteur grossier (figure II-9). Avec le grès 2/4, il manque certainement une fraction intermédiaire entre les fines et les gravillons ce qui entraîne un mauvais arrangement des grains et par conséquent, la création de gros vides dans le matériau. La nature du sable (concassé ou roulé) influence également les performances du matériau. Par son angularité, la quartzite apporte du frottement aux points de contact entre les grains ce qui n'est pas le cas du sable roulé pour lequel les particules peuvent être assimilées à des billes. Ce frottement intergranulaire permet ainsi au matériau constitué de quartzite de développer de meilleures résistances mécaniques.

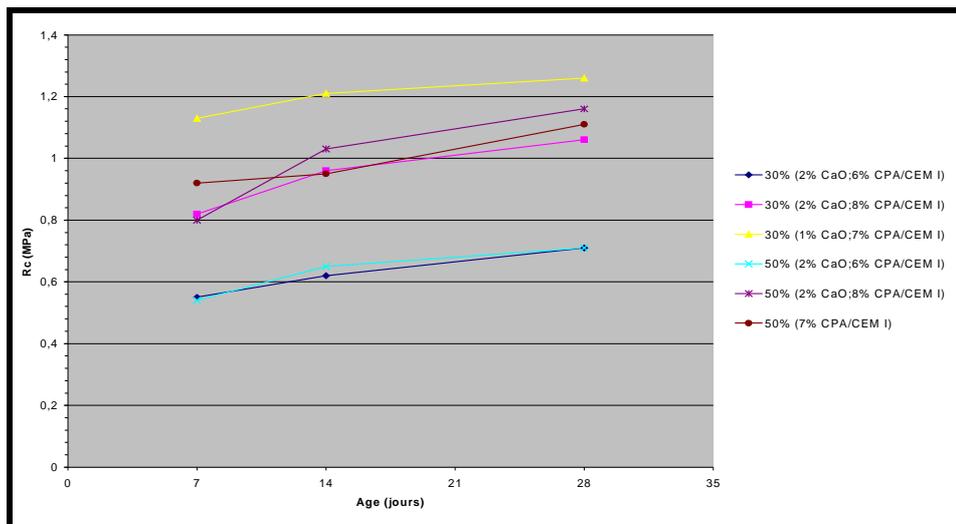


Figure II-9 : Performances mécaniques obtenues avec la quartzite pour l'ensemble des formulations testées (Colin 2003).

2.4. Sédiments marins dans la structure de la chaussée

Le choix de la filière de destination des matériaux dragués doit satisfaire à la fois la conformité réglementaire, les conditions environnementales, la meilleure technique disponible et un coût économiquement acceptable. Selon les caractéristiques et le niveau de contamination, la gestion des sédiments peut reposer sur plusieurs axes : soit le rejet en mer au moment de dragage, soit l'immersion dans les zones autorisées, soit le dépôt à terre en vue de stockage, de valorisation ou le sédiment s'oriente vers la valorisation plutôt que l'immersion et le dépôt. La valorisation peut intéresser plusieurs domaines tels que le génie civil, l'agriculture par l'amendement des sols et la réhabilitation de sites naturels. Cette filière a pour principaux avantages de limiter la mise en dépôt et de faire baisser les coûts de l'opération de dragage. En France, la consommation annuelle des granulats en génie civil est de plus de 400 millions de tonnes dont 98, 8% sont d'origine naturelle. Les réserves de granulats sont quasiment illimitées, mais beaucoup d'entre elles restent inexploitable pour des raisons diverses : inaccessibles, intégrées à des zones urbaines, dans des sites classés ou protégés, exploitation trop douteuse, sensibilité environnementale. D'autre part, depuis janvier 1993, les carrières sont soumises à la loi sur l'installation classée pour la protection de l'environnement. Elles doivent respecter des réglementations très exigeantes. La

gestion d'une carrière est soumise à la loi sur les installations classées pour la protection de l'environnement. Dans ce contexte législatif sévère, le recyclage des déchets comme sédiments utilisable en génie civil on doit s'assurer qu'ils ne présentant pas un risque inacceptable pour l'environnement. La caractérisation de la toxicité du sédiment au niveau environnemental et géotechnique permet d'estimer les scenariis acceptables pour l'utilisation en travaux public.

2.4.1. Utilisation en travaux routière

Les sédiments sont des déchets. Toutefois, cette qualification n'interdit pas leur usage dans des opérations de travaux public. Il convient alors de s'assurer que les sédiments ne présentent pas un risque pour l'environnement. Une caractérisation de la toxicité du sédiment au niveau environnementale (test de percolation par exemple) et géotechnique (pour la stabilité) permet d'estimer les scenario acceptables pour l'utilisation en travaux routier. L'inconvénient, est qu'il n'existe pas de valeur limites réglementaires pour la détermination de la toxicité

Une fois les exigences mécaniques satisfaites, le dimensionnement de la couche de forme peut être réalisée. Il s'effectue à partir du couple PST-couche de forme, constituant la plate-forme support de chaussée (figure II-10). Plus précisément, l'épaisseur de la couche de forme dépend d'une part, du type de PST et de la portance à long terme au niveau de l'arase des terrassements (AR) et d'autre part, des caractéristiques mécaniques à long terme du matériau constituant la couche de forme.

Les performances mécaniques à long terme, à savoir la connaissance du couple (R_{tb} ; E), permettent de classer le matériau suivant différentes zones d'un abaque (figure II-11). Par rapport à ce classement et suivant son mode de fabrication (en centrale ou en place), une classe mécanique, de 1 à 5, lui est attribuée (tableau II-9).

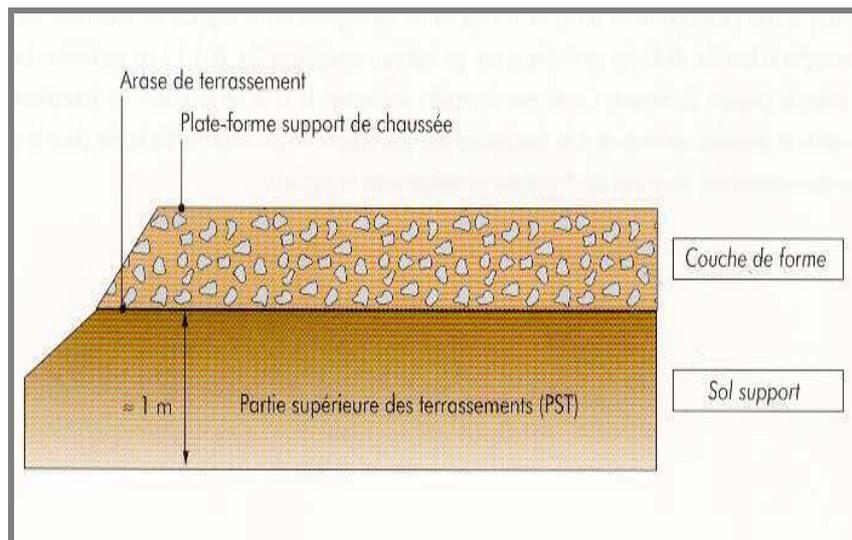


Figure II-10 : Plate-forme support de chaussée

Une fois, la classe mécanique du matériau et celle de l'arase déterminées, une épaisseur de couche de forme est alors préconisée. La connaissance de ces trois paramètres permet, pour finir, d'attribuer une classe à la plate-forme. Le tableau II-10 donne les différentes classes de plate-forme en fonction de la classe de l'arase, des performances mécaniques du matériau traité et de l'épaisseur de la couche de forme

Tableau II-9 : Classe mécanique d'un matériau traité en fonction de ses caractéristiques à long terme et de son mode de fabrication (GTS, 2000)

Traitement en centrale	Traitement en place	Classe mécanique du matériau
zone 1	-	1
zone 2	zone 1	2
zone 3	zone 2	3
zone 4	zone 3	4
zone 5	zone 4	5

Tableau II-10 : Détermination de la classe de la plate-forme en fonction de la classe de l'arase, des performances mécaniques du matériau et de l'épaisseur de la couche de forme

Classe mécanique du matériau de couche de forme	Epaisseur de la couche de forme				
	Cas d'une arase de classe AR ₁			Cas d'une arase de classe AR ₂	
classe 3	-	30 cm	40 cm	25 cm	30 cm
classe 4	30 cm	35 cm	45 cm	30 cm	35 cm
classe 5	35 cm	50 cm	55 cm	35 cm	45 cm
Classe de la plate-forme obtenue	PF ₂	PF ₃	PF ₄	PF ₃	PF ₄

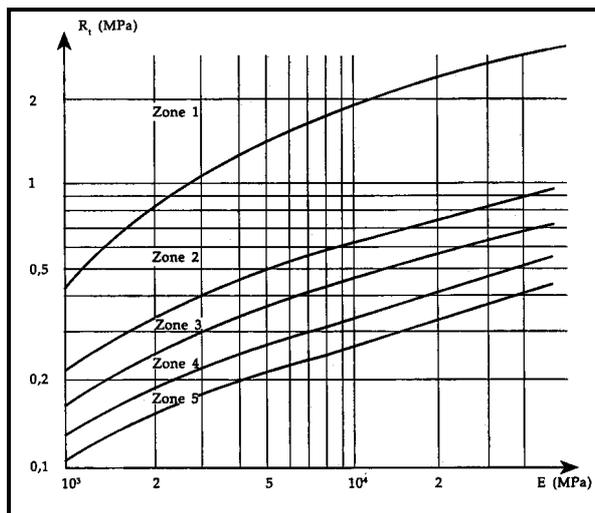


Figure II-11 : Zones de classement du matériau en fonction de sa résistance en traction R_t et de son module élastique E (GTR, 1992)

Normalement, les essais sont effectués après 360 jours de conservation. Néanmoins, si le délai d'étude est insuffisant, on peut déterminer les résistance en traction et le module élastique à 28 jours, 60 jours, les résultats obtenus sont ensuite estimés à 360 jours grâce aux coefficients empiriques indiqués dans la norme NF P98 113 (Figure II-11). Ces derniers sont choisis en fonction de la nature du liant utilisé (Tableau II-11)

Tableau II-11 : Coefficients empiriques en fonction de la nature du liant utilisés (N P 98 113)

Liants utilisés	Age (jours)	R_t/R_{t360}	E/E_{360}
Laitier vitrifié brut	90	0,70	0,70
Ciment normalisé	28	0,60	0,65
Liant spécial routier	60	0,65	0,70
Cendres volantes-chaux	90	0,65	0,75
Mélange de liants	90	0,70	0,75

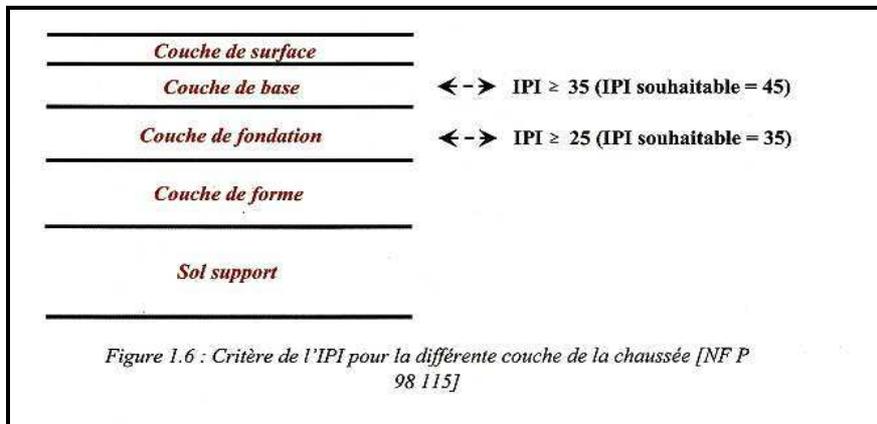


Figure II- 12 : critère de l'IPI pour la différente couche de la chaussé (NF P 98 115)

L'indice portant immédiat est évalué à partir de l'essai Proctor-IPI. Ce paramètre permet d'estimer la stabilité du matériau, c'est-à-dire de caractériser l'aptitude du matériau à supporter la circulation des engins sur chantier. Selon les recommandations de la norme français (NF P 98115), afin d'assurer la circulation normale des machines sur le chantier, les valeurs souhaitable de l'IPI ne doivent pas être inférieure à 35% pour la couche de fondation et 45% pour la couche de base (figure II-12).

Conclusion

Selon l'étude de bibliographique, les recherches effectuées sur les sédiments utilisant du liant hydraulique ou pouzzolanique montrent leur efficacité dans la valorisation des sédiments. Une partie réglementaire concernant des sédiments marins en France est également présentée. Le but est de montrer la difficulté liée au manque de réglementation à laquelle sont affrontées les acteurs du dragage et les industrielles appliquée dans le traitement de ces sédiments. Les sédiments présentant une faible propriété mécanique pour leur donner une performance mécanique adéquate, un ajout de correcteurs granulométrique suivi d'un traitement par le ciment, la chaux et liant pouzzolanique est une techniques efficace. Les résultats de cette opération ont montré un accroissement de la résistance mécanique du mélange obtenu avec l'augmentation des dosages des liants hydrauliques. Le choix du type et la quantité des liants utilisés dans le traitement jouent un rôle important dans cette opération de stabilisation.

CHAPITRE 3

CARACTERISTIQUES DES SEDIMENTS MARINS

Introduction

Ce Chapitre de l'étude expérimentale est consacré à la caractérisation des sédiments étudiés. L'objectif de ce chapitre est d'identifier la nature physico-chimique et géotechnique ainsi que la structure des sédiments, plusieurs investigations scientifiques, dans des domaines qui ordinairement sont peu connexes, sont nécessaires pour connaître avec un minimum de rigueur les propriétés et la nature des produits. Le chapitre est divisé en sept parties. Après cette première d'introduction, la deuxième partie, présente l'origine des sédiments étudiés. Ensuite sont identifiés les paramètres de nature tels que : la granulométrie, la masse volumique, l'argilosité, la teneur en matière organique, La caractérisation des sédiment étudiés fait partie de la quatrième partie. La cinquième partie est présentée la phase des minéraux argileux. Les impacts environnementaux, au travers de l'essai lixiviation fait l'objet de la sixième partie. En fin, une conclusion générale.

3.1. Les sédiments marins

3.1.1. Origines des sédiments

Les sédiments utilisés dans cette étude proviennent du Bassin des Port en Bessin en Basse Normandie. Le Bassin du Port en Bessin est divisé en 3 parties : un avant port (extérieure et intérieure), le bassin n°1 et le bassin N°2 (voir figure III-1). Les déblais de dragages du bassin n°1 et de l'avant port sont immergés en mer. Par contre, pour le bassin n°2, les caractéristiques géochimiques des sédiments ne permettent pas d'envisager cette solution (voir la partie d'essais de lixiviation, cf § 4.1.4).

3.1.2. Mode de prélèvement, transport et chambre de ressuyage

Le prélèvement des sédiments est un dragage mécanique réalisé par une pelle sur ponton (voir figure III-2). La pelle effectue le prélèvement des sédiments sur le fond, ensuite, les vases sont transportés dans la trémie de chargement sur le quai par le biais d'une conduite et d'une pompe. Le dragage mécanique conserve la densité origine des sédiments, puisqu'il n'y a pas d'aspiration d'eau lors de la prise du curage. Cette technique facilite le transport des sédiments par camions car les matériaux prélevés sont relativement en état plastique et conservent leur densité d'origine.

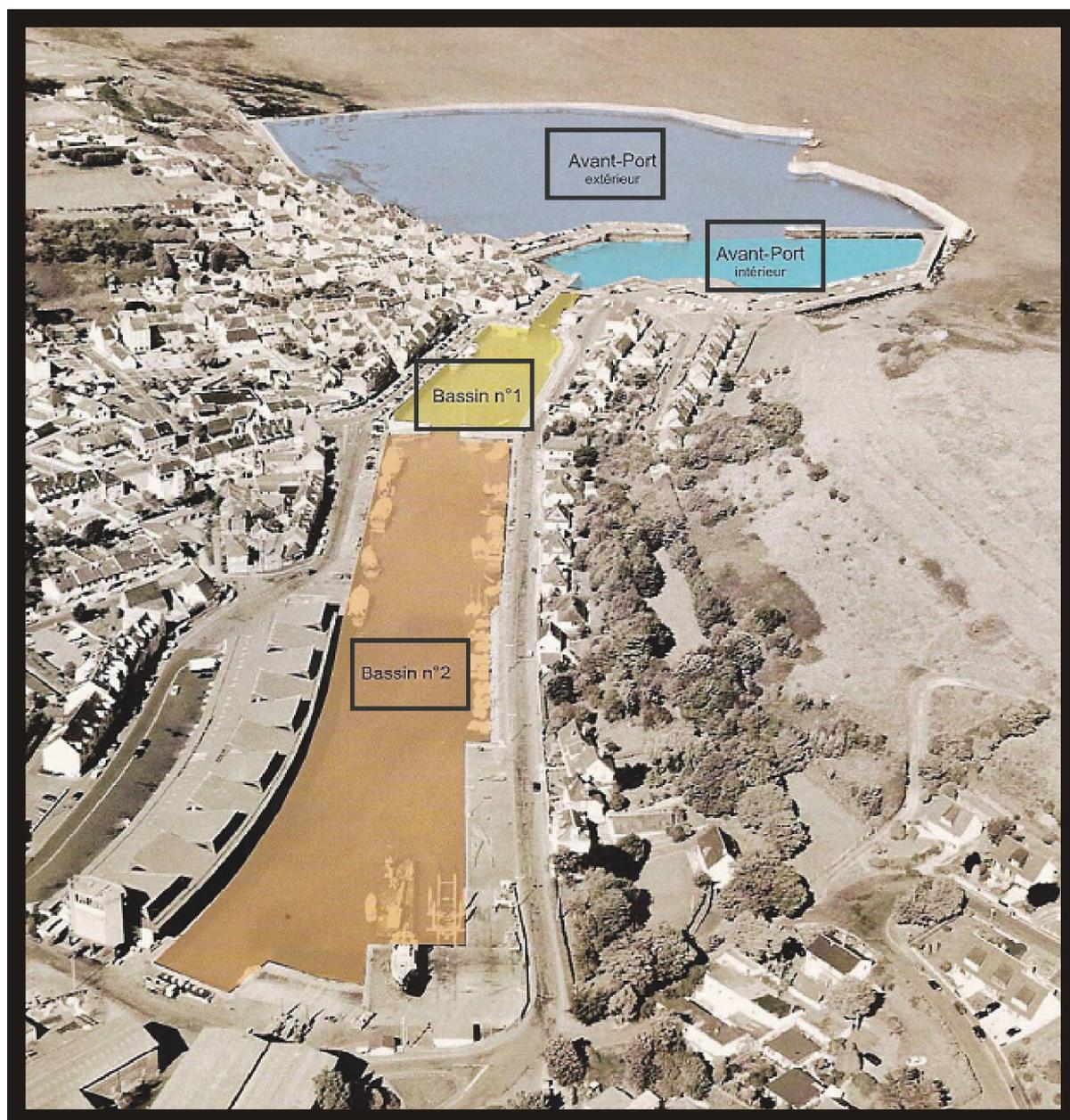


Figure III-1 : Vue aérienne du port en Bessin

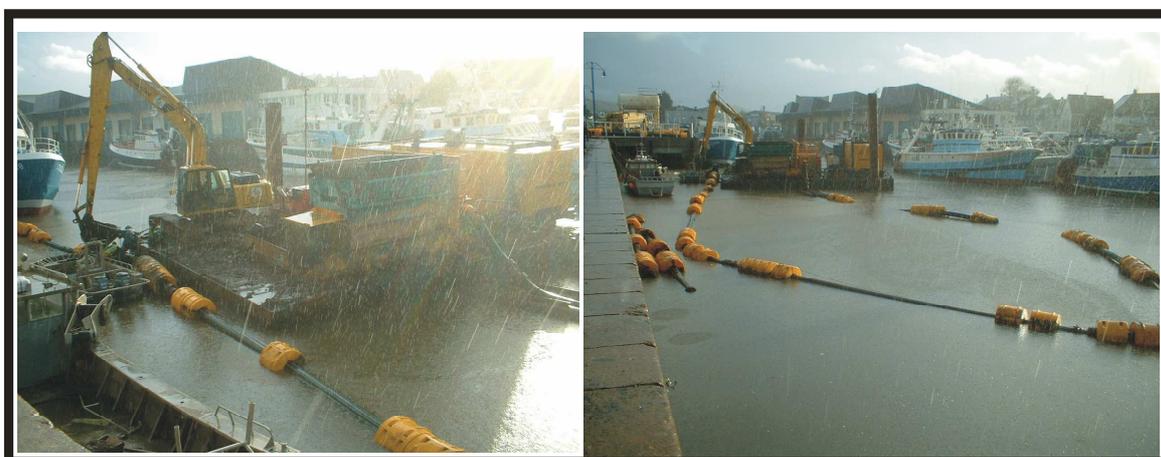


Figure III-2 : Dragage mécanique sur ponton au bassin n°2

Après les prélèvements, les sédiments sont transportés jusqu'à la chambre de dépôt par camion à benne étanche (voir figure III-3).



Figure III-3 : Déversement des sédiments dans la chambre de dépôt par camion

La chambre de dépôt se situe à environ 1,3 km du port. La chambre de ressuyage, d'une surface de 1,5 ha, a été édifée sur une parcelle agricole d'une surface de 5 ha (voir figure III-4).

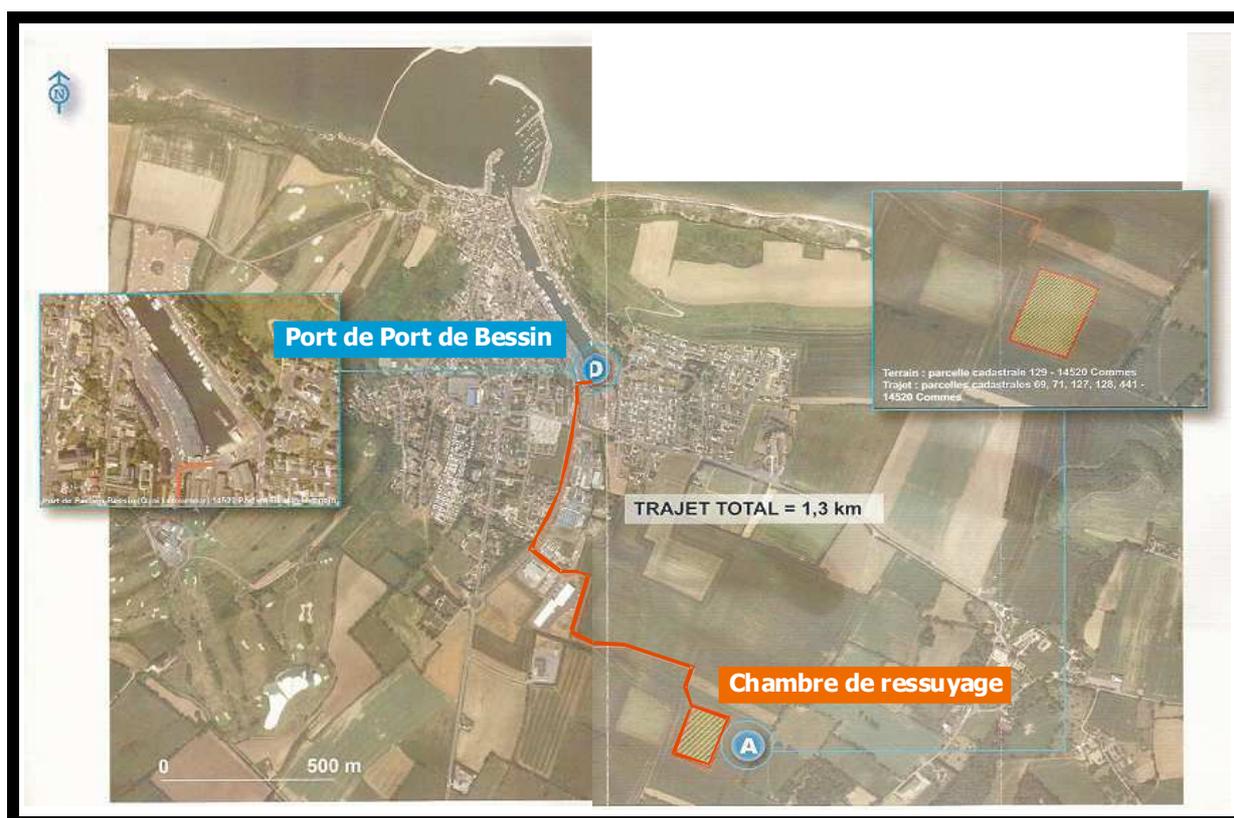


Figure III-4 : Plan du trajet du Port à la chambre de ressuyage

La solution pour déshydrater le sédiment revient à réaliser un bassin de ressuyage dans lequel les sédiments vont évacuer leurs eaux interstitielles sous l'action de la gravité et par séchage à l'air libre. La chambre de ressuyage a été réalisée avec une isolation du sol par une couche de géomembrane qui assure l'étanchéité de l'ensemble (voir figure III-5).

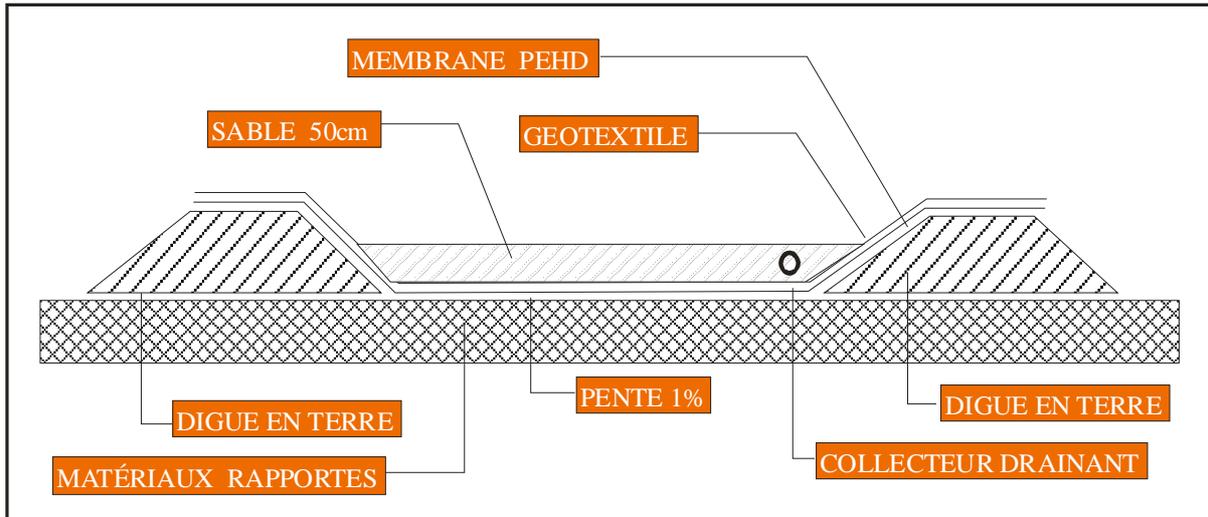


Figure III-5 : Constitution de la chambre de ressuyage effectuée

Le premier mois, après déversement des sédiments dans la chambre de dépôt par camions, la teneur en eau des sédiments était très élevée et avoisinant 115-130% (voir figure A1, A2, A3 et A3 sur la figure III-6)

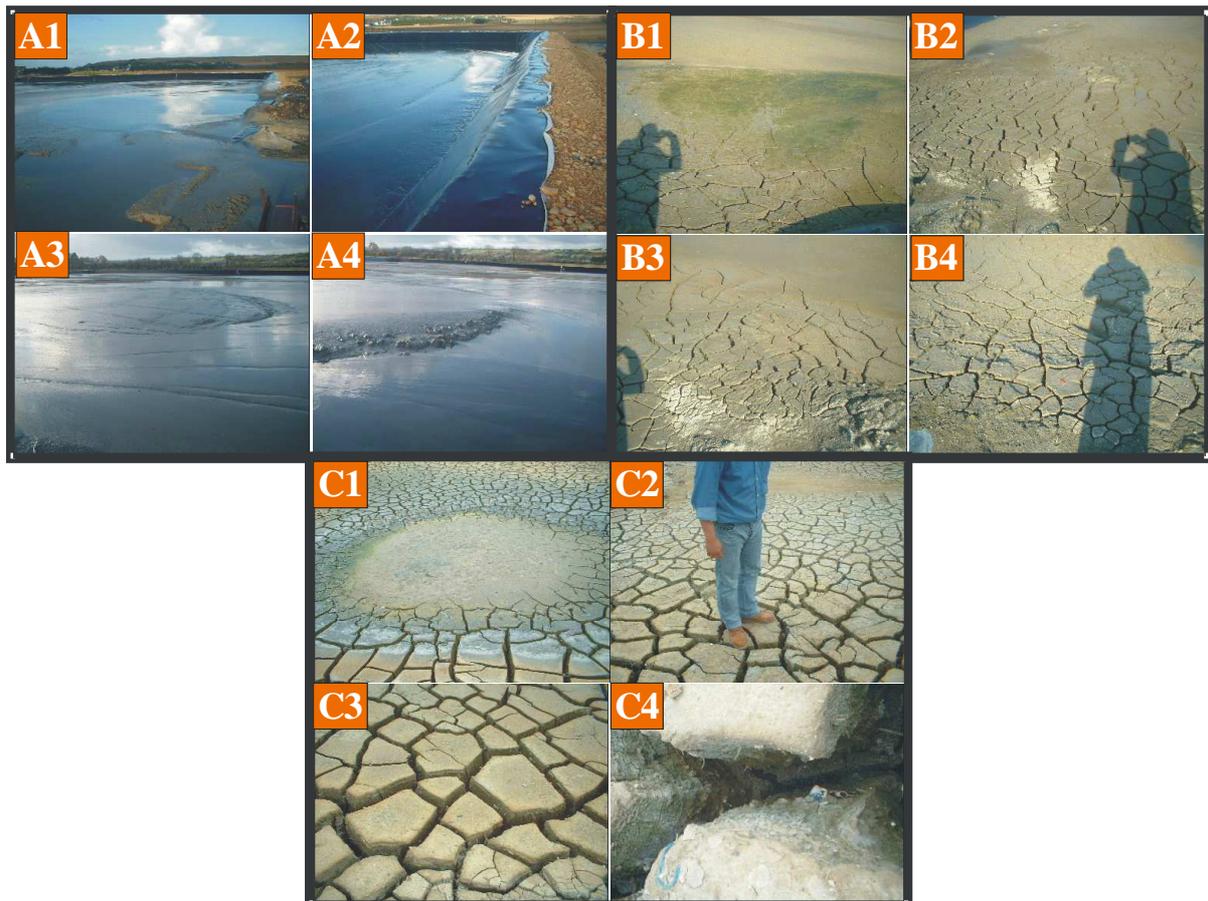


Figure III-6: Evolution de l'état superficiel des sédiments

Au cours des onze mois de la période déshydrations, la surface est devenue plus solide et les fissurations pelletables (B1, B2, B3 et B4 figure III-6). La teneur eau

s'est baissée jusqu'environ 65-75%. Cependant, avec cette teneur en eau très élevée, le procès de traitement est du point de vue économique impossible à réaliser.

Quatre mois après la période déshydrations, les sédiments ressemblaient physiquement à une terre avec une formation de croûtes sur la partie supérieure du dépôt (voir C1, C2, C3 et C4 sur figure III-6). A cette époque, la teneur en eau initiale s'est fortement diminuée d'environ 60% par rapport à l'origine et est passé à 35-45%.

3.2. Caractéristiques physico-chimiques des sédiments

3.2.1. Analyse granulométrique par laser.

L'analyse granulométrique permet de montrer la répartition des particules constituant un matériau. Une analyse granulométrique a été effectuée sur des sédiments prélevés sur le site du Port-en-Bessin en 4 points différents, dénommés A, B, C, D. La figure III-7 montre la distribution granulométrique des sédiments du Port-en-Bessin obtenues pour les 4 points de prélèvement. On constate que cette distribution similaire pour les 4 points de prélèvement ce qui confirme l'homogénéité de la vase prélevée du Port-en-Bessin. Cette homogénéité est également observée sur les fractions minérales données dans le tableau 5 et illustrée avec la Figure III-7.

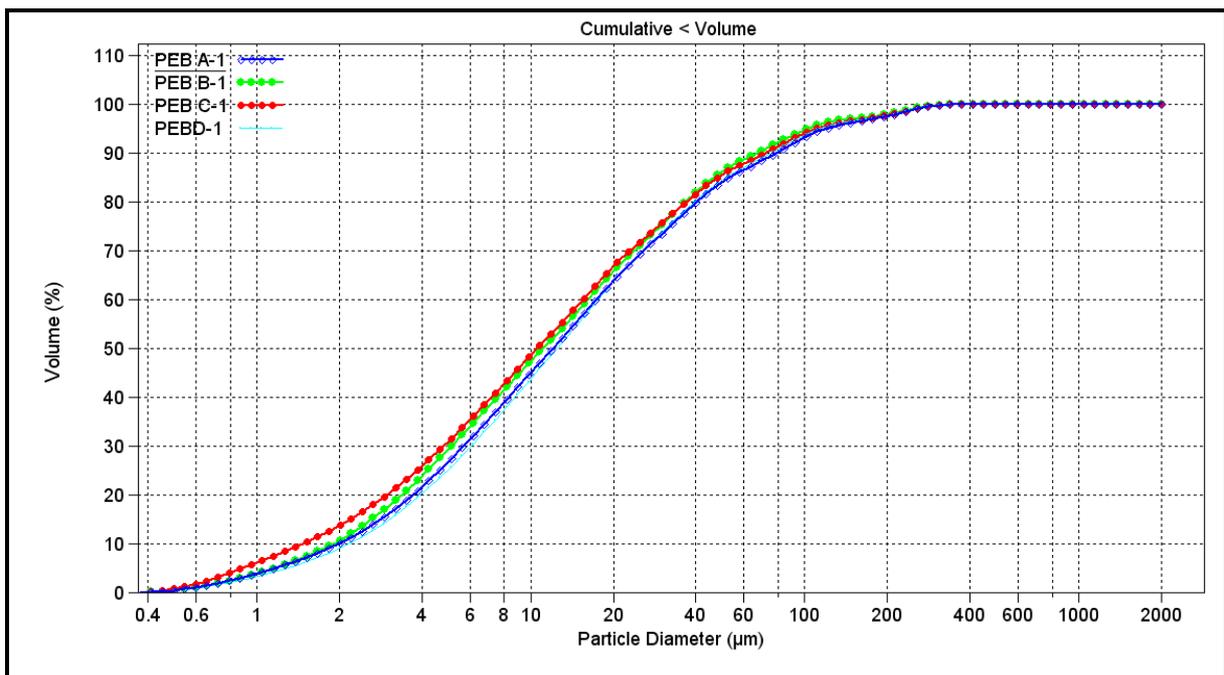


Figure III-7 : Distribution granulométrique des sédiments du Port-en-Bessin

Comme nous pouvons le constater dans le Tableau III-1 et figure III-8, la fraction argileuse pour ces sédiments marins est comprise entre environ 9 et 14%, la fraction silteuse est comprise entre environ 75 et 79% et la fraction sableuse entre environ 11 et 13%. Avec ces résultats nous pouvons dire que la vase du Port-en-Bessin est majoritairement silteuse.

Tableau III-1 : Données granulométriques des sédiments de Port-en-Bessin

	PEB A-1	PEB B-1	PEB C-1	PEB D-1
D10 (µm)	2	1.92	1.5	2.2
D50 (µm)	12	11.1	10.6	12.5
D90 (µm)	78.4	66.7	72	75.6
Fraction argileuse (<2 µm) (%)	10.7	10.6	13.8	9
Fraction silteuse (2 à 63 µm) (%)	77.2	78.8	74.8	78.8
fraction sableuse (> 63 µm) (%)	12.6	10.6	11.5	12.2

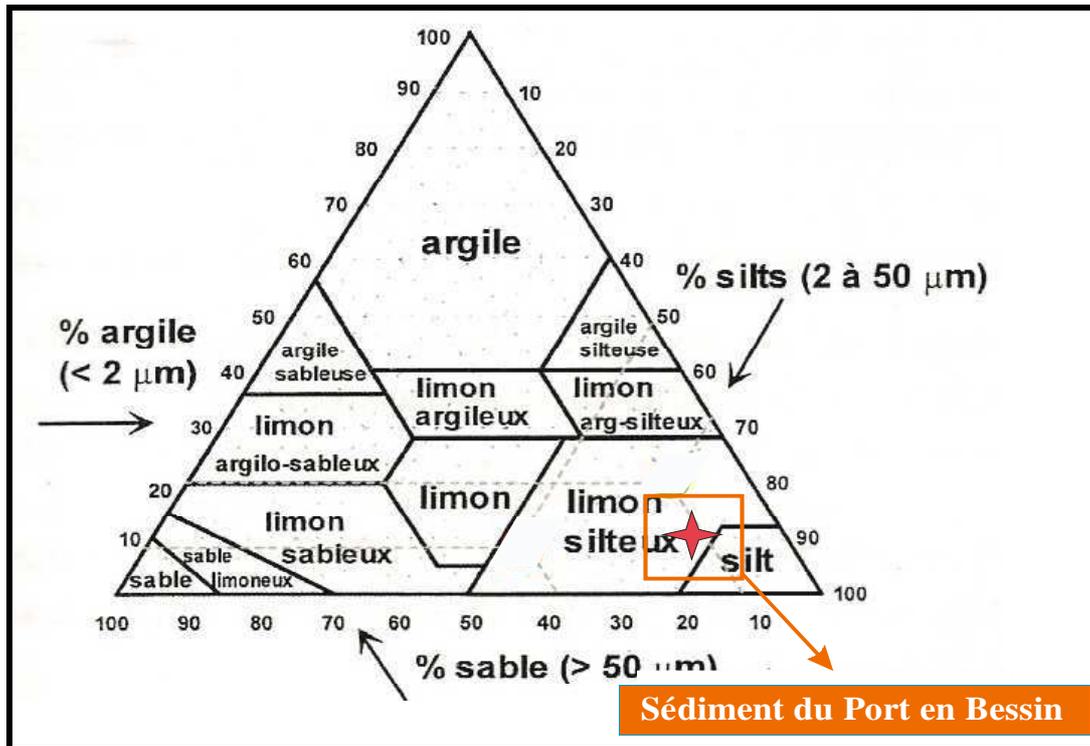


Figure III-8 : Classification triangulaire de Taylor des sols fins

Par ailleurs, sur la base du diagramme de triangulaire de Taylor (figure III-8), le sédiment de Port en Bessin est classé en limon-silteux.

3.2.2. Méthode de mesure de la masse volumique absolue par pycnomètre

La masse volumique absolue des sédiments, (ρ_s), est la masse par unité de volume des sédiments qui constituent le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre les grains. Il ne faut pas confondre la masse volumique absolue, (ρ_s), avec la masse volumique, (ρ), qui est la masse de matériau par unité de volume, celui-ci intégrant à la fois les grains et les vides.

3.2.2.1. Principe

L'échantillon, séché et pesé, est transféré dans un pycnomètre calibré et taré. Il permet de mesurer des volumes avec une grande précision. Dans cette méthode, nous cherchons la formule de la masse volumique. On l'obtient à partir des mesures et de la formule suivante :

$$M_3 = M_1 + M_2 - \left(\frac{M_2}{\rho_s}\right)\rho_e \quad \text{[III-1]}$$

Il s'agit alors de transformer la formule pour obtenir:

$$\rho_s = \frac{M_2 \rho_e}{M_1 + M_2 - M_3} \quad \text{[III-2]}$$

avec:

M_1 : la masse du pycnomètre rempli d'eau distillée jusqu'au niveau du trait repère [g],

M_2 : la masse d'un échantillon de sédiment sec (environ 50g) [g],

M_3 : la masse d'ensemble eau-pycnomètre-échantillon [g],

ρ_e : la masse volumique de l'eau [g/cm^3],

ρ_s : la masse volumique d'un échantillon [g/cm^3].

3.2.2.2. Résultats

La masse volumique des particules solides des sédiments obtenue dans notre cas correspond à la moyenne des mesures effectuées sur cinq échantillons de sédiments (tableau III-2).

Tableau III-2: Masse volumique des particules solides des sédiments

Echantillon	ρ_s (g/cm^3)
1	3,94
2	4,71
3	3,39
4	4,26
5	4,14
Moyenne	4,08

3.3. Teneur en matières organiques

Nous avons effectué la méthode perte au feu pour identifier la teneur en matière organique des sédiments Bassin n°2. Tout d'abord, le sédiment est séché à l'étuve pendant 24 heures à 60°C, nous avons choisi cette température éviter la modification minéralogique des sédiments. Ensuite, cinq échantillons d'environ 10g sont pesés (P_1) avec une précision de 0,1mg. Ces échantillons sont ensuite mis au four à 500°C pendant 6 heures avant d'être pesés (P_2).

L'estimation de la teneur totale en matière organique (C_{MO}) dans les sédiments est ensuite calculée par la formule:

$$C_{MO} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{(P_{1k} - P_{2k})}{P_{1k}} \quad \text{où } k=1 \text{ à } n \text{ est le nombre d'échantillons} \quad \text{[III-3]}$$

La teneur en matière organique exprimée en pourcentage de matière organique dans les sédiments est présentée dans le tableau III-3.

Tableau III-3 : Pourcentage de matières organiques des sédiments de bassin n°2 du Port en Bessin.

N° d'essai	1	2	3
Teneur en matière organique (%)	4,22	4,53	3,97

D'après les résultats présentés dans le tableau III-3, on constate que la teneur en matière organique des sédiments bassin n°2 du Port en Bessin varie de 3,97% à 4,22%. Par conséquent, on peut classer les sédiments du Port en Bessin en sédiments organiques ($C_{MO} > 3$). Selon le Guide français pour une classification des matériaux routiers, avec une proportion en matière organique supérieure à 3% et inférieure à 10% les sédiments étudiés appartient à la classe F regroupant les sol organiques, et plus particulièrement à la sous-classe F11.

3.4. Limites d'Atterberg des sédiments (NF P 94-051)

3.4.1. Principe

Les limites d'Atterberg sont encore utilisées à l'heure actuelle. L'indice de plasticité est la différence entre les humidités du sol au point limite de liquidité et au point limite de plasticité. Les points limites sont obtenus de façon empirique en manipulant une pâte humide de sol en train de se dessécher. Il s'agit de mettre en évidence les changements de comportement de cette pâte saturée qui marqueraient le passage entre les différents états hydro-structuraux traversés au cours du séchage.

3.4.2. Résultats

3.4.2.1. Limite de liquidité (W_L)

La limite de liquidité est déterminée à l'aide de la méthode de Casagrande (norme NF P 94 051). L'essai consiste à déterminer la relation entre la teneur en eau et la nombre de chocs imposés à une coupelle contenant le matériau.

Un échantillon de sédiment est mis en place à la spatule, de façon bien homogène. L'épaisseur au centre est de 15 à 20, le pourtour étant sensiblement horizontal. A l'aide de l'outil à rainurer, il faut creuser une rainure dans le mortier contenue dans la coupelle puis tourner la manivelle afin de provoquer le choc de celle-ci sur le bloc de bois dur. Par définition, la limite de liquidité est la teneur en eau qui correspond à la fermeture de la rainure sur 1 cm de longueur en 25 chocs. L'échantillon doit être à une teneur en eau légèrement supérieure à la limite de

liquidité, afin de pouvoir commencer l'essai avec une fermeture du sillon en 15 coups environ.

La limite de liquidité est déterminée à partir de la représentation graphique de la teneur en eau w , mesurée à chaque essai, en fonction du logarithme du nombre de coups correspondant. La limite de liquidité est la teneur en eau lue sur le graphique pour $N=25$ coups.

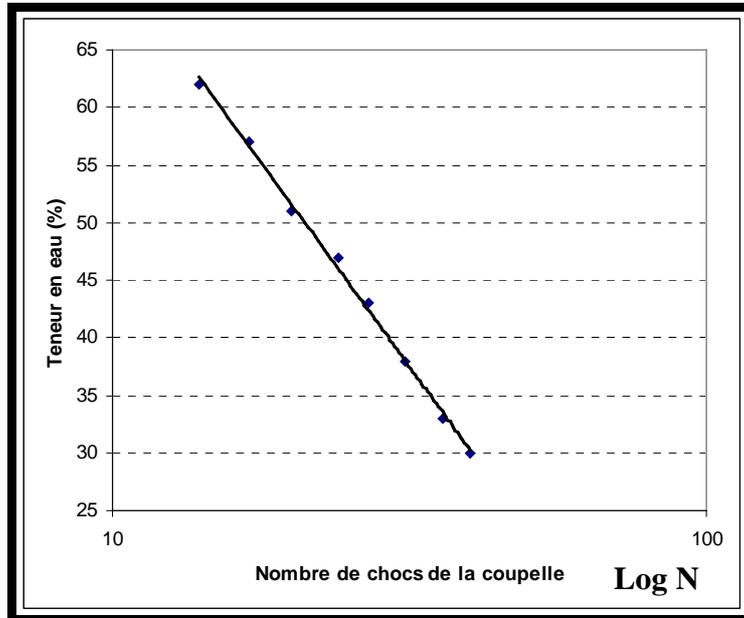


Figure III-9: La teneur en eau en fonction du nombre de chocs de la coupelle

La figure III-9 montre que la valeur de la teneur en eau correspondant à 25 chocs de la coupelle est d'environ 47%.

3.4.2.2. Limite de plasticité (W_P)

La limite de plasticité W_P est inférieure à W_L . Par définition, la limite de plasticité est la teneur en eau du cylindre qui se brise lorsque son diamètre atteint 3 mm. Cette teneur en eau doit être déterminée immédiatement après le test selon la procédure décrite lors de la détermination de W_L . Le cylindre terminé doit avoir de 10 à 15 cm de longueur. Pour déterminer la limite de plasticité, on fait une boulette de mortier grosse comme une noisette (environ 12 mm de diamètre) et ensuite on fait un cylindre en la roulant sur la plaque plane, par un mouvement alternatif d'environ un aller et retour par seconde. La limite de plasticité (W_P) a été déterminée en utilisant le processus décrit ci-dessus. Elle est de 49,5 % pour les sédiments utilisés dans notre étude. L'indice de plasticité est l'écart entre la limite de plasticité et la limite de liquidité ($I_P = W_L - W_P$). Le tableau ci-dessous présente les limites d'Atterberg des sédiments. Par définition, l'activité est le rapport de l'indice de plasticité au pourcentage la fraction argileuse ($\text{Activité} = I_P / J$).

Tableau III-4: Limites d'Atterberg des sédiments du Port en Bessin

Limite de plasticité (%)	Limite de liquidité (%)	Indice de plasticité Activité (%)
25,2	47	21,8

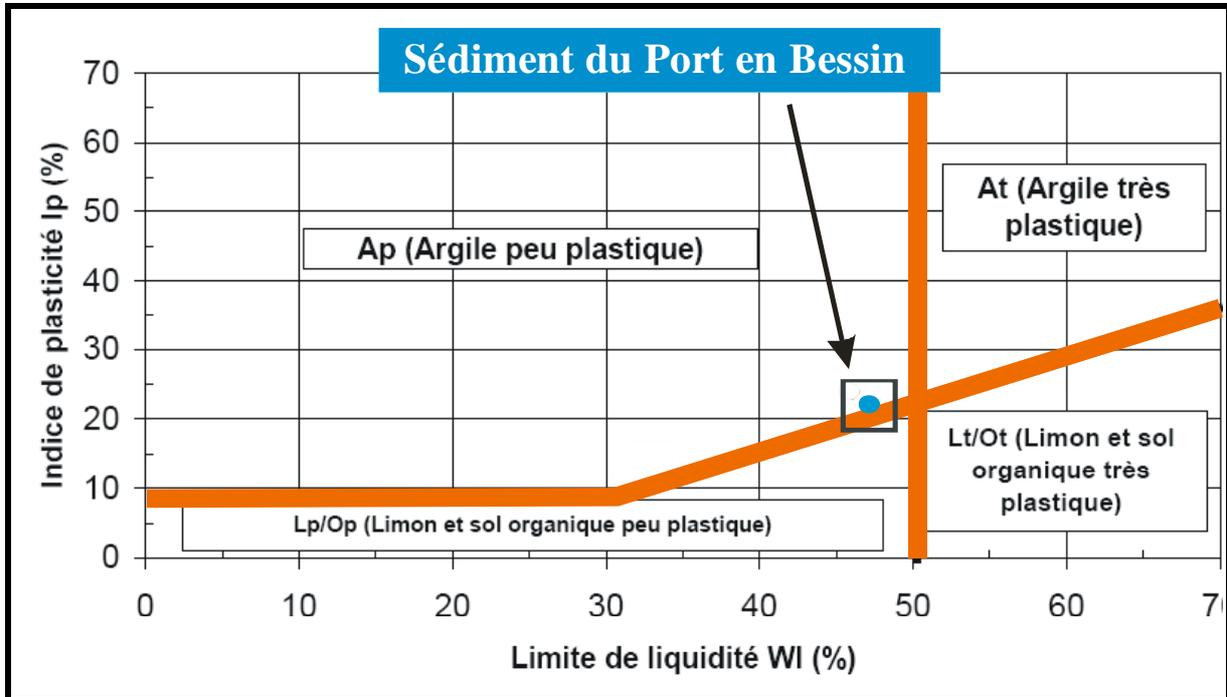


Figure III-10 : Diagramme de plasticité de Casagrande pour les sédiments du Port en Bessin

Sur la base du diagramme de plasticité de Casagrande (figure III-10), les sédiments du Port en Bessin est associé à la classe de matériaux dits argileux de plasticité moyenne.

3.5. Essai au bleu de méthylène (NF P 94-068)

L'essai au bleu de méthylène permet d'identifier la réactivité de la fraction argileuse (inférieure à 2 μm) présente dans un sédiment par mesure de la capacité des éléments fins à absorber le bleu de méthylène.

Cet essai consiste à doser en bleu de méthylène, juste nécessaire pour couvrir d'une couche mono moléculaire, les surfaces externes et internes des particules fines en suspension dans l'eau. La quantité de bleu adsorbée par un mélange est égale à la somme des quantités de bleu adsorbée par chaque groupe argileux qui rentre dans sa composition. Les smectites s'identifie avec des valeurs moyennes de bleu de méthylène comprises entre 20 et 35 et les illites entre 3 et 6.

Cinq essais au bleu de méthylène ont été réalisés sur des échantillons de notre sédiment. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau III-5. Ces résultats confirment le classement des sédiments utilisés en limon peu plastiques à plasticité moyenne.

Tableau III-5: Valeurs au bleu de méthylène des sédiments du Port en Bessin

Numéro d'essai	1	2	3	4	5
Valeur de bleu V_{BS}	4,3	3,96	4,17	4,46	4,73

Par ailleurs, selon la classification GTR, les sédiments étudiés sont classés dans la catégorie A_2 désignant les limons (Annexe A).

3.6. Essais Proctor Normal et Modifié (NF P 94-093)

La caractérisation des conditions optimales à mettre en œuvre pour réaliser un bon compactage, et en particulier la définition de la teneur en eau correspondante, nécessite une simulation en laboratoire qui permet de définir les conditions opératoires du compactage en place (Figure III-11). Simultanément, on étudie l'influence de la teneur en eau sur la portance du matériau après compactage.

On sait que par expérience, lorsqu'on compacte un sol, le poids volumique sec de matériau, (γ_d = poids du sol sec/volume échantillon), évolue. L'essai Proctor permet de tracer la courbe du poids volumique sec en fonction de la teneur en eau, pour une énergie de compactage donnée. Cette courbe permet de mettre en évidence un optimum de poids volumique.



Figure III-11: Matériel et méthode de réalisation des essais Proctor

Le choix de la méthode de compactage, (Normal ou Modifié), dépend de la grosseur, D , des plus gros grains du sol. Par exemple, Si $D \leq 5$ mm, le méthode de compactage Normal est autorisée, mais la méthode de compactage «Modifié» est conseillée.

Cet essai permet de déterminer deux grandeurs fondamentales, en particulier pour le déroulement et le contrôle des chantiers et terrassements:

- W_{OPN} teneur en eau à l'Optimum Proctor Normal (ou Modifié) ;
- γ_{dOPN} poids volumique sec à l'Optimum Proctor Normal (ou Modifié).

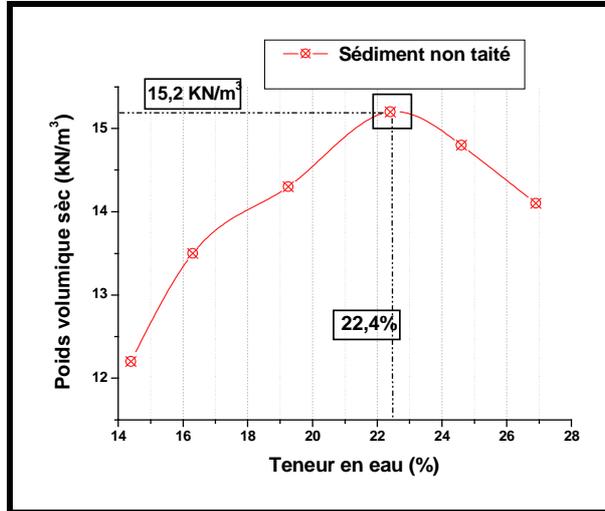


Figure III-12: Courbe Proctor Modifié des sédiments dragués du Port en Bessin

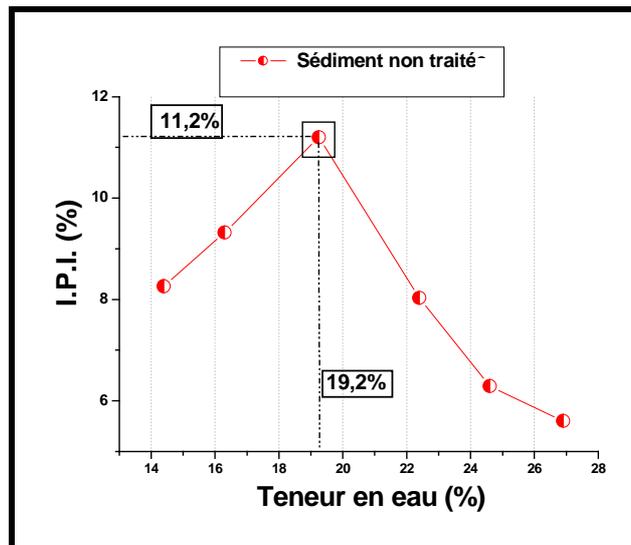


Figure III-13: Indice de Portance immédiat des sédiments dragués du Port en Bessin

La figure III-12 et III-13 montrent que pour les sédiments, la teneur en eau optimale correspondant au maximum poids volumique sec est de l'ordre de 22,4% avec poids volumique sec correspondant de l'ordre de 15,2 KN/m^3 . La valeur de l'indice de portance immédiat obtenue est de l'ordre 11,2% avec poids volumique sec de l'ordre 19,2%. Ces résultats ont mis en évidence la difficulté de circulation des engins sur le chantier et qu'un mauvais compactage de ces matériaux est à craindre.

3.7. Analyse minéralogique des sédiments par diffraction rayon X (DRX)

La méthode générale consiste à bombarder l'échantillon avec des rayons X, et à regarder l'intensité de rayons X qui est diffusée selon l'orientation dans l'espace. Les rayons X diffusés interfèrent entre eux, l'intensité présente donc des maxima dans certaines directions. Ce phénomène est appelé la diffraction. On enregistre l'intensité détectée en fonction de l'angle de déviation 2θ du faisceau. La courbe obtenue s'appelle le diffractomètre. Cette méthode permet de déterminer les changements minéralogiques des sédiments avant et après traitement. Le principe des méthodes de diffraction est basé sur l'utilisation de la loi de Bragg. Le principe du spectromètre à dispersion en longueur d'onde repose sur la réflexion sélective d'un faisceau de rayons X par un cristal avec utilisation de la loi de Bragg (Figure III-14):

$$d = (K\lambda) / (2\sin\theta)$$

[III-4]

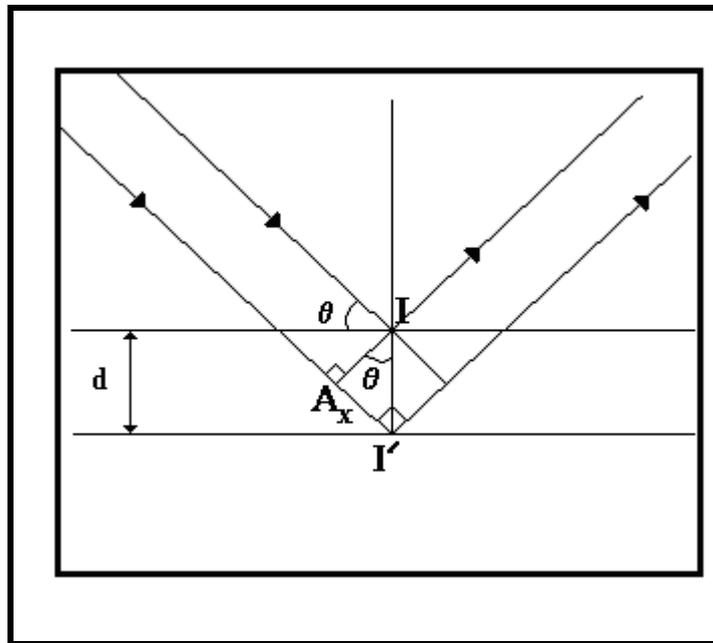


Figure III-14: Définition de la loi de Bragg (Hammond, 2001)

Avec

- d : distance inter réticulaire du cristal analyseur pour la réflexion utilisée,
- λ : longueur d'onde,
- θ : angle du faisceau incident avec la surface du cristal,
- n : (nombre entier positif souvent égal à l'unité) ordre de la réflexion.

L'intensité est proportionnelle à la concentration de l'élément considéré dans l'échantillon. La résolution et le pouvoir de réflexion sont les critères permettant de choisir les cristaux analyseurs. Ainsi, pour réfléchir les rayonnements de grande longueur d'onde, on utilisera des cristaux à grande distance interréticulaire alors que pour des rayonnements à petite longueur d'onde, on utilisera des cristaux à courte distance interréticulaire. Par conséquent, il est important de choisir un cristal adapté

pour chaque analyse d'échantillon afin d'obtenir des résultats optimaux. L'analyse par DRX permet de déterminer plus précisément la composition des sédiments. La détermination de la minéralogie précise des sédiments bruts et traités n'est pas un objectif, mais plus un outil permettant une meilleure compréhension des mécanismes liés à l'interaction entre les sédiments et la matrice cimentaire lors de leur valorisation.

D'après les travaux de Le Roux (1969), le tableau III-6, présente les caractéristiques des espèces argileuses. On peut constater que la smectite peut poser des problèmes pendant la durée de traitement des sédiments par liants hydrauliques. Une analyse des espèces argileuses des sédiments du Port en Bessin a été réalisée. Les pourcentages de chaque espèce sont exprimés en pourcentage de minéraux argileux présents dans la fraction inférieure à 2 µm. Ils sont arrondis à la classe de 5 % la plus proche (tableau III-6). Trois espèces composent le cortège argileux des sédiments : l'illite, La kaolinite et la smectite.

Tableau III-6 : Caractéristique de certaines argiles (Le Roux, 1969)

Type d'argile	Réactivité vis-à-vis de la chaux	Epaisseur des feuillets	Gonflement
kaolinite	peu réactive et nécessite des temps de contacts longs. Par contre, les produits formés, principalement des silicates de calcium hydratés, constituent un très bon ciment	7 Å	non gonflante
illite	très peu réactive	10 à 12 Å	non ou moyennement gonflante
smectite	très réactive avec formation abondante d'aluminates de calcium hydratés	11 à 15 Å	très gonflante

Tableau III-7 : Pourcentages relatifs des espèces argileuses présentes dans les sédiments du Port en Bessin

SEMI-QUANTIFICATION		
Minéraux argileux		Pourcentage
Nom	Symbole	
Smectites associées à un minéral interstratifié	14Sm-(10-14Sm)	32
Chlorite associée à un minéral interstratifié	14C-(14C-14Sm)	5
Minéral interstratifié	(10-14C)	9
Illite	I	29
Kaolinite	K	25

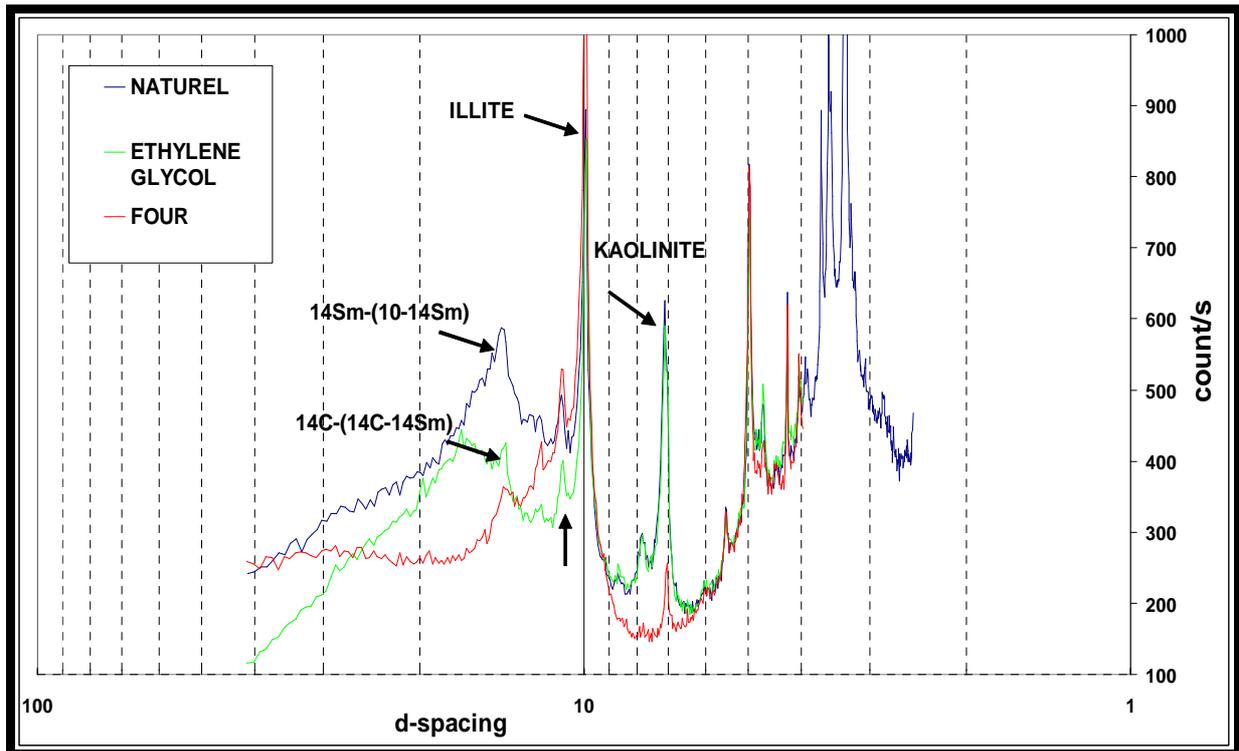


Figure III-15 : Diagramme de caractéristiques minéralogique de sédiment du Port en Bessin.

De ces résultats, il apparaît que les phases argileuses des sédiments Port en Bessin sont équitablement constituées de Smectites, d'Illites, et de Kaolinite. Compte tenu du tableau III-7, si la présence des deux premières (Illite et Kaolinite) est sans conséquence pour le futur traitement du matériau, celle, par contre de la Smectite est assez problématique.

3.7. Analyse géochimiques par l'essai de lixiviation

Des modifications peuvent intervenir lors du séchage à l'air libre notamment des polluants organiques. C'est la raison pour laquelle nous avons fait le choix de la filière de destination des sédiments à la fin de la période de déshydratation. Ce choix concerne la qualité géochimique finale du déblai, de sa qualité géotechnique et des opportunités d'utilisations pour des travaux de remblayage.

3.7.1. Résultats des analyses REPOM (2001-2004)

Pour identifier les caractéristiques géochimiques des sédiments représentatifs du bassin n°2 avant traitement, des essais de lixiviations ont été effectués en 2001, 2002, 2003 et 2004. Les résultats sont présentés sur le tableau III-8.

Les résultats REPOM nous montrent que la valeur de chrome (Cr) pour le résultat en 2003 proche de seuil N1. Des teneurs en cuivre (Cu) élevées sur les résultats des trois années d'observations.

Tableau III-8 : Caractéristique géochimique des sédiments de bassin n°2 (prélèvements effectués en 2001, 2002, 2003 et 2004)

Paramètres	Port de Port en Bessin Analyses REPOM				Référentiel de Qualité immersion (arrêté 14 Juin 2000)	
	2001	2002	2003	2004	N1	N2
As (mg/kg)	14,26	12	11	11	25	50
Cd (mg/kg)	0,26	0,5	0,5	0,5	1,2	2,4
Cr (mg/kg)	43	80	90	78	90	180
Cu (mg/kg)		266	167	144	45	90
Hg (mg/kg)	0,2	0,2	0,2	0,1	0,4	0,8
Pb (mg/kg)	47	107	52	56	100	200
Ni (mg/kg)	18	27	33	28	37	74
Zn (mg/kg)	380	385	311	458	276	552
Fluoranthène	<0,001	<0,1	0,4	0,3	0,4	5
Benzo(b) fluoranthène	0,0	<0,1	0,04	0,03	0,3	3
Benzo (k) fluoranthène	0,1	<0,1	0,3	0,2	0,2	2
Benzo (a) Anthracène	0,1	<0,1	0,1	0,1	0,2	2
Indéno (1,2,3-cd) pyrène	0,0	<0,1	0,2	0,2	0,2	1
Benzo (ghi) pérylène	<0,001	<0,1	0,2	0,1	0,2	2
Naphtalène	<0,004	<0,1	0,01	0,01		
Acénaphthylène	<0,024	<0,1	0,2	<0,022		
Acénaphthène	<0,0011	<0,1	0,0	0,1		
Fluorène	<0,0011	<0,1	0,1	0,1		
Phénanthrène	0,0014	<0,1	0,2	0,3		
Anthracène	0,0014	<0,1	0,03	0,02		
Pyrène	0,00055	<0,1	0,3	0,2		
Benzo (a) pyrène	<0,00131	<0,1	0,2	0,1		
Chrysène	0,1	<0,1	0,4	0,1		
Dibenzo (ah) anthracène	<0,7	<0,1	0,2	0,2		
PCB 28	<0,02	<0,001	<0,001	<0,001	0,025	0,05
PCB 52	<0,02	<0,001	<0,001	0,001	0,025	0,05
PCB 101	<0,02	0,0076	0,0017	0,001	0,5	0,1
PCB 118	<0,02	0,0067	0,0016	0,002	0,025	0,05
PCB 138	<0,02	0,0072	0,0032	0,002	0,05	0,1
PCB 153	<0,02	0,0067	0,0035	0,003	0,05	0,1
PCB 180	<0,02	0,0022	0,0021	0,001	0,025	0,05

La teneur en Cuivre en 2002 est 2,95 fois plus élevée que celle la valeur N2, 1,85 fois en 2003 et 1,6 en 2003. Malgré la tendance décroissante de l'évolution de la teneur en cuivre, ces valeurs restent très élevées par rapport au seuil référentiel d'immersion.

Les teneurs en zinc (Zn) se situent entre les seuils N1 et N2 depuis 2001 mais augmente avec de temps pour se rapprocher en 2004 du seuil N2. La présence élevée de cuivre, est due aux activités de carénage et de réparation navale dans le

bassin n°2. Cet élément est constitutif des peintures antifouling utilisées sur les navires. La teneur en plomb en 2002 dépasse le seuil N1. Par ailleurs, des teneurs en HAP assez importantes ont été révélées en 2003. Deux congénères atteignent de seuil N1 (Fluoranthène et Benzo (k) fluoranthène) et deux autres proches de N1 (Indéno (1, 2, 3-cd) pyrène et Benzo (ghi) pérylène). En 2004 ces teneurs en HAP diminuent pour le Benzo (k) fluoranthène et le Indéno (1,2,3-cd) pyrène et se rapprochent de la valeur N1.

3.7.2. Résultats des analyses par IN VIVO (2002)

Les échantillons utilisés pour cet essai sont prélevés sur 6 points du bassin n°2 (voir tableau III-9). Les échantillons 1, 2, et 3 ont été mélangés pour donner l'échantillon moyen 2BS et les échantillons 4, 5 et 6 pour avoir l'échantillon moyen 2BN. Les six échantillons ont été prélevés par carottage.

Tableau III-9 : Caractéristique géochimique des sédiments du bassin n°2 (prélèvements effectués en 2002 par IN VIVO)

Paramètres	Port de Port en Bessin Analyses d'Août 2002		Référentiel de Qualité immersion (arrêté 14 Juin 2000)	
	2BS	2BN	N1	N2
Micropolluants				
As (mg/kg)	15	13	25	50
Cd (mg/kg)	0,63	0,49	1,2	2,4
Cr (mg/kg)	74	47	90	180
Cu (mg/kg)	330	59	45	90
Hg (mg/kg)	0,29	0,22	0,4	0,8
Pb (mg/kg)	47	42	100	200
Ni (mg/kg)	31	22	37	74
Zn (mg/kg)	348	246	276	552
Fluoranthène	0,72	0,61	0,4	5
Benzo(b) fluoranthène	0,47	0,44	0,3	3
Benzo (k) fluoranthène	0,21	0,19	0,2	2
Benzo (a) Anthracène	0,4	0,38	0,2	2
Indénopyrène	0,29	0,25	0,2	1
Benzo (ghi) pérylène	0,27	0,23	0,2	2
PCB Totaux (mg/kg)				
PCB 28	<0,01	<0,01	0,025	0,05
PCB 52	<0,01	<0,01	0,025	0,05
PCB 101	<0,01	<0,01	0,5	0,1
PCB 118	<0,01	<0,01	0,025	0,05
PCB 138	<0,01	<0,01	0,05	0,1
PCB 153	0,02	<0,01	0,05	0,1
PCB 180	<0,01	<0,01	0,025	0,05

Les résultats d'analyse en éléments traces présentés sur le tableau III-9 montrent que les teneurs en HAP sont assez importantes. Pour l'échantillon 2BS, six congénères HAP atteignent le seuil N1 (Fluoranthène, Benzo(b) fluoranthène, Benzo (k) fluoranthène, Benzo (a) Anthracène, Indénopyrène et Benzo (ghi) pérylène).

Pour l'échantillon 2BN seul un congénère (Benzo (k) fluoranthène) ne dépasse pas seuil N1. La valeur en Cuivre (Cu) de l'échantillon 2BN atteint le seuil N1. Par contre, l'échantillon 2BS, la teneur en cuivre dépasse énormément le seuil N2 (soit 3,6 fois de seuil N2).

3.7.3. Campagne d'échantillonnage (Conseil Général du Calvados, Octobre 2004 et Juillet 2005)

Les campagnes de prélèvement par Conseil Général du Calvados ont été effectuées en 2003 et 2005. Les points sont identiques à ceux prélevés par IN VIVO 2002. Les résultats des prélèvements en 2004 et 2005 sont présentés sur la figure III-10.

Les analyses des résultats de 2004 montrent que l'échantillon de 2BS présente une valeur en chrome qui dépasse le seuil N1. La teneur en cuivre des échantillons 2BS et 2BN dépasse le seuil de N2, soit respectivement 1,98 fois pour 2BS et 1,23 fois pour 2BN par rapport au seuil N2. D'après les tendances observées, on pense que ces valeurs importantes en cuivre peuvent dépasser dans le future le seuil N3. La tendance montre un accroissement en 2005 pour l'échantillon 2BS (475) mais ce n'est pas le cas pour l'échantillon 2BN (97,8 mg/Kg).

Les teneurs en nickel et en zinc montrent un dépassement du seuil N1 pour les deux échantillons, mais leurs teneurs pour l'échantillon 2BS sont plus importantes que celles de 2BN.

Les analyses en 2005 montrent également une valeur de cadmium qui dépasse largement le seuil N1 et se rapproche du seuil N2. Les teneurs en cuivre dépassent largement le seuil N2, de 5,72 fois pour l'échantillon 2BS et de 1,1 fois pour celui de 2BN. Les teneurs en Plomb pour l'échantillon 2BS dépassent le seuil N2 et le seuil N1 pour l'échantillon 2BN. Pour ce qui concerne la teneur en Zinc, les deux échantillons montrent un dépassement du seuil N1.

Tableau III-10 : Caractéristique géochimique des sédiments du bassin n°2 (prélèvements effectués en 2004 et 2005)

Paramètres	Port de Port en Bessin				Référentiel de Qualité immersion (arrêté 14 Juin 2000)	
	Octobre 2004		Juillet 2005		N1	N2
Micropolluants	2BS	2BN	2BS	2BN		
As (mg/kg)	11,1	10,7	9	8,2	25	50
Cd (mg/kg)	0,5	0,5	2	2	1,2	2,4
Cr (mg/kg)	112	71	60	110	90	180
Cu (mg/kg)	179	111	475	97,8	45	90
Hg (mg/kg)	0,14	0,12	0,135	0,11	0,4	0,8
Pb (mg/kg)	44	50	215	154	100	200
Ni (mg/kg)	55	29	30	58,2	37	74
Zn (mg/kg)	350	347	440	306	276	552
Fluoranthène	0,322	0,184	<0,008	<0,08	0,4	5
Benzo(b) fluoranthène	0,299	0,13	0,0467	0,0091	0,3	3
Benzo (k) fluoranthène	0,118	0,066	0,0213	<0,004	0,2	2
Benzo (a) Anthracène	0,179	0,089	0,0275	0,0061	0,2	2
Indénopyrène	0,169	0,096	0,0269	0,0047	0,2	1
Benzo (ghi) pérylène	0,14	0,083	<0,008	<0,008	0,2	2
Naphtalène	0,035	0,015	<0,04	<0,04		
Acénaphylène	<0,01	<0,01	<0,08	<0,08		
Acénaphène	0,017	0,0038	<0,04	<0,04		
Fluorène	0,045	0,038	<0,008	<0,008		
Phénanthrène	0,137	0,117	0,0548	0,23		
Anthracène	0,029	0,012	<0,004	<0,004		
Pyrène	0,294	0,174	0,114	0,0238		
Benzo (a) pyrène	0,185	0,105	0,043	0,0133		
Chrysène	0,154	0,13	0,139	0,0277		
Dibenzo (ah) anthracène	0,037	0,019	<0,008	<0,008		
PCB Totaux (mg/kg)						
PCB 28	0,001	<0,001	<0,1	<0,1	0,025	0,05
PCB 52	0,0017	<0,001	<0,1	<0,1	0,025	0,05
PCB 101	<0,001	<0,001	<0,1	<0,1	0,5	0,1
PCB 118	0,0011	<0,001	<0,1	<0,1	0,025	0,05
PCB 138	0,0023	0,014	<0,1	<0,1	0,05	0,1
PCB 153	0,0026	0,024	<0,1	<0,1	0,05	0,1
PCB 180	0,001	<0,001	<0,1	<0,1	0,025	0,05

3.7.4. Campagne d'échantillonnage (Conseil Général du Calvados, 18 avril 2008 et 05-Janvier 2009)

Des prélèvements d'échantillons ont été effectués le 18 Avril 2008 et le 05 Janvier 2009 dans la chambre ressuyage. Les sédiments utilisés sont prélevés à l'aide de pelle manuelle.

La décision du Conseil n°2003/33/CE a établi des valeurs de références concernant les critères d'acceptation dans les décharges de déchets inertes, non dangereux et dangereux. Ces valeurs concernent des éléments contenus dans les lixiviats et non dans les matériaux bruts.

Tableau III-11 : Caractéristique géochimique des sédiments du bassin n°2 (prélèvements effectués en 2002, 2008 et 2009)

Paramètres	Port en Bessin		Valeurs de référence (Décision du Conseil n°2003/33/CE)		
	Avril 2008	Janvier 2009	Déchet inerte	Déchet non- dangereux	Déchet dangereux
Micropolluants					
As (mg/kg)	11	0,13	0,5	2	25
Cd (mg/kg)	0,6	<0,01	0,04	1	5
Cr (mg/kg)	44	<0,05	2	50	100
Cu (mg/kg)	0,25	<0,03	0,01	0,2	2
Hg (mg/kg)	nm	nm	0,01	0,2	2
Pb (mg/kg)	42	<1	0,5	10	50
Ni (mg/kg)	19	<0,5	0,4	10	40
Zn (mg/kg)	250	<0,2	4	50	200
Chlorures en Cl	nm	6980	800	15000	25000
Sulfates en SO ₄	nm	2110	1000	20000	50000
Florures en F	nm	7,40	10	150	500
COT	nm	289	500	800	1000

Les résultats sont présentés sur la tableau III-11. On peut constater que les échantillons de 2008 possèdent un taux d'Arsenic inférieur au seuil toléré pour une entrée en décharge en tant que déchet dangereux. Par conséquent, les vases de dragage sont classés dans la catégorie de déchet non dangereux

Nous pouvons remarquer le tableau III-12, que la teneur en chrome en 2008 se situe entre la zone de déchet inerte et déchet non dangereux. Nous pouvons également remarquer un dépassement du seuil des déchets inertes en 2002 et 2009. Par conséquent, pour le chrome, les sédiments seront classés en déchets non dangereux. Par ailleurs, on constate un dépassement du seuil de déchet non dangereux pour le nickel en 2008. L'échantillon de 2008 montre également un dépassement du seuil déchet dangereux pour le taux de Zinc.

Le tableau III-12 présente les résultats de tous les essais de lixiviation réalisés entre 2001 et 2009. Rappelons que, de tous les échantillons effectués, seul l'échantillon en 2009 a été prélevé dans la chambre de dépôt. Par contre, les autres échantillons ont été directement prélevés du bassin n°2. Par conséquent les résultats des analyses géochimiques des échantillons en 2009 ne mettent pas en évidence des concentrations élevées en métaux lourds nécessitant des solutions particulières. Dans cette comparaison, la valeur référentielle de qualité est définie par la Décision du Conseil n° 2003/33/CE. Sur le tableau III-12, la zone considérée comme déchet inerte est colorée en vert, la zone de déchet non dangereux en jaune et la zone de déchet dangereux en rouge.

Les taux de métaux lourds dans la vase de dragage du bassin n°2 nous emmène à la classer comme déchet non-dangereux.

Tableau III-12 : Caractéristique géochimiques des sédiments de bassin n°2 (2001 –2009)

Paramètre	Analyses REPOM				Analyses IN VIVO		Conseil Général					
	2001	2002	2003	2004	2002		2004		2005		2008	2009
					2BS	2BN	2BS	2BN	2BS	2BN		
Micropolluants												
As (mg/kg)	14,26	12	11	11	15	13	11,1	10,7	9	8,2	11	0,13
Cd (mg/kg)	0,26	0,5	0,5	0,5	0,63	0,49	0,5	0,5	2	2	0,6	<0,01
Cr (mg/kg)	43	80	90	78	74	47	112	71	60	110	44	<0,05
Cu (mg/kg)		266	167	144	330	59	179	111	475	97,8	0,25	<0,03
Hg (mg/kg)	0,2	0,2	0,2	0,1	0,29	0,22	0,14	0,12	0,135	0,11	nm	nm
Pb (mg/kg)	47	107	52	56	47	42	44	50	215	154	42	<1
Ni (mg/kg)	18	27	33	28	31	22	55	29	30	58,2	19	<0,5
Zn (mg/kg)	380	385	311	458	348	246	350	347	440	306	250	<0,2

Les concentrations en chrome, cuivre, plomb et zinc sont importantes. Ces teneurs sont supérieures au seuil des déchets dangereux. Par conséquent, au travers la grille référentiel pour une qualité d’immersion, les sédiments du bassin n°2 sont jugés comme présentant un risque écotoxicologique non négligeable sur l’écosystème marin. Pour cette raison, les déblais de dragages du bassin n°2 doivent être traités avant toute application en technique routière. En effet, un déchet dangereux ne peut pas être valorisé ou recyclé, et sa destination finale est obligatoirement un centre de stockage de déchet ou un centre de traitement spécifique.

Conclusion

Il ressort de ce chapitre les points importants suivants : d'après les résultats, les sédiments utilisés sont rangés dans la classe limon-silteux, Par rapport à leur granulométrie est la teneur en matières organiques, selon le guide GTR., nos sédiments sont rangés dans la classe F₄F₁₁. La valeur de l'indice de portance immédiat obtenue, et la teneur en eau optimale, a mis en évidence la difficulté de circulation des engins sur le chantier et qu'un mauvais compactage de ces matériaux est à craindre. D'après les résultats d'essai DRX les phases argileuses des nos sédiments sont constituées de d'Illites, de Kaolinite, et de Smectites. Un risque de gonflement est à craindre dû essentiellement à la présence de la Smectite. L'évaluation des impacts environnementaux des sédiments a été approchée aux travers des essais de lixiviation XP X 31211. Au regard des résultats obtenus et fonction de la législation choisie, il apparaît que certains métaux lourds dépassent les seuils pour une classification en déchets inerte pour les sédiments marin étudiés. Pour les sédiments du Port en Bessin, ces matériaux peuvent classés en tant que déchet non-dangereux.

CHAPITRE 4

MATERIAUX ET METHODES DE PREPARATION DES ECHANTILLONS

Introduction

Les essais de stabilisation des sédiments marins par des liants hydrauliques et pouzzolanique nécessitent une caractérisation des liants utilisés. Ceci nous amène donc à définir les différentes caractéristiques des liants utilisés dans le cadre ces travaux.

4.1. Les fumées de silice

4.1.1. Analyse granulométrique par laser.

La finesse est la plus importante caractéristique des fumées de silice par rapport à la réaction pouzzolanique, parce qu'elle permet aux particules des fumées de silice d'être absorbées par celles du ciment et d'empêcher celui-ci de flocculer. De plus, les micro-particules de la fumée de silice peuvent diminuer l'espace vide entre les particules du ciment, ce qui provoque la diminution du rapport E/C du mélange, où E, représente la masse d'eau et C, la masse de liant, c'est-à-dire la masse de l'ensemble fumée de silice, chaux et ciment.

En effet, moins il y a d'espaces vides dans le mélange moins le mélange a besoin d'eau. Ceci signifie une diminution du rapport E/C du mélange.

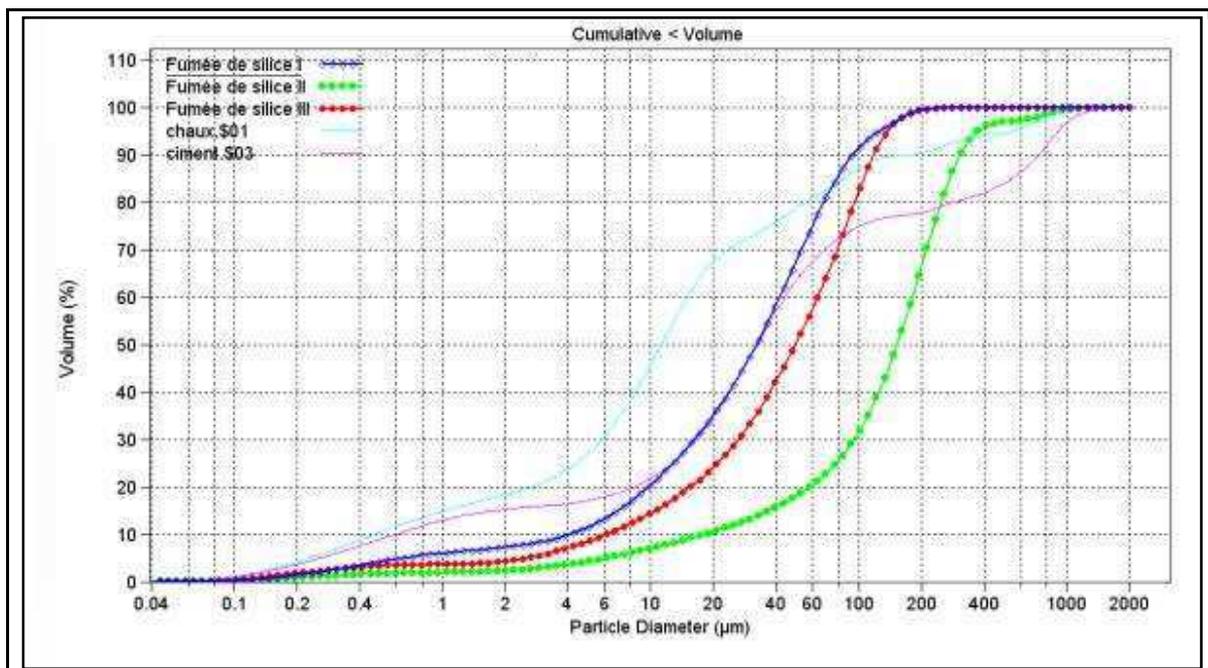


Figure IV-1 : Distributions granulométriques de la fumée de silice, de la chaux et du ciment utilisés

Les particules fines du ciment ont également la capacité de combler l'espace vide, mais elles se dissolvent rapidement dans l'eau, ce qui n'est pas efficace pour faire du remplissage. Avec un faible rapport E/C, on peut diminuer le phénomène de gonflement /expansion. Par contre, avec un rapport élevé de E/C, le mélange a plus d'espace disponible. Ceci permet l'hydratation du milieu poreux et la formation de

nombreux cristaux d'hydroxyde de calcium et d'ettringite, composés responsables du phénomène de gonflement /expansion du mortier

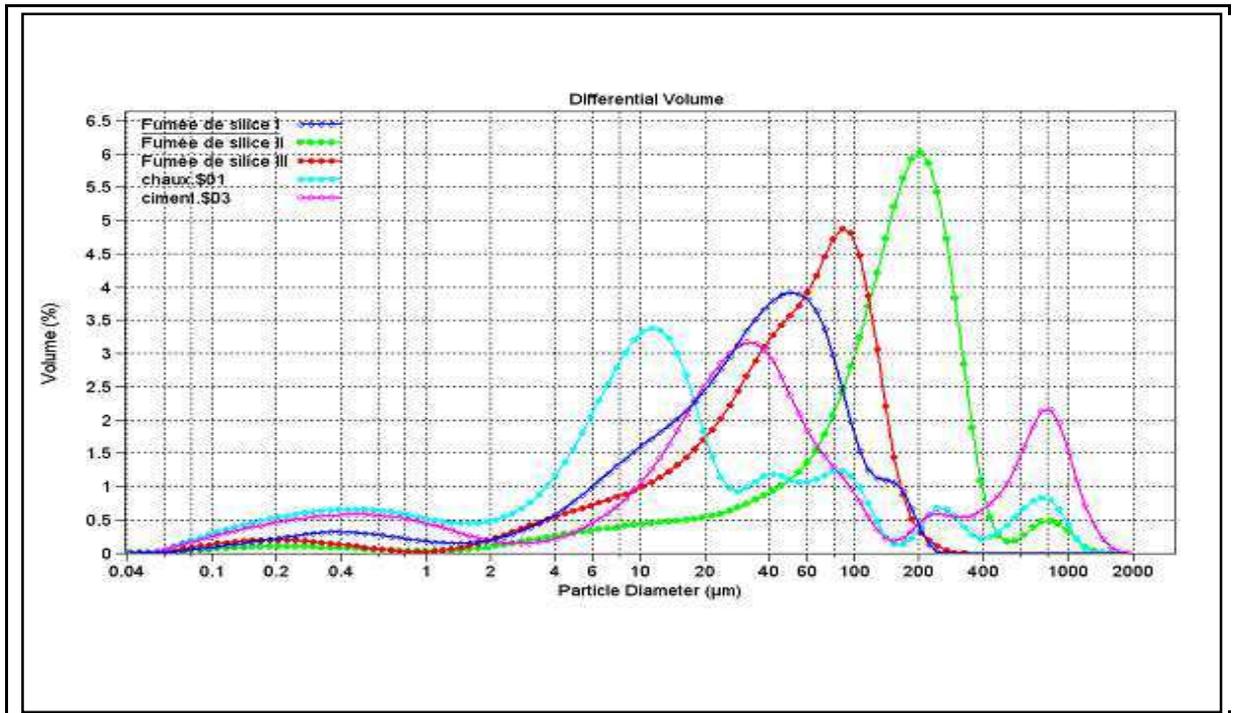


Figure IV-2 : Distributions granulométriques des fumées de silice, de la chaux et du ciment utilisés

Les figures IV-1 et IV-2 montrent les résultats des analyses granulométriques des 3 différentes fumées de silice, de la chaux et du ciment utilisés dans cette étude. La chaux est la plus fine entre tous de ces matériaux utilisés, suivie par le ciment jusqu'au diamètre 10µm et enfin par la fumée de silice type I et type II.

Parmi les 3 fumées de silice utilisées, la fumée de silice de type 2 contient des particules de diamètre les plus importants (200 µm), donc sur la base de ces résultats nous considérons que la fumée de silice de type 2 est la moins réactive par rapport aux autres. Comme expliqué avant, la réactivité des fumées de silice dépend de sa finesse et des caractéristiques chimiques pour diminuer l'espace vide entre les particules de ciment afin de fournir une résistance additionnelle. En revanche, vis-à-vis de la finesse des particules, la fumée de silice type I est la plus réactive parmi les autres. Ce résultat peut être confirmé par les essais en compression simple.

Tableau IV-1 : Résultats granulométriques des sédiments, des fumées de silice, de la chaux et du ciment

	Chaux	Ciment	FS type I	FS type II	FS type III
D10(µm)	0.5	0.6	4.0	18.2	6
D50(µm)	11.3	32.6	32.3	153	49.7
D90(µm)	172	730	93	307	118
Fraction argileuse (<2 µm) (%)	18.3	15.2	7.3	2.3	4.3
Fraction silteuse (2 à 63 µm) (%)	63.1	53.3	70.0	18.9	55.5
fraction sableuse (> 63 µm) (%)	19.7	31.5	22.7	78.8	40.1

Nota : FS = fumée de silice

Le tableau IV-1 fournit les fractions granulométriques de tous les liants utilisés dans ces travaux. Comme on peut le constater, tous les liants sont majoritairement composés d'une fraction "silteuse", sauf la fumée de silice type III où cette fraction est de 18,9% mais qui contient une fraction importante de sable (78.8%).

4.1. 2. Caractéristiques minéralogiques.

Les caractéristiques de trois types de fumée de silice sont présentées sur le tableau IV-2. Les résultats montrent que la fumée de silice type 1 (FS1) contient un pourcentage de Dioxyde de silice (SiO₂) plus important. Le fort pourcentage de SiO₂ est un facteur important dans l'évolution des performances mécaniques des échantillons. En effet, le SiO₂ contribue à la production du silicate calcique hydraté C-S-H. Ce produit une fois hydraté renforce les liaisons entre les particules des sédiments ce qui leur procure une résistance plus élevée. Contrairement, la fumée de silice type 2 (FS2) qui présente un pourcentage de SiO₂ inférieure aux autres.

Rappelons que la dissolution de la chaux permet grâce à l'élévation de pH de provoquer la dissolution de la silice (SiO₂) et de l'alumine (Al₂O₃) contenues dans les cendres volantes. Ces deux composantes vont alors réagir avec l'eau et la chaux éteinte [Ca(OH)₂] provenant de la chaux vive ou/et du ciment au cours de la réaction pouzzolanique, pour former du silicate calcique hydraté (C-S-H) et de l'aluminate calcique hydraté (C-A-H), deux produits qui ont des propriétés liantes :

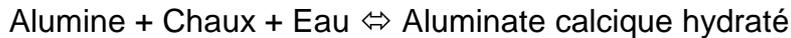
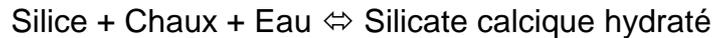


Tableau IV-2 : Composition chimique des trois fumées de silice utilisées

	FS 1	FS 2	FS 3
Couleur	GRIS CLAIRE	BLEUE	GRIS FONCEE
Dioxyde de silice (SiO₂)	90 - 92	85-90	90 - 95
Oxyde de fer (Fe₂O₃)	1,5 - 2	1,5 - 2	1,5 - 2
Oxyde d'aluminium (Al₂O₃)	1	1	1-1,5
Oxyde de calcium (CaO)	0,5 - 1	0,5 - 1	0,5 - 1
Oxyde de magnésium (MgO)	1 - 1,5	1 - 1,5	1
Oxyde de sodium (Na₂O)	0,5 - 1	1 - 1,5	0,8 - 1
Oxyde de potassium (K₂O)	1 - 1,3	1 - 1,3	1,3 - 1,5
Carbone (C)	0,5 - 1	1-1,5	1 - 1,5
free Si (%)	< 0,2	< 0,4	< 0,4
CaO libre (%)	< 1	< 2	< 1
SO₃ (%)	< 1	< 2	< 1
Cl (%)	< 0,2	< 0,5	< 0,1
Surface spécifique (m²/g)	18 - 25	15 - 30	15 - 35
Masse volumique (kg/m³)	500 - 700	500 - 700 (920D)	500 - 650

Les mélanges à utiliser diffèrent dans leur composition selon la nature des sols à traiter. Ainsi, nos résultats expérimentaux obtenus avec des mélanges ne contenant aucune fraction de sol sont seulement théoriques et idéaux mais permettent de visualiser les réactions intervenant entre chaque constituant et ainsi

de fixer des références qui permettront par la suite des comparaisons pour chaque type de sol.

En effet, grâce à la fourniture de la silice et de l'alumine par les minéraux argileux contenus dans les sols, les réactions pouzzolaniques peuvent durer plusieurs années et contribuent ainsi à améliorer, à long terme, la résistance des ouvrages en créant des produits aux capacités liantes telle que la silicate calcique hydraté (C-S-H) et l'aluminat calcique hydraté (C-A-H). Par conséquent, on peut conclure que la fumée de silice type 1 (FS1) contribue d'une façon importante à l'augmentation des performances mécaniques des sédiments traités par rapport aux autres liants.

La fumée de silice type 2 (FS2) possède un pourcentage de Free et de CaO plus important. La teneur en Free/CaO est également un élément important pour assurer la réussite de la réaction pouzzolanique des liants utilisés.

Par ailleurs, on constate également que la fumée de silice type 2 (FS2) contient un pourcentage de SO_3 plus important que les autres fumées de silice. Ceci peut provoquer une production d'ettringite, facteur jouant un rôle important dans le gonflement et la diminution de la résistance des échantillons.

4.2. Les cendres volantes

4.2.1. Analyse granulométrique par laser.

La finesse est la plus importante caractéristique des cendres volantes par rapport à la réaction pouzzolanique (Joshi et Lohtia 1997), parce qu'elle permet aux particules des cendres volantes d'être absorbées par celles du ciment et d'empêcher celui-ci de flocculer. De plus, les micro-particules de la cendre volante peuvent diminuer l'espace vide entre les particules du ciment, ce qui provoque la diminution du rapport E/C du mélange, où E, représente la masse d'eau et C, la masse de liant, c'est-à-dire la masse de l'ensemble cendre volante, la chaux et du ciment.

La figure IV-3 montre que les particules constituant les deux types de cendres volantes ont toutes un diamètre compris entre 0.04 μm et 300 micromètres. Il apparaît que les particules les plus représentées ont un diamètre de 34 μm pour la Sodeline, et de 18 μm pour la Soproline. La courbe de la Soproline présente un deuxième pic entre le diamètre 116 μm et 270 μm avec pourcentage moins de 2 %, ce qui signifie que la Soproline contient plus de particules dont le diamètre sont compris entre 116 μm et 270 μm par rapport à la Sodeline.

Le tableau IV-3 fournit les répartitions des particules dans les échantillons de Soproline et de Sodeline selon leur diamètre. Le tableau montre que la Sodeline contient plus de particules avec des diamètres comme ceux de limons, d'argiles, et de colloïdes, que la Soproline, par contre la Soproline contient plus de grandes particules (19.2 μm) que la Sodeline (17.5 μm), par rapport à D_{50} (le diamètre de particules moyennes). Ceci signifie que la Sodeline nécessite un rapport E/C plus élevé, et que la Soproline est moins résistante à l'attaque de sulfate que la Sodeline

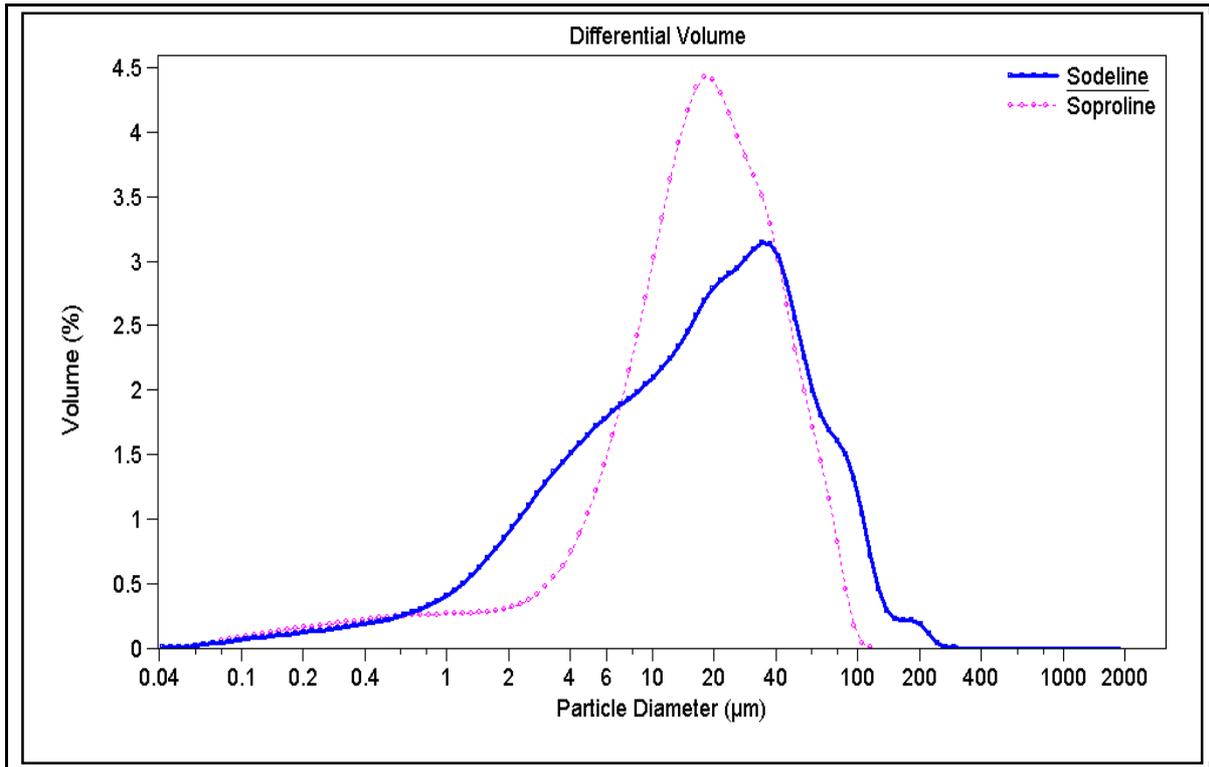


Figure IV-3 : Distribution granulométrique des cendres volantes.

En effet, plus le rapport E/C plus élevé, plus il y a hydratation du milieu poreux et formation de grand cristaux d'hydroxyde de calcium et d'ettringite, composés responsables du gonflement /expansion du mortier.

Tableau IV-3. Résultats des analyses granulométriques obtenues sur les cendres volantes

Cendres volantes	Soproline	Sodeline
< 1 µm (%)	3.2	4.7
1 à 5 µm (%)	10.5	17.5
5 à 74 µm (%)	74.6	69.4
74 à 200 µm (%)	9.7	7.5
200 à 400 µm (%)	1.3	0.2
D ₁₀ (µm)	3.4	2.1
D ₂₅ (µm)	9.0	5.9
D ₅₀ (µm)	19.2	17.5
D ₇₅ (µm)	38.8	38.7
D ₉₀ (µm)	83.4	68.2

La finesse des particules est une des caractéristiques physiques principales des cendres volantes. Si l'on ajoute leur forme, elles influent énormément sur la maniabilité et la réaction pouzzolanique. Plus les grains sont fins, plus la maniabilité du mélange sera importante, et plus la réaction pouzzolanique augmente. La maniabilité d'une pâte est très importante sur le terrain car elle détermine la durée au cours de laquelle la pâte peut être travaillée. Sur un chantier, la maniabilité de la pâte ne doit pas être trop faible pour que les hommes aient le temps de l'étaler, mais elle

ne doit pas être trop grande non plus pour que la pâte durcisse assez tôt et n'empêche pas les travaux de continuer en interdisant aux engins de passer.

Grâce à l'analyse micro granulométrique par laser, nous pouvons estimer, que la Sodeline a besoin de moins d'eau pour obtenir la maniabilité idéale. Le pourcentage de particules dont le diamètre est supérieur à 45 μm a un effet négatif à sur les résistances à 28 et 90 jours (Joshi et Lohtia, 1997). Par contre le pourcentage de particules dont le diamètre inférieur à 10 μm a un effet positif sur les résistances. Ainsi avec le tableau IV-3, on peut déterminer les pourcentages des particules dont le diamètre est supérieur à 45 μm pour la Sodeline, qui est de l'ordre de 18.21 %, mais pour la Soproline, le calcul donne une valeur de l'ordre de 19.90 %. Le pourcentages des particules dont le diamètre est inférieur à 10 μm est de l'ordre de 35,49 % pour la Sodeline et de 27,20 % pour la Soproline. Ceci signifie que la Sodeline sera plus résistante que la Sodeline. La figure IV-4 montre que les particules constituant les liants et la vase du Port e Bessin ont toutes un diamètre compris entre 0.04 μm et 300 micromètres.

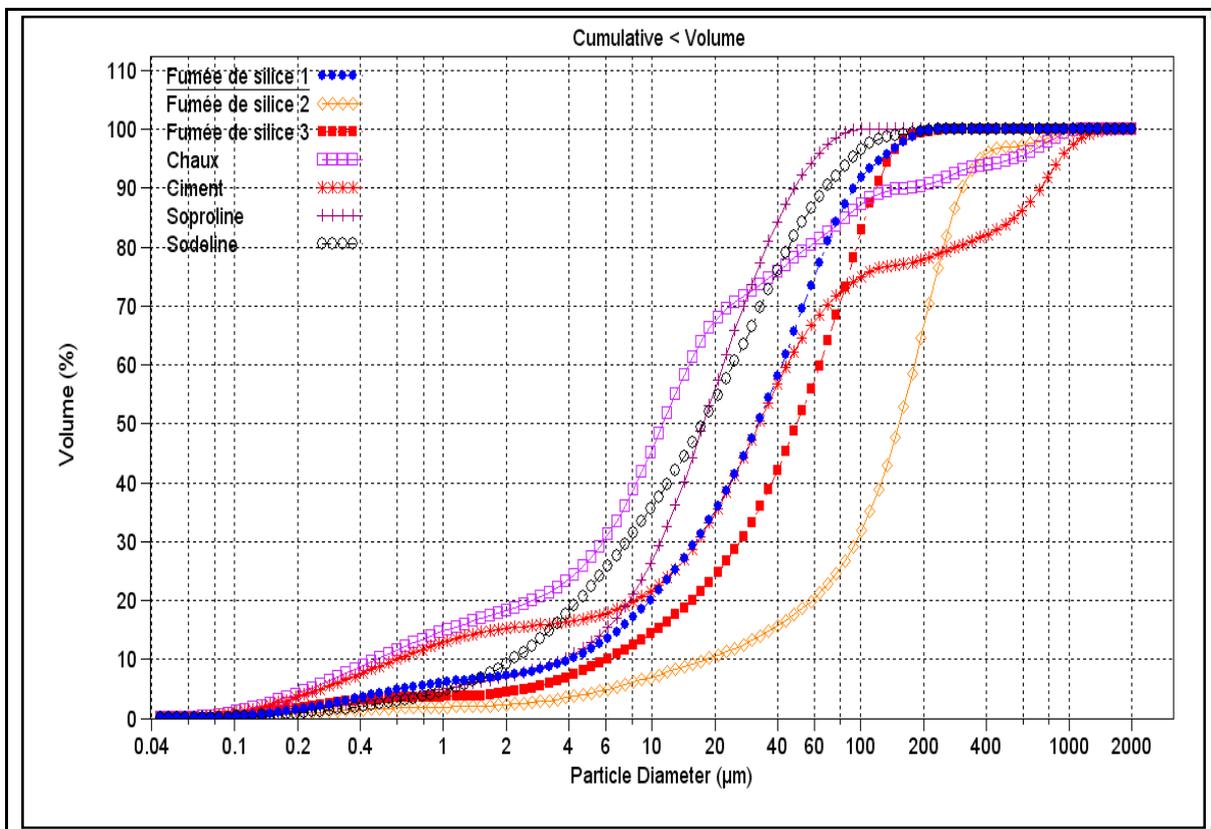


Figure IV-4 : Distribution granulométrique des fumées de silice, de la chaux, du ciment et des cendres volantes utilisés

La figure IV-4 présente la répartition granulométrique de tous liants utilisés dans notre étude. Les résultats montrent que la fumée de silice type 2 (FS2) possède des particules plus gros que les autres liants utilisés. Par contre, la chaux est le liant qui possède le pourcentage plus élevé de particules de diamètre 30 μm . La Sodeline et Soproline ont un pourcentage plus important de particules de diamètre supérieur à 30 μm . On remarque également que les deux cendres volantes utilisées possèdent

des particules plus fines que les trois fumées de silice. Par conséquent, les résultats de cette analyse granulométrique permettent de déduire que les cendres volantes utilisées dans cette étude ont un effet positif avec leur rôle de filler de espaces vides entre des particules, plus que les fumées de silice. On pense que les cendres volantes vont influencer l'évolution mécanique et le comportement des échantillons au compactage aux jeunes âges, d'une façon plus importante que les fumées de silice.

Tableau IV-4. Analyse granulométriques des liants utilisées

	Chaux	Ciment	Sodeline	Soproline	FS type1	FS type 2	FS type 3
D10(μm)	0.5	0.6	2.1	3.4	4	18.2	6
D50(μm)	11.3	32.6	17.5	19.2	32.3	153	49.7
D90(μm)	172	730	2.2	3.8	93	307	118
Fraction argileuse (<2 μm) (%)	18.3	15.2	10.2	7.4	7.3	2.3	4.3
Fraction silteuse (2 à 63 μm) (%)	63.2	53.3	79.4	88.9	70	18.9	55.5
fraction sableuse (> 63 μm) (%)	19.7	31.5	10.5	3.8	22.7	78.8	40.1

Le tableau IV-4 présente les répartitions des particules dans les échantillons des liants utilisés selon leur diamètre. On constate que la chaux contient plus de particules avec des diamètres proches de ceux des limons, des argiles, et des colloïdes, comparativement aux autres liants. Par contre, le ciment contient plus de grosses particules (<63 μm) par rapport aux autres. Par rapport à D_{50} (le diamètre de particules moyennes), la chaux possède également le pourcentage plus élevé dans la fraction argileuse. Cependant, la Sodeline possède un pourcentage plus important dans la fraction silteuse.

4.2.2. Caractéristiques minéralogiques.

La Sodeline est considéré comme une Cendre volante silico-alumineuse, elle est issue de la combustion dans un Lit Fluidisé Circulant à basse température (850°C). Par contre, la Soproline est considéré comme une Cendre volante sulfo-calcique, et issue de la combustion dans un Lit Fluidisé Circulant à basse température (850°C).

Tableau IV-5. Composition chimique de Sodeline et Soproline

	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	MnO ₂	CaO _{total}	CaO _{libre}	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃
Sodeline	47.36	7.09	21.63	3.32	0.62	8.52	0.90	0.46	4.35	4.02
Soproline	20.38	1.91	11.70	1.07	0.03	35.31	13.35	0.13	17.11	17.11

Le tableau IV-5 présente la composition minéralogique de Sodeline et Soproline. En effet, les cendres volantes réagissent comme une fumée de silice mais avec une réactivité moins importante que la fumée de silice. elles produisent presque le même produit d'hydratation: C-SH et C-A-H. A cause de leur faible teneur en Dioxyde de silice (SiO₂) par rapport à de la fumée de silice, leur effet sur la résistance à la compression est moins importante que celle due à la fumée de silice.

Les résultats montrent que la Sodeline contient un pourcentage de Dioxyde de silice (SiO₂) plus important que Soproline. Le fort pourcentage de SiO₂ fourni un effet positif sur l'évolution des performances mécaniques des échantillons. En effet, le SiO₂ contribue à la production du C-S-H, produit une fois hydraté entraîne des liaisons entre les particules des sédiments donc augmentation de la résistance des échantillons.

En revanche, la Soproline possède un pourcentage de CaO-libre supérieure à la Sodeline. Le CaO est très important pour la réaction pouzzolanique. Avec ce pourcentage de CaO libre des cendres volantes s'ajoute la quantité provenant de l'hydratation de la chaux.

4.2.3. Essai Chapelle.

L'essai Chapelle permet de calculer la quantité de CaO libre disponible pour la réaction pouzzolanique. La réaction crée un milieu fortement basique qui contribue à diminuer l'acidité des matières, Cela veut dire que l'élévation du pH, va de 7 jusqu'à 12 ou plus. Ceci est très important pour former des réactions pouzzolaniques, selon les relations suivantes :

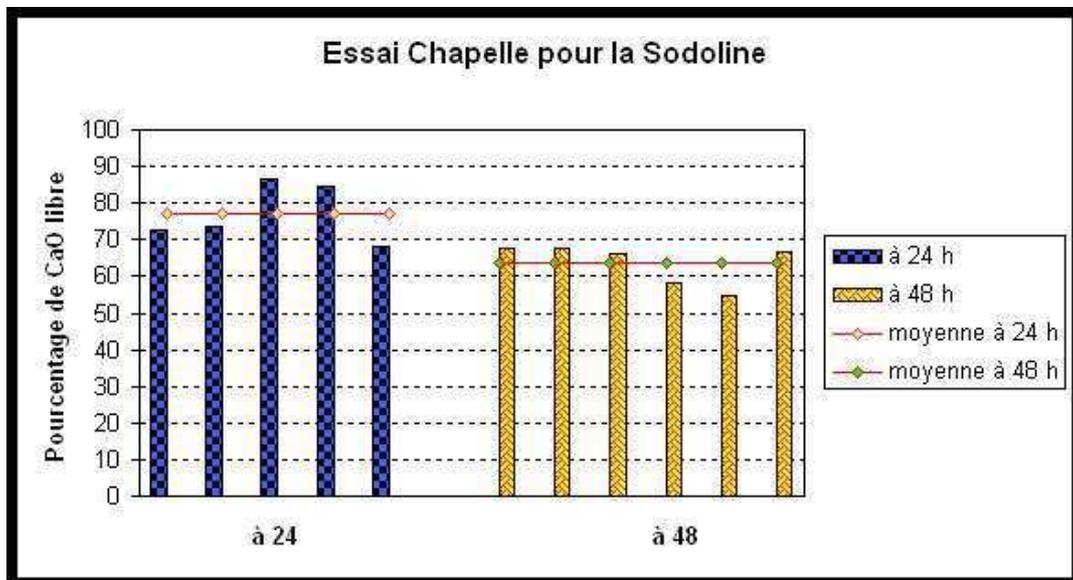
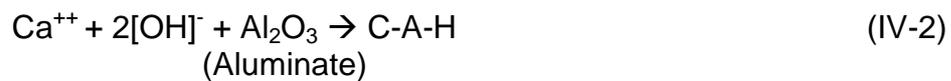
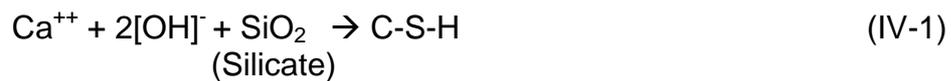


Figure IV-5 Pourcentage de CaO libre pour la Sodeline

On constate sur la figure IV-5 que les pourcentages de CaO libres pour la Sodeline à 48 heures sont inférieurs à ceux obtenus à 24 heures. Ceci signifie que la réaction pouzzolanique pour la Sodeline se poursuit encore même après 24 heures. En effet, plus la réaction continue, moins de CaO libre reste disponible pour la réaction pouzzolanique.

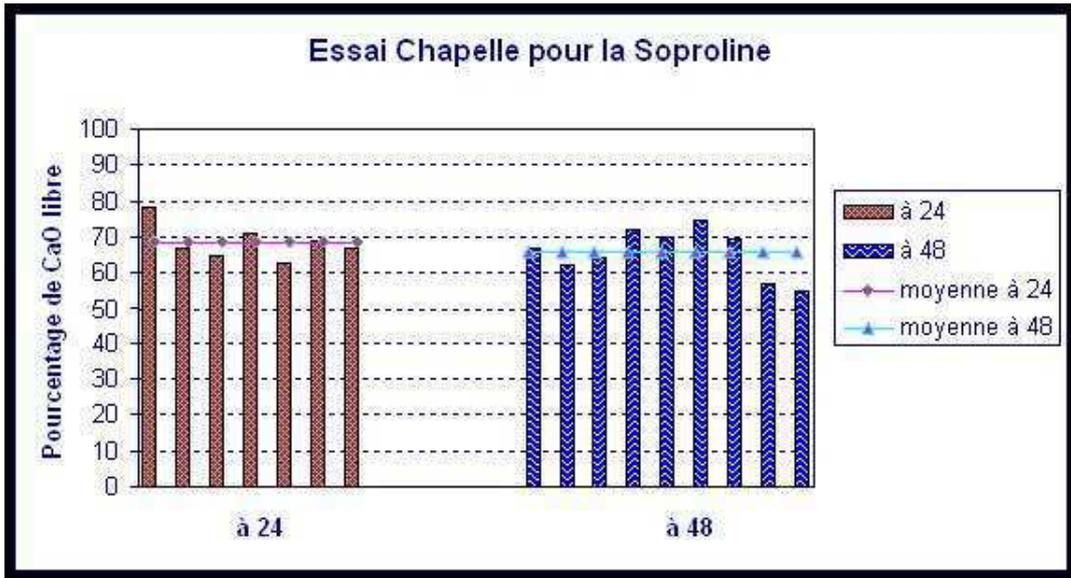


Figure IV-6. Pourcentage de CaO libre pour la Soproline

Par contre, sur la figure IV-6, les pourcentages de CaO libre pour la Soproline à 24 heures et à 48 heures sont presque les mêmes. Ceci signifie que la réaction pouzzolanique pour la Sodeline s'est achevée au bout de 24 heures. Par conséquent, on peut conclure que la réaction pouzzolanique à base de la Sodeline est plus intense que dans le cas de la Soproline

Tableau IV-6. Pourcentages moyens de chaux libre en solution

CaO libre (%)	Sodeline		Soproline	
	à 24 heures	à 48 heures	à 24 heures	à 48 heures
Moyenne (%)	68,73	67,02	77,17	63,63
Ecart type (%)	4,91	8,99	8,07	5,59

Si l'on analyse le tableau IV-6 on peut constater que :

1. les écarts types des valeurs moyennes des pourcentages de CaO libres dans la solution des deux types de cendres volantes à 24 heures et à 48 heures sont inférieures à 10%, ce qui signifie que les valeurs expérimentales sont considérées comme acceptables.
2. les moyennes des pourcentages de CaO libres pour la Sodeline et la Soproline restent supérieures à 50%, ce que signifie que les réactions ne sont pas trop intenses mais suffisantes pour fournir du CaO libre nécessaire à la réaction pouzzolanique.
3. La Sodeline donne plus de pourcentages de CaO libres pour la réaction pouzzolanique que la Soproline. En fin de réaction, le pourcentage de CaO libre pour la Sodeline vaut 67.02% et 63.63% pour la Soproline. La Sodeline contient donc plus de CaO libre que la Soproline.

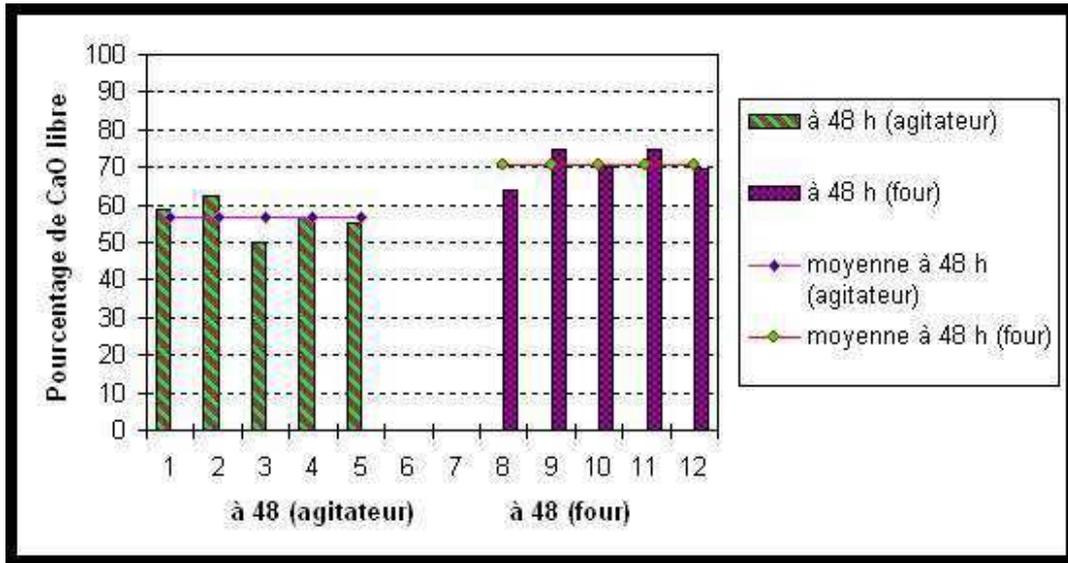


Figure IV-7. Résultats des essais Chapelle pour la Sodeline au four et agitateur

Nous avons effectué plusieurs essais avec les mélanges contenant 1 gramme de cendres volantes et 1 gramme de chaux, en mettant certains récipients au four, cette procédure a donné des résultats très différents de ceux obtenus avec l'agitateur.

Sur la figure IV-7 nous pouvons déterminer que le pourcentage moyen de CaO libre pour les mélanges mis au four, qui est de 70% alors qu'avec l'agitateur magnétique, il vaut 56%. Ceci signifie que les réactions dans les solutions mises au four sont beaucoup moins intenses que celles qui ont lieu dans les solutions agitées. Pour cette raison, nous n'avons pas utilisé les résultats des essais Chapelle au four. Toutes les valeurs des résultats d'essai Chapelle pour la Soproline et la Sodeline, sont issues des mesures effectuées avec un agitateur.

4.3. La Chaux

La dissolution de la chaux se modélise par la réaction suivante :



Cette dissolution entraîne la saturation en chaux de l'eau et contribue à augmenter le pH jusqu'à des valeurs supérieures à 12. Ce pH élevé permet la dissolution de la silice et de l'alumine contenues dans les cendres volantes et dans le clinker et favorise de cette façon les réactions pouzzolaniques. Une partie de la chaux vive CaO va s'hydrater pour former la chaux éteinte ou hydroxyde de calcium Ca(OH)₂ selon la réaction exothermique :



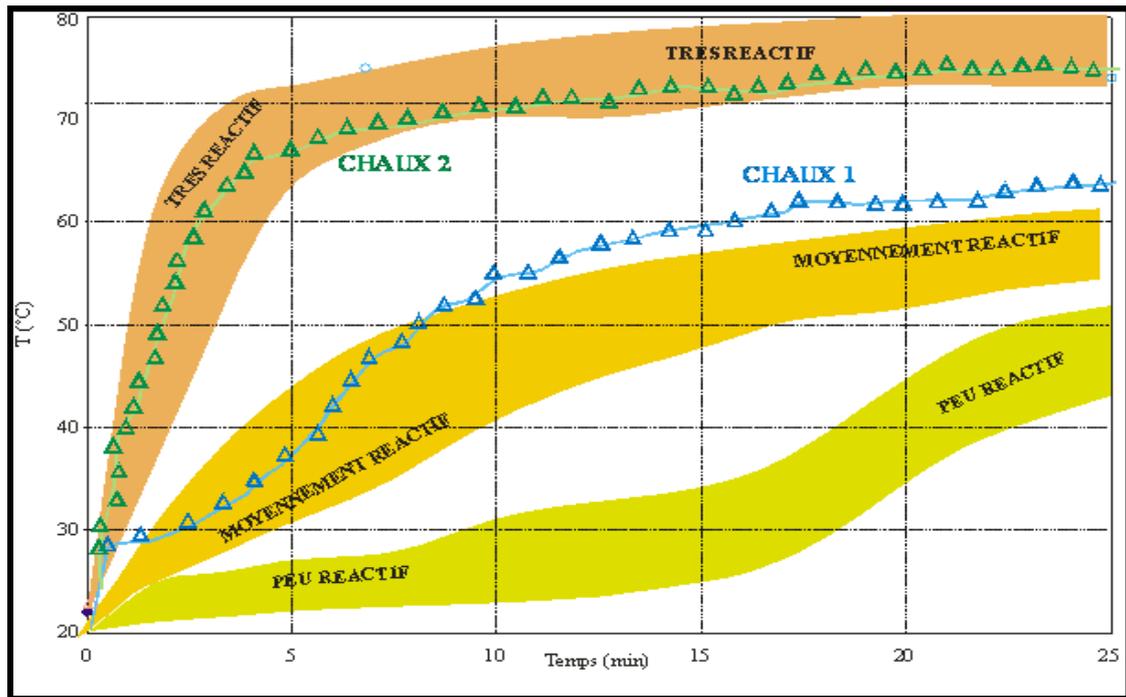


Figure IV-8 : courbe de la réactivité des différents chaux utilisées

Nous avons effectué ces essais avec deux types de chaux différentes. La fiche technique chimique ne montre aucune différence dans la composition chimique. Par contre, des essais de réactivité particulière ont donné des résultats non communs pour une chaux employée en technique routière. Cette chaux est notée C1 dans l'étude, elle est comparée avec une seconde chaux fournie notée C2.

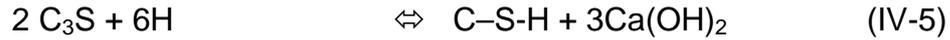
La figure IV-8 présente la différence principale entre la chaux **C1** et la chaux **C2** provenant de leur réactivité à l'eau puisque la chaux **C2** est très réactive alors que la chaux **C1**, montre une cinétique d'hydratation moyennement réactive. Nous estimons que cette différence de réactivité des deux chaux va provoquer un effet dans les comportements mécaniques des échantillons. C'est la raison pour la quelle nous avons effectué des échantillons en utilisant les deux types de chaux.

4.4. Le ciment Portland

Le ciment Portland résulte du concassage du clinker en présence de gypse. Le clinker, fabriqué grâce à un processus pyrotechnique, est un matériau hétérogène constitué de 4 phases oxydes majeures :

- le silicate tricalcique (C_3S),
- le silicate bicalcique (C_2S),
- l'aluminate tricalcique (C_3A),
- l'aluminoferrite tétracalcique (C_4AF).

En tant que liant hydraulique, le ciment Portland durcit au contact de l'eau. La réaction entre le ciment (clinker) et l'eau se nomme l'hydratation du ciment et peut se modéliser par 5 équations principales qui sont :



Avec les notations suivantes :

(C = CaO; S = SiO₂; A = Al₂O₃; F = Fe₂O₃; H = H₂O; S = SO₃).

Les deux premières équations permettent de former le silicate de calcium hydraté C-S-H, et qui possède des propriétés liantes. Ces réactions sont les plus rapides et apportent très tôt, solidité et résistance au mélange en le durcissant (Téboul, 2004). Les deux dernières forment des produits composés de sulfate, l'ettringite de formule (CaO)₆Al₂O₃(SO₃)₃(H₂O)₃₂ pour l'équation (6) et pour l'équation (7), du monosulfate de formule (CaO)₄Al₂O₃SO₃(H₂O)₁₂.

4.5. Les sables

4.5.1. Analyse granulométrique

Le sable utilisé dans cette étude provient du voisinage du site de la chambre de dépôt des sédiments. Nous avons utilisé ce sable prélevé du site pour des raisons économiques (prix de revient du sable, transport...).

L'essai d'analyse granulométrique est effectué par voie sèche. Cette analyse permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant le sable. Les caractères plus ou moins fins d'un sable peuvent être identifiés par le calcul du module de finesse.

Les résultats de cet essai sont présentés sur la figure IV-9. Nous avons effectué trois essais d'analyse granulométrique. D'après ces résultats, on peut constater que les courbes de distribution granulométrique du sable utilisé sont différentes. Par conséquent, on peut conclure que le sable utilisé n'est pas homogène. Ceci peut être dû à la différence granulométrique du sable qui peut influencer par la suite sur l'évolution sur le comportement mécanique des échantillons.

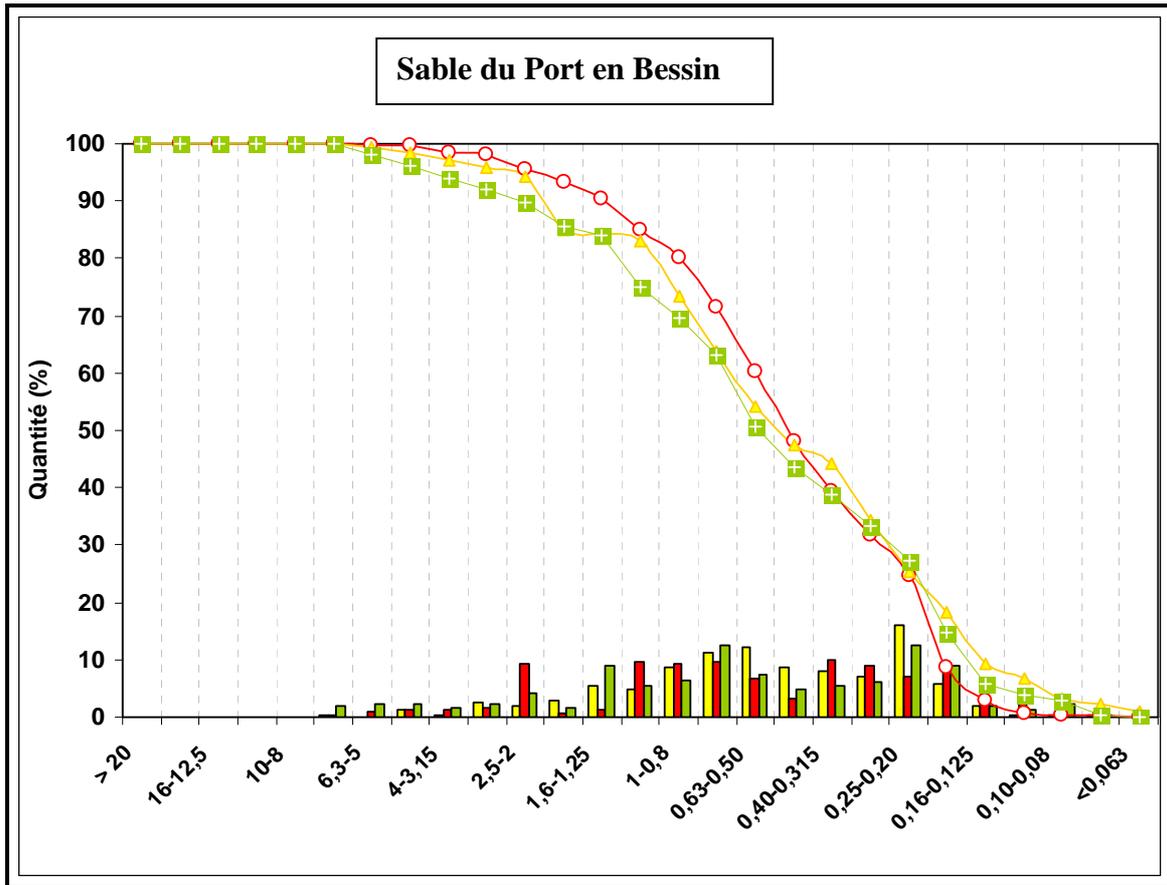


Figure IV-9 : Distribution granulométrique du sable utilisé

4.5.2. Teneur en matières organiques

Nous avons utilisé la méthode de perte au feu pour identifier la teneur en matière organique du sable. La teneur en matière organique est exprimée en pourcentage de matière organique dans les sédiments. Les teneurs en matières organiques obtenues sont présentées dans le tableau IV-7.

Tableau IV-7 : Pourcentage de matières organiques des sédiments du bassin n°2 du Port en Bessin.

N° d'essai	1	2	3
Teneur en matière organique (%)	10,8	11,5	11,9

D'après les résultats présentés dans le tableau IV-7, on peut constater que la teneur en matière organique des sables utilisés est à l'ordre de 10,8% à 11,91%.

Donc on peut classer le sable en sédiment très organique ($C_{MO} > 10$). Cette forte teneur en matière organique peut être attribuée à l'effet négatif sur le comportement mécanique des échantillons. En effet, la présence de matière organique peut perturber l'hydratation du ciment et de la chaux, et ainsi la réaction pouzzolanique des liants utilisés dans le mélange. Par conséquent, il y a une forte possibilité que la présence de cette forte teneur en matière organique dans le sable peut provoquer un effet négatif sur les performances mécaniques des échantillons.

4.6. Préparation des échantillons.

4.6.1. Détermination des dosages en liants

La confection des éprouvettes, la préparation des mélanges sédiments-produits de traitement s'est déroulée de la façon décrite ci-après. Tout d'abord, une certaine masse de sédiments de teneur en eau connue (calculé), est minutieusement pesée pour déterminer la masse sèche selon la relation [IV-3].

$$M_s = \frac{M_h}{\frac{100+W}{100}} \quad [IV-10]$$

avec :

- M_s : masse sèche des sédiments (g),
- M_h : masse humide des sédiments (g),
- W : teneur en eau des sédiments (%).

Les masses des différents liants à ajouter sont ensuite déterminées. Notons que les dosages sont déterminés par rapport à la masse totale des constituants secs (y compris les liants). Après la détermination des différentes masses en produits de traitement, les sédiments sont placés dans un malaxeur pour obtenir un mélange homogène. La chaux est ensuite ajoutée en cours de malaxage avant d'incorporer les autres liants. Un délai d'une heure est observé. Ceci permet à la chaux d'agir en assurant la floculation des argiles. Pour conserver l'état hydrique du mélange sédiments-chaux, le matériau est retiré du malaxeur et conservé dans un bac surmonté d'un chiffon humide. Le mélange est ensuite reversé dans le malaxeur pour l'ajout des autres liants dont l'opération de malaxage est identique à celle de la chaux. Ces différentes étapes effectuées, le mélange sédiments-produits de traitement est alors prêt pour la confection des éprouvettes. La figure IV-10 présente les étapes de malaxage.

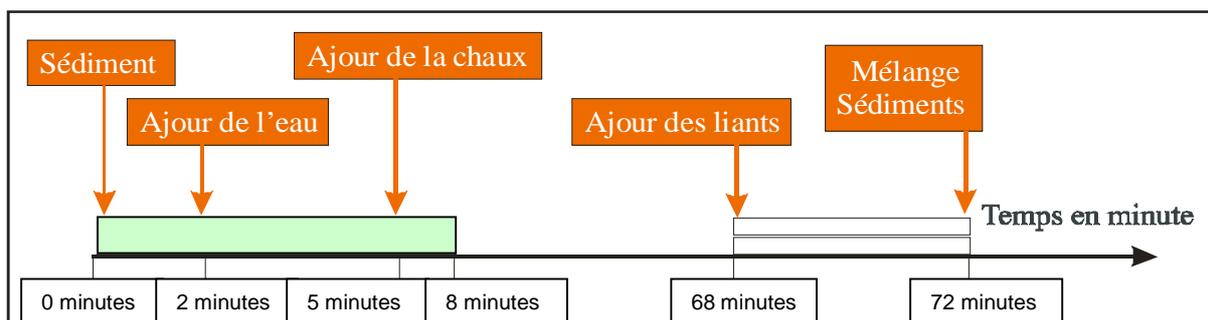


Figure IV-10 : Protocole de malaxage

4.6.2. Préparation des sédiments

Dans ce cas, les sédiments disposés dans des bacs, subissent une pré-étape de séchage en étuve. La température est fixée à 50°C afin d'éviter toute modification des caractéristiques physico-chimiques des sédiments. Au fur et à mesure de leur

assèchement, les sédiments apparaissent sous forme de mottes qu'il est nécessaire de fragmenter régulièrement pour permettre un séchage homogène.



Figure IV-11 : Aspect visuel des différents états des sédiments avant traitement

Ensuite, les sédiments séchés sont fragmentés et passés au tamis de 2 mm. La figure IV-11 représente l'évolution des sédiments à partir d'un état initial jusqu'à un état avant traitement.

4.6.3. Confection des éprouvettes

Nous avons réalisé deux types d'éprouvettes. Les premières (50x50) destinées à l'essai de résistance à la traction et les seconds destinés aux autres essais (compression simple, mouillage-séchage, gel-dégel etc...)

4.6.3.1. Confection des éprouvettes 50*50 (l'essai la résistance en traction)

En raison de la finesse des matériaux développés (D_{max} inférieur à 6,3 mm) et en accord avec les prescriptions de la norme NF P 98 114 3 relative à l'étude des matériaux traités aux liants hydrauliques, l'essai de compression diamétrale doit être réalisé sur des éprouvettes cylindriques de 50 mm de diamètre et de 50 mm de longueur (figure IV-12)



Figure IV-12 : Moule 50*50 mm

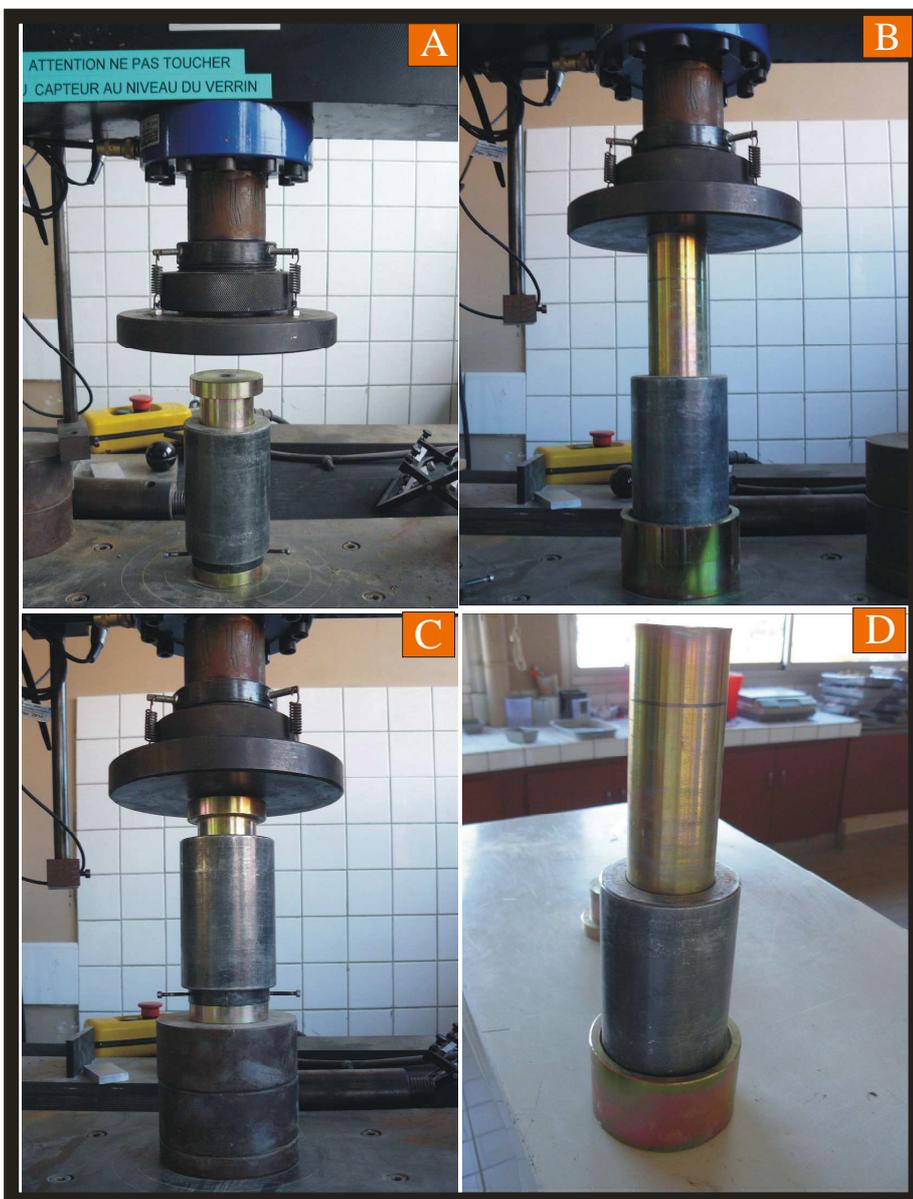


Figure IV-13 : Illustrations de la confection des éprouvettes



Figure IV-14 : Illustration de la conservation des éprouvettes

Les modalités de confection de ces éprouvettes sont décrites dans la norme NF P 98 230 2. En ce qui concerne la fabrication des éprouvettes dans cette étude, après avoir défini la densité sèche et la teneur en eau souhaitable pour les éprouvettes à réaliser, la quantité de matériau humide (d'après l'équation IV-11) nécessaire pour atteindre ces caractéristiques est introduite dans le moule. Après compactage selon la dimension souhaitée, l'éprouvette est démoulée par extrusion et conservée dans une boîte en plastique hermétique à 20°C.

$$M = \frac{V * \rho_d * (100 + w)}{100} \quad (IV-11)$$

Avec :

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

ρ_d : masse volumique sèche fixée à la confection de l'éprouvette (g/cm^3)

V : volume de l'éprouvette (cm^3)

W : teneur en eau fixé à la confection de l'éprouvette

4.6.3.2. Confection des éprouvettes 40*80

Les éprouvettes d'étude ont été réalisés dans des moules cylindriques en PE de diamètre 40 mm et de hauteur 80 mm. Par la suite, dans le texte, cet échantillon est appelés 4*8 cm (Figure IV-15).

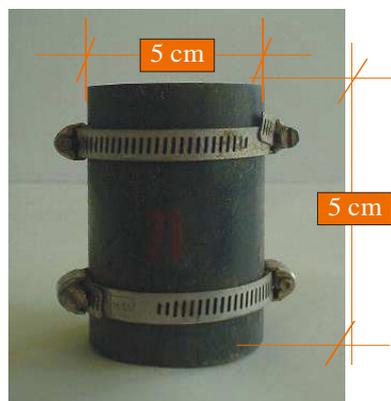


Figure IV-15 : Moule 4*8 cm

Pour faciliter le démoulage, les moules sont fendus sur une génératrice et maintenus fermés à l'aide de colliers métalliques. Ces moules de petit diamètre ont été choisis afin de réduire les volumes de sédiments nécessaires pour cette étude. Notons que le rapport « Diamètre de l'éprouvette/ Diamètre du plus gros grain » est supérieur à 100 et conforme avec tout protocole ou norme d'essais mécaniques.

4.6.4. Protocole de compactage

Pour satisfaire aux conditions de réalisation des matériaux stabilisés, les éprouvettes ont subi un compactage pour une énergie de type Proctor Normal, énergie la plus représentative du compactage des sols naturels stabilisés. Le protocole de ce compactage est proposé par Lemée (Lemée 2006). Ce procédé de compactage présente les avantages d'être simple, rapide, reproductible et permet ainsi d'obtenir des densités sèches similaires à celles d'un compactage Proctor Normal. Selon Lemee, (2006), l'écart est estimé à 3 %.

Pour l'application de l'énergie en une zone unique, sensiblement égale à la surface de l'éprouvette, peut poser des interrogations sur les similitudes avec un compactage Proctor normal, où l'énergie est appliquée en 5 points, notamment sur la microstructure des éprouvettes obtenues. Chaque éprouvette est constituée de 3 couches égales d'environ 60g de matériaux. Cette quantité est ajustée suivant les compositions et les densités des mélanges. Le matériau compacté doit dépasser la hauteur du moule d'environ 5 mm. Chaque couche est compactée par 6 coups de dame afin de simuler notre système de compactage avec le compactage de Proctor normal. La raison de ce choix est expliquée par la suite. Sachant que dans le Proctor normal, il y a 3 couches à 25 coups, les sections de la dame et des éprouvettes sont respectivement de 2043 et 8107 mm². Les hauteurs de chaque couche et éprouvette sont respectivement de 39 et 117 mm et les volumes de chaque couche sont de 316 mm³. Sachant que dans notre système de compactage, on a 3 couches de N coups, la section du piston et éprouvette sont respectivement 908 et 1134 mm², la hauteur d'éprouvette et chaque couche sont respectivement 75 et 26 mm et le volume de chaque couche est de 30 mm³. le nombre de coups N à appliquer à l'éprouvette 4*8 pour conserver une énergie de compactage par unité de volume identique au procédé Proctor normal peut être calculé par la relation IV-12.

$$N = 25 \times \frac{Section_{damePN}}{Section_{Piston}} \times \frac{V_{couche.4*8}}{V_{couch.PN}} \quad (IV-12)$$

Le nombre de coups obtenus par la relation IV-12 est de 5,4. Pour compenser les frottements du piston et l'altération de la scarification de surface des couches, N est arrondi à l'entier supérieur, soit N égal à 6 coups/couche.

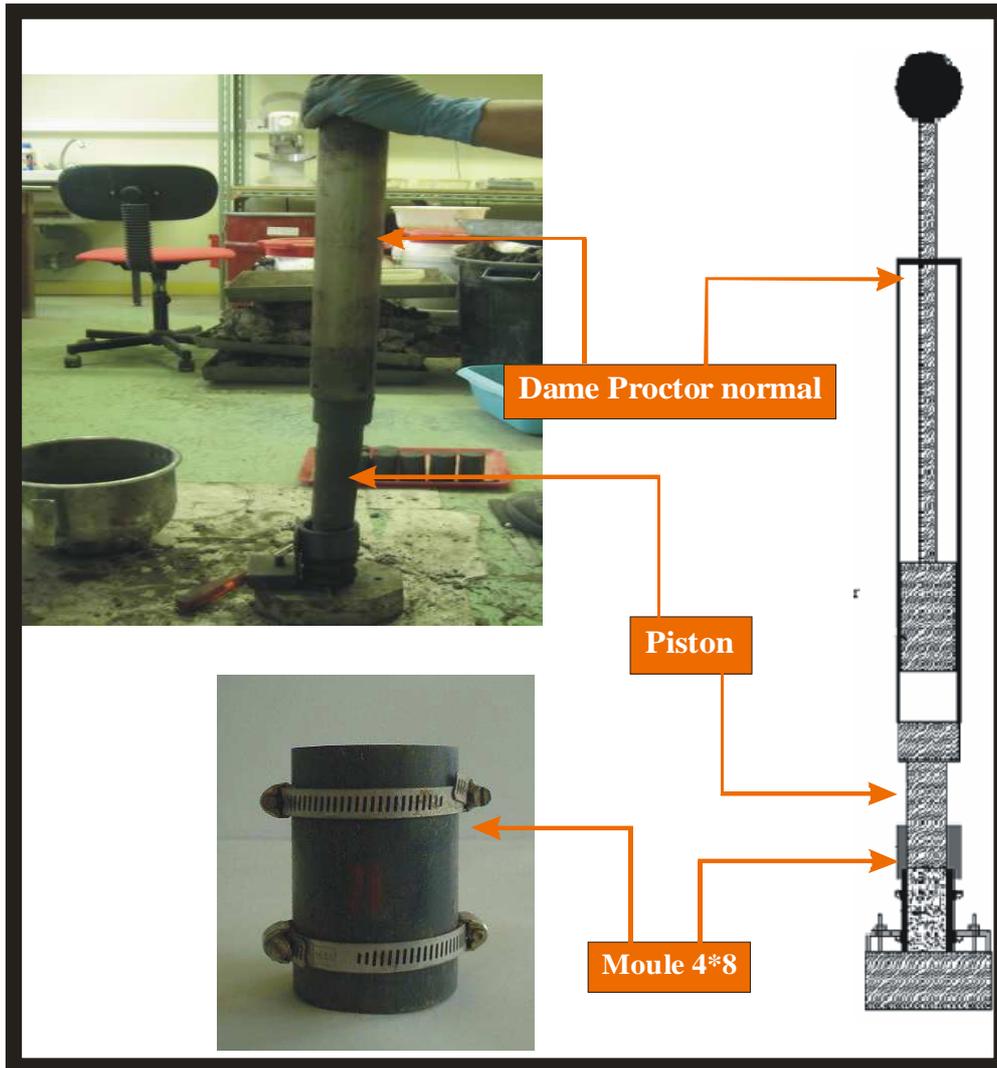


Figure IV-16 : Compactage et confection des éprouvettes

Après démoulage, les éprouvettes sont conservées à l'air libre et à la température ambiante du laboratoire, à peu près, à 20°C,

4.7. Résistance à la compression simple après traitement

L'essai de résistance à la compression simple a été réalisé pour étudier l'effet des liants utilisés sur les paramètres de résistance mécanique des sédiments traités. Pour cet essai, des éprouvettes cylindriques, sont placées entre les plateaux d'une presse et subissent une force axiale croissante jusqu'à la rupture. La valeur maximale F de la force permet de calculer la résistance uniaxiale en compression R_c de l'éprouvette :

$$R_c = F/S \quad (IV-13)$$

où S est la surface de la section de l'éprouvette.

Les essais de résistance à la compression simple ont été effectués sur une presse dotée d'un capteur de force de compression de capacité maximale de 10 kn (précision : $\pm 0,1\%$) et d'un capteur de déplacement type lvdt de course ± 10 mm (précision : $\pm 0,02$ mm) ainsi qu'un dispositif d'acquisition automatique des courbes effort appliqué/déformation. L'asservissement de l'application du chargement s'effectue en fonction de la vitesse de déformation imposée à savoir 1.93 mm/min.



Figure V-17 : Dispositif expérimental d'essai en compression simple

4.8. Essai de mouillage-séchage

4.8.1. Principe

Le but de l'essai est d'apprécier la durabilité des échantillons solidifiés lorsqu'ils sont soumis à des cycles répétés de mouillage/séchage. La méthodologie d'essai est tirée du «protocole d'évaluation proposé pour les déchets solidifiés à base de ciment» (Stegemann *et al.*, 1992).

L'essai consiste à comparer les résistances mécaniques en compression simple d'éprouvettes d'âge « j » et ayant subi 10 cycles de mouillage/séchage avec des éprouvettes témoins de même âge et conservées à la température ambiante.

Chaque cycle de mouillage/séchage commence par une phase de séchage de 24 heures à 60°C suivie par une phase de mouillage également fixée à 24 heures et réalisée par immersion totale dans l'eau à température ambiante. Les 10 cycles d'essai sont réalisés sur 20 jours.

Cet essai permet de mettre en évidence :

- 1) l'altération en présence d'eau: la mise en contact du matériau avec une solution neutre ou peu basique ($\text{pH} < 11.5$) conduit à sa décalcification,
- 2) la dissolution à l'équilibre de la portlandite $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ conduisant à une augmentation de la porosité et du coefficient de calcium hydratés (C-S-H) entre le front de dissolution de la portlandite et la surface.

D'après Rao *et al.* (2001), les cycles de mouillage-séchage ont un effet négatif sur la durabilité des sédiments stabilisés par la chaux; il ne faut pas traiter les sédiments fins à la chaux seule dans les régions qui peuvent subir des cycles mouillage-séchage importants.

4.8.2. Présentation du programme des essais de gel- dégel et de mouillage-séchage

Ce programme expérimental a pour objectif d'évaluer la durabilité face au gel-dégel (G/D) et mouillage-séchage (M/S) des sédiments prélevés au port autonome du Havre traités par stabilisateur aux liants hydrauliques. Ces essais sont réalisés en laboratoire suivant des protocoles d'endommagement accélérés.

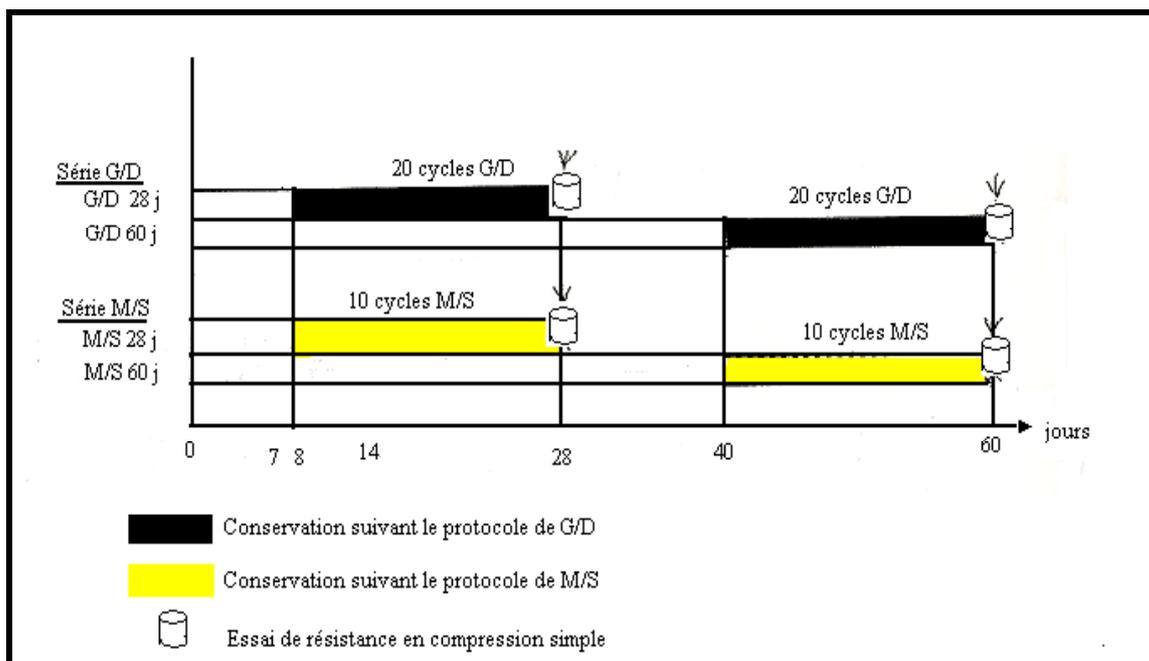


Figure IV-18 : Schéma synoptique des essais de G/D et M/S

La répétition des cycles d'endommagement sévères permet d'appréhender dans des délais courts (inférieurs à 2 mois) le comportement des matériaux sur plusieurs années. Le schéma synoptique des essais de durabilité pour réaliser des essais gel/dégel et mouillage/séchage est présenté ci-dessous.

4.9. Essai de gel-dégel

4.9.1. Principe

L'essai de gel/dégel est décrit par la norme NFP 98-234-1 et consiste à comparer la résistance à la compression simple d'échantillons ayant subi 20 cycles de gel/dégel à celle des échantillons témoins de même âge.

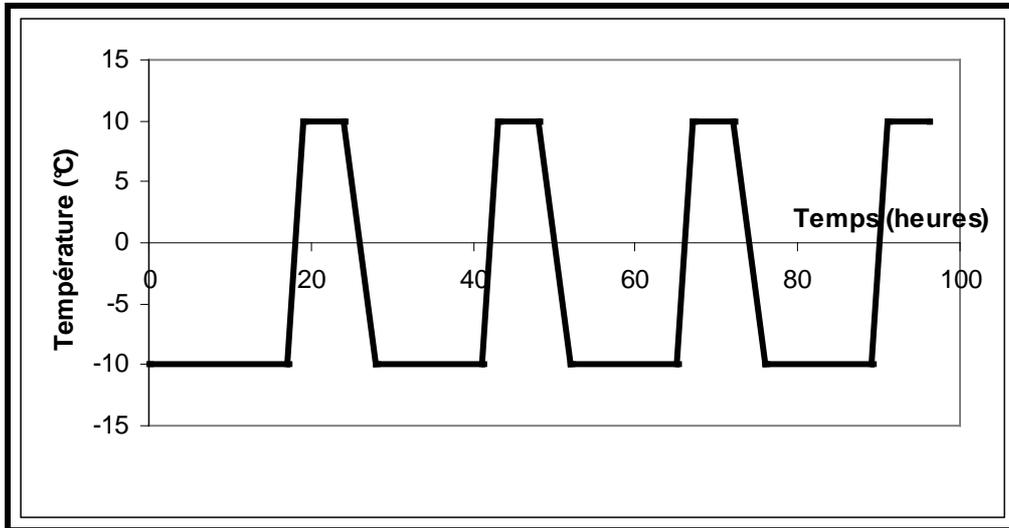


Figure IV-19 : cycles de gel/dégel subis par le sédiment traité

Les 20 cycles d'essais sont réalisés sur 20 jours, la première phase de gel commence par conséquent à l'âge j-20. Les cycles retenus pour l'essai sont composés comme suit:

- 1^{ère} Phase de gel de 17 heures à -10°C (y compris temps de gel),
- 2^{ème} Phase de dégel de 7 heures à $+10^{\circ}\text{C}$ (y compris temps de réchauffement).

La figure IV-18 présente les différentes alternances de gel/dégel subies par le sédiment solidifié.

CHAPITRE 5

VALORISATION DES SEDIMENTS

Introduction

Dans ce chapitre on présente le comportement mécanique et environnemental des formulations appliquées aux sédiments de dragages en vue de leur utilisation en couche d'assise de chaussée. Dans un premier temps, nous allons analyser l'essai de résistance à la compression simple, qui permet d'optimiser notre choix par rapport au type de liants et le dosage correspondant. Ensuite, une étude de sensibilité des mélanges obtenus aux conditions extrêmes est effectuée au vue des essais gel-dégel et de mouillage-séchage. L'effet de dosage des liants sur la porosité et la résistance en traction simple est également présenté. Enfin, on achève ce chapitre par une analyse des essais de lixiviation pour valider la possibilité d'utilisation des sédiments valorisés dans des applications en travaux routiers.

5.1. Traitement des sédiments du Port en Bessin avec 2% de ciment et 3% de la chaux

5.1.1 Choix de la chaux

Nous avons réalisé treize formulations de mélanges. Pour chaque série de mélange, trois éprouvettes ont été réalisées pour chaque période d'essai (7, 14, 28, 60, 90, 180 et 360 jours). Au total 357 éprouvettes ont été réalisées. Le tableau V-1 montre les pourcentages de liant utilisées.

Tableau V-1 : Pourcentages des mélanges de liant utilisées

Série	Sable (%)	Ciment (%)	Chaux1 (%)	Chaux2 (%)	Fumée de silice (%)
Vase Non traité	-	-	-	-	-
0-2-3C1-0FS3	-	2	3	-	0
0-2-3C1-1FS3	-	2	3	-	1
0-2-3C2-0FS3	-	2	-	3	0
0-2-3C2-1FS3	-	2	-	3	1
5-2-3C1-0FS3	5	2	3	-	0
5-2-3C1-1FS3	5	2	3	-	1
5-2-3C2-0FS3	5	2	-	3	0
5-2-3C2-1FS3	5	2	-	3	1
10-2-3C1-0FS3	10	2	3	-	0
10-2-3C1-1FS3	10	2	3	-	1
10-2-3C2-0FS3	10	2	-	3	0
10-2-3C2-1FS3	10	2	-	3	1
15-2-3C1-0FS3	15	2	3	-	0
15-2-3C1-1FS3	15	2	3	-	1
15-2-3C2-0FS3	15	2	-	3	0
15-2-3C2-1FS3	15	2	-	3	1

5.1.1.1 Traitement sans ajout de sable

5.1.1.1.a. Condition de mise en œuvre de mélanges.

Dans un premier temps, une étude Proctor-IPI est menée afin d'étudier le comportement des sédiments naturels et traités aux liants lors de leur mise en œuvre.

La courbe Proctor Normal du matériau naturel (vase non traitée) a tout d'abord été établie. Ensuite, deux traitements avec deux chaux différentes ont été réalisés. Les différentes courbes Proctor sont présentées à la figure V-1.

La teneur en eau optimale pour la vase non traitée se situe à 21,1% pour un poids volumique sec de 15,2 kN/m³. Nous avons donc pour le sédiment seul une teneur en eau moyenne et un faible poids volumique sec comme valeurs de références. Si l'addition de liants ajoutés dans les mélanges augmente la valeur de la teneur en eau optimale de l'ordre de 1% à 2%, elle diminue la valeur du poids volumique sec maximal qui varie de 14.8kN/m³ à 14,2kN/m³.

L'effet de la réactivité des deux chaux (**C1** et **C2**) peut être identifié en comparant les mélanges sans fumée de silice (0-2-3**C1**-0FS3 et 0-2-3**C2**-0FS3) et les mélanges avec fumée de silice (0-2-3**C1**-1FS3 et 0-2-3**C2**-1FS3).

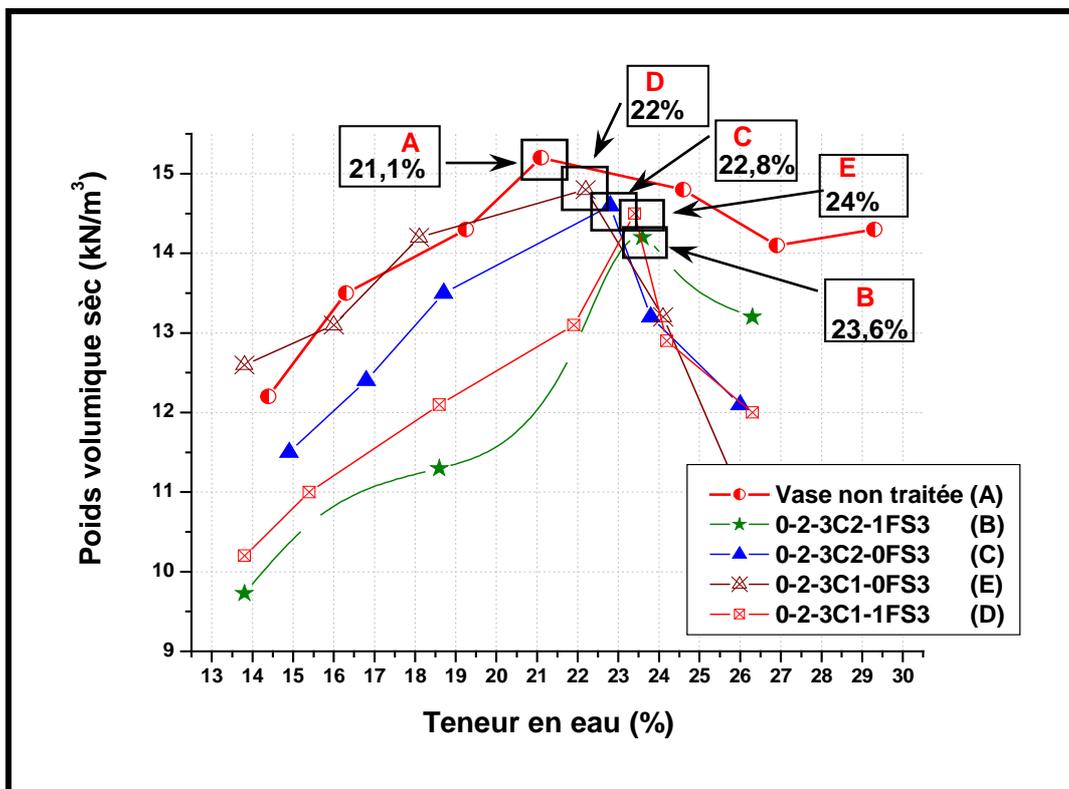


Figure V-1 : Courbes Proctor Normal de sédiments traités avec 2% de ciment

Sur la figure V-1 pour les mélanges sans fumée de silice on observe que la réactivité de la chaux **C2** augmente la valeur de la teneur en eau optimale jusqu'à 22.8%, soit 0.8% (Figure V-1).

L'effet de la chaux **C1** n'est pas significatif. Aussi, la réactivité de la chaux 2 provoque une diminution de la valeur du poids volumique sec maximal qui atteint $14,8 \text{ kN/m}^3$ (référence D) et $14,5 \text{ kN/m}^3$ (référence C). Nous estimons que l'action de la chaux sur la floculation des argiles contenues dans le sédiment provoque cette tendance. Quand l'hydratation de la chaux se produit, la température augmente avec l'intensité de la réaction (voir figure IV-8). Notons que, plus la réactivité de la chaux est importante, plus elle absorbe de l'eau.

L'effet de la fumée de silice peut également être confirmé en comparant le mélange (0-2-3**C2**-0FS3) et (0-2-3**C2**-1FS3). Une augmentation de la teneur en eau optimale est perfectible, elle varie de 22,8% (voir C) à 23,6% (voir B). Par contre une réduction de la valeur du poids volumique sec maximal de $14,6 \text{ kN/m}^3$ (voir C) à $14,2 \text{ kN/m}^3$ (voir B) est observé. L'ajout de fumée de silice comme correcteur granulométrique (grâce à leurs fines particules, provoque une augmentation de la surface spécifique des particules du mélange. Le pourcentage de la teneur en eau augmente avec l'augmentation de la surface spécifique. Mais, le poids volumique maximal diminue. Le groupement des particules de sédiment avec les macropores peut expliquer la raison de cette diminution.

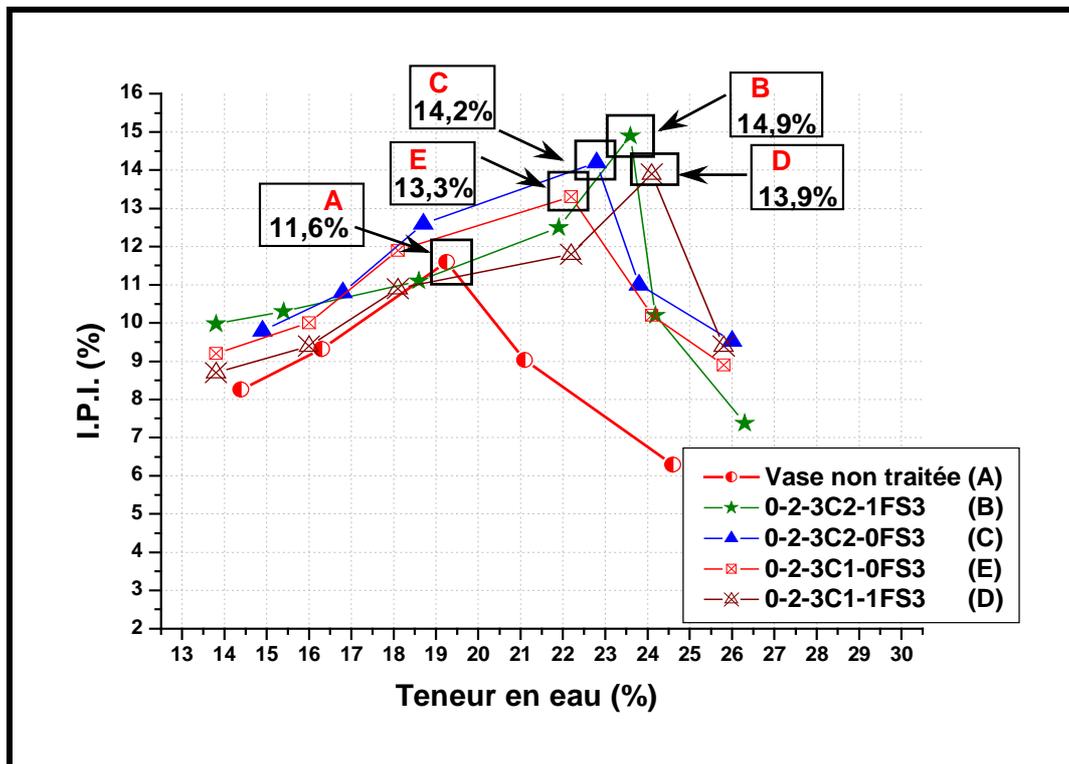


Figure V-2 : Courbes IPI pour le sédiment non traité et traité avec 2% de ciment

Sur la figure V-2, est portée l'évolution de la valeur de l'Indice Portance immédiate. Le mélange 0-2-3**C2**-1FS3 (voir B sur figure V-2) a une meilleure valeur de portance, (IPI = 14,9%).

L'effet de la réactivité de deux chaux (**C1** et **C2**), peut s'observer pour les mélanges avec de la fumée de silice (voir C et E sur la figure V-2). Il est montré que la réactivité de la chaux **C2** augmente la valeur de portance d'environ 0,9%. Pour les

mélanges avec de la fumée de silice (voir B et D) la réactivité donne une augmentation de la portance d'environ 1%.

L'effet d'un ajout de 1% de fumée de silice peut être également identifié en regardant les mélanges traités à la chaux **C1** (0-2-3**C1**-0FS3 et 0-2-3 **C1**-1FS3) et traités à la chaux **C2** (0-2-3**C2**-0FS3 et 0-2-3**C2**-1FS3). L'effet de l'ajout de 1% de fumée de silice sur les mélanges traitées à la chaux C1 provoque une augmentation de la portance environ 0,6% (voir D et E sur la figure V-2). Cette augmentation de valeur portance est d'environ 0,7% pour les mélanges traités à la chaux **C2** (voir C et B).

5.1.1.1.b. Résistance en compression simple

Les résultats de la figure V-3 montrent que les résistances en compression simple obtenues pour tous les mélanges traités après 28 jours sont supérieures à 1 MPa, ce qui signifie que, le mélange utilisé est satisfaisant pour être appliqué en technique routière.

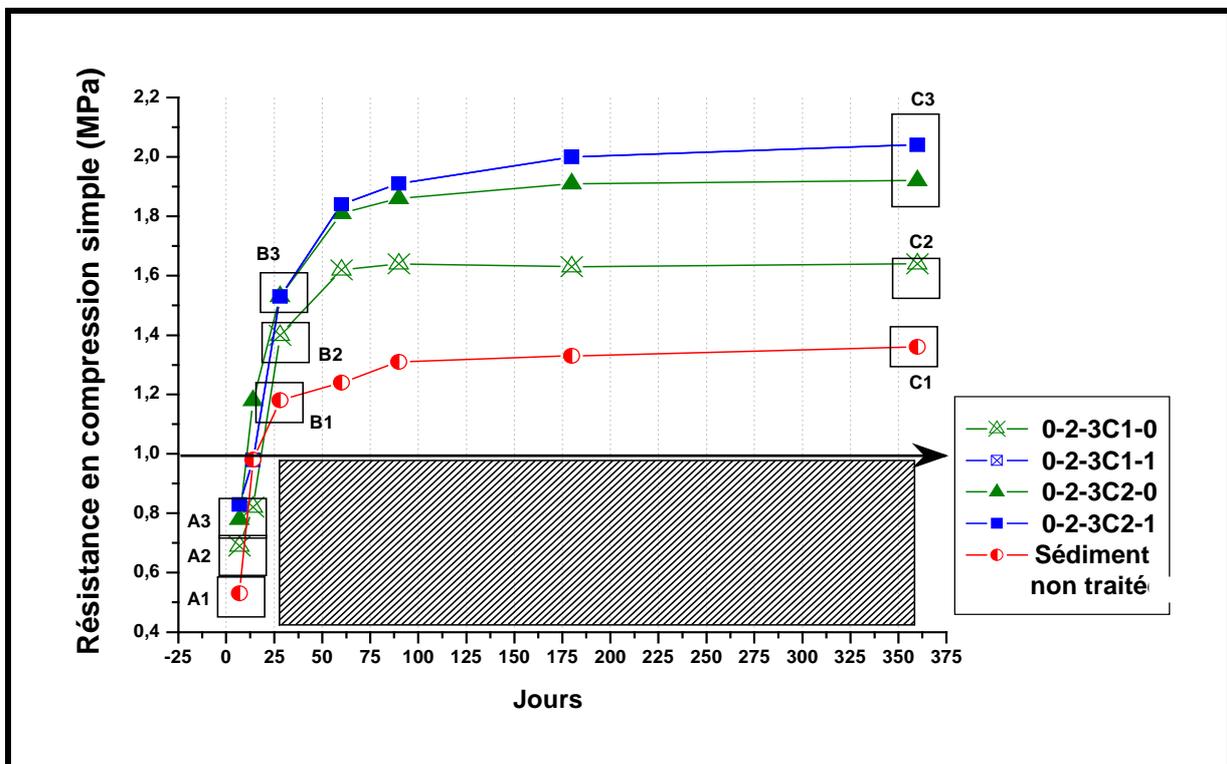


Figure V-3 : Evolution des résistances à la compression pour le sédiment traité avec deux types de chaux sans ajout de sable.

Les résultats montrent également une différence de performances mécaniques entre les mélanges traités avec la chaux **C1** et la chaux **C2**. Elle est assez importante. Cette différence peut être constatée tout au long de l'évolution des performances mécaniques depuis les jeunes âges. Sur cette figure, nous pouvons considérer que les résistances obtenues peuvent être classées en 3 groupes. Premièrement, le mélange du sédiment non traité (voir A1 sur la figure V-3), suivi par les mélanges traités avec la chaux **C1** (voir A2 sur la figure V-3), et ensuite les mélanges traités avec la chaux **C2** (voir A3 sur la figure V-3). Pour la période des

jeunes âges (7 à 14 jours), nous estimons que la résistance obtenue provient de l'hydratation du ciment dans le mélange

L'hydratation du ciment démarre directement en présence d'eau dans le mélange, cette hydratation produit un genre de gel (gel de C-S-H, ettringite, monosulfate) autour de la particule de ciment. Ceci provoque un remplissage de l'espace vide entre les particules de ciment qui est automatiquement comblé par ces gels et réduit la porosité dans le mélange. En même temps que les particules de ciment s'hydratent la pâte de ciment devient plus dense et durcit.

Nous pouvons également constater que d'après les résultats observés sur l'évolution aux jeunes âges, les matériaux traités à la chaux ont une réactivité plus importante. Le cas de la Chaux **C2** illustre la meilleure réactivité sur le sédiment. L'action de la chaux de la catégorie très réactive, favorise l'hydratation du ciment, ce qui donne une résistance finale additionnelle. Nous avons déjà constaté que la différence principale entre la chaux **C1** et la chaux **C2** provient de leur réactivité à l'eau. La chaux **C2** est très réactive alors que la chaux **C1**, montre une cinétique d'hydratation lente (voir figure IV-8).

La variation de la résistance après 28 jours entre les mélanges traités avec ces deux types de chaux, se montre assez importante. Cette variation de la résistance également se est assez importante à long terme à 360 jours. Nous pouvons constater cette variation sur la figure V-3, la résistance des mélanges traités avec la chaux **C2** nettement supérieures à celles des mélanges traités avec la chaux **C1** (voir C1 et C2 sur la figure V-3). Les résistances des mélanges traités avec la chaux **C2** varient entre 1,92 – 2,04 MPa, et celles des mélanges traités avec la chaux **C1**, entre 1,58-1,64 MPa (voir tableau V-2)

La figure V- 3 montre aussi l'influence de l'ajout de fumée de silice sur les différentes résistances mécaniques obtenues. L'effet de l'ajout de la fumée de silice est remarqué depuis la résistance aux jeunes âges. La variation de la résistance à 7 jours pour les mélanges traités avec **C1** est 0,07 MPa, et pour les mélanges traités avec la chaux **C2** est de 0,05 MPa (voir tableau V-2). Dans cette période de résistance aux jeunes âges, on peut que le rôle de la fumée de silice en tant que liant pouzzolanique n'est pas maximum, l'effet d'ajout de fumée de silice sur cette période de court terme, est attribué à la taille de leurs fines particules, ce n'est pas grâce à leur réaction pouzzolanique. En effet, les fines particules de fumée de silice contribuent à réduire la porosité en remplissant les espaces vides entre les particules de ciment. A 28 jours, l'influence de l'addition de fumée de silice est négligeable. La différence entre les mélanges sans et avec ajout de fumée de silice est négligeable.

Tableau V-2 : Résistances mécaniques à la compression obtenues sur le sédiment traité avec deux différentes types de chaux sans ajout de sable

Formulation	Jours						
	7	14	28	60	90	180	360
0%Sab-2%Cim-3%chx(C1)-0%FS	0.62	0.88	1.36	1.52	1.58	1.6	1.58
0%Sab-2%Cim-3%chx(C1)-1%FS	0.69	0.82	1.4	1.62	1.64	1.63	1.64
0%Sab-2%Cim-3%chx(C2)-0%FS	0.78	1.18	1.53	1.81	1.86	1.91	1.92
0%Sab-2%Cim-3%chx(C2)-1%FS	0.83	0.98	1.53	1.84	1.91	2	2.04
Vase non traité	0.53	0.98	1.18	1.24	1.31	1.33	1.36

L'effet d'ajout de fumée de silice sur la performance mécanique à long terme c'est-à-dire à 360 jours, entre les mélanges traités avec la chaux **C1** (voir C1 sur la figure V-1) de est 0,06 MPa (voir tableau V-2), mais pour les mélanges traités avec la chaux **C2** (voir C2 sur la figure V-3), la différence est de 0,12 MPa, soit 2 fois plus.

L'évolution de la résistance à long terme à 360 jours confirme clairement l'effet de la réactivité de la chaux **C2** et de l'ajout de fumée de silice. Premièrement, nous pouvons constater que la résistance mécanique de tous les mélanges traités avec de la chaux est supérieure à celle du mélange sans traitement, cas des sédiments non traité. Deuxièmement, l'effet d'ajout de fumée de silice est plus important pour les deux mélanges traités avec la chaux **C2** (voir C2 sur la figure V-3) que les deux mélanges traités avec la chaux **C1** (voir C1 sur la figure V-3). Ces résultats démontrent qu'en utilisant une chaux plus réactive celle-ci favorise la réaction pouzzolanique de la fumée de silice, ce qui automatiquement fournit une résistance additionnelle pour le mélange. La fumée de silice est considérée comme un liant pouzzolanique. Le principe de l'action pouzzolanique repose sur la possibilité, qu'en milieu de pH élevé (supérieur à 12), des pourcentages de silice, d'alumine et des oxydes des fers soit libérés des fractions minérales argileuses du sédiment traité. Ces deux paramètres dépendent de la réactivité de la chaux utilisée. L'hydratation de la chaux produit une situation en milieu basique et saturé en ion calcium, les fractions argileuses des sédiments sont attaquées, ensuite elles libèrent l'alumine et la silice qui réagissent avec le calcium pour former de nouveaux minéraux : des silices calciques hydratés et aluminates calciques hydratés (C-S-H et C-A-H). Ce sont ces nouveaux minéraux qui fournissent la résistance additionnelle à long terme. Alors plus la chaux est réactive plus elle génère un niveau de pH élevé et plus elle fournit une quantité de calcium.

5.1.1.2 Traitement avec un ajout de 5% de sable

5.1.1.2.a. Condition de mise en œuvre de mélanges

L'effet de la réactivité des deux différentes chaux (C1 et C2) peut être identifié en comparant les mélanges effectués sans fumée de silice (5-2-3C1-0FS3 et 5-2-3C2-0FS3).

Nous pouvons remarquer également l'effet de la réactivité des deux différentes chaux sur les mélanges réalisés avec de la fumée de silice (5-2-3C1-1FS3 et 5-2-3C2-1FS3). L'effet de la réactivité de deux différentes chaux (C1 et C2) sur la figure V4 sans ajout de fumée de silice est montré grâce à la forte réactivité de la chaux C2. L'augmentation de la valeur de la teneur en eau optimale passe de 20,6%, (voir E, sur la figure V) aux 21,6% (voir B) soit 1% d'augmentation de la teneur en eau optimale. Par contre, cette réactivité de la chaux C2 provoque une diminution de la valeur du poids volumique sec maximal de 16,5 kN/m³ (voir D) à 16,4 kN/m³ (voir B).

L'effet de l'ajout de fumée de silice peut également être confirmé en comparant le mélange 5-2-3C2-0FS3 et 5-2-3C2-1FS3. Une diminution de la teneur en eau optimale de 21,6% (voir B sur la figure V4) à 20,3% (voir C), une réduction de valeur du poids volumique sec maximal de 16,4 kN/m³ (5-2-3C2-0FS3, voir C) à 16,2 kN/m³ (voir C) sont observés.

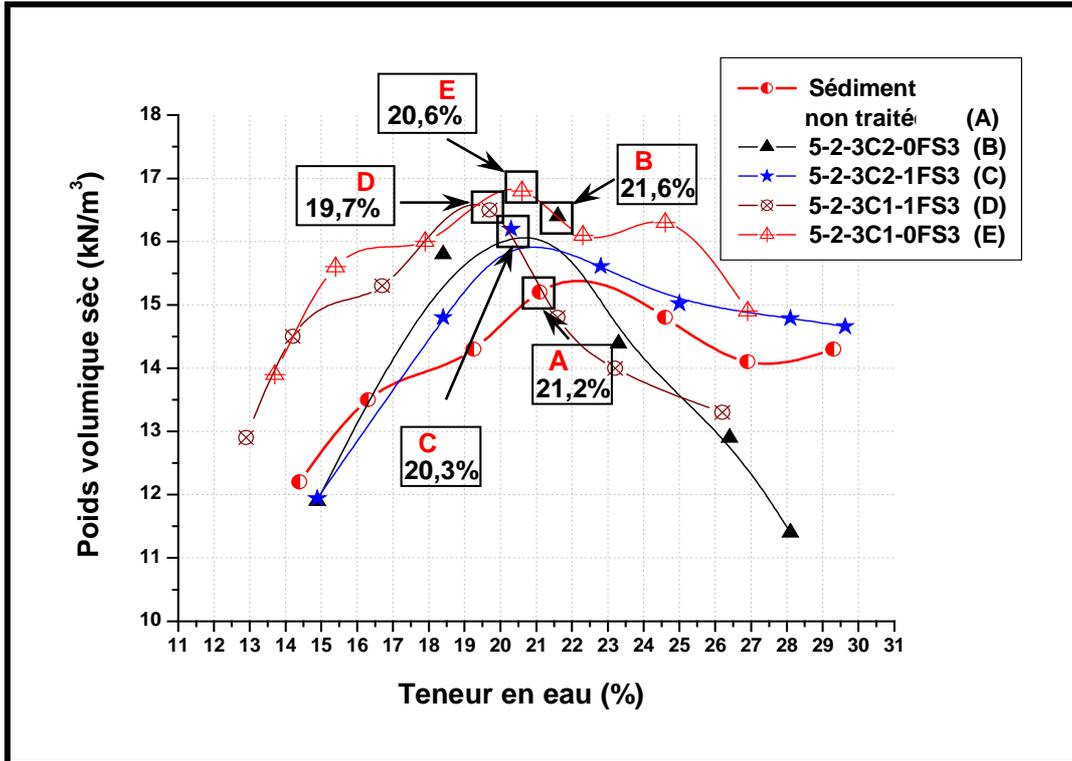


Figure V-4 : Courbes Proctor Normal pour le sédiment non traité et traité avec 2% de ciment

Sur la figure V-5, l'évolution de la valeur de l'Indice Portant Immédiat est donnée. Parmi les mélanges avec 5% de sables, le mélange 5-2-3C2-1FS3 (voir C, sur figure V-5) présente la meilleure valeur de portance (15,8%).

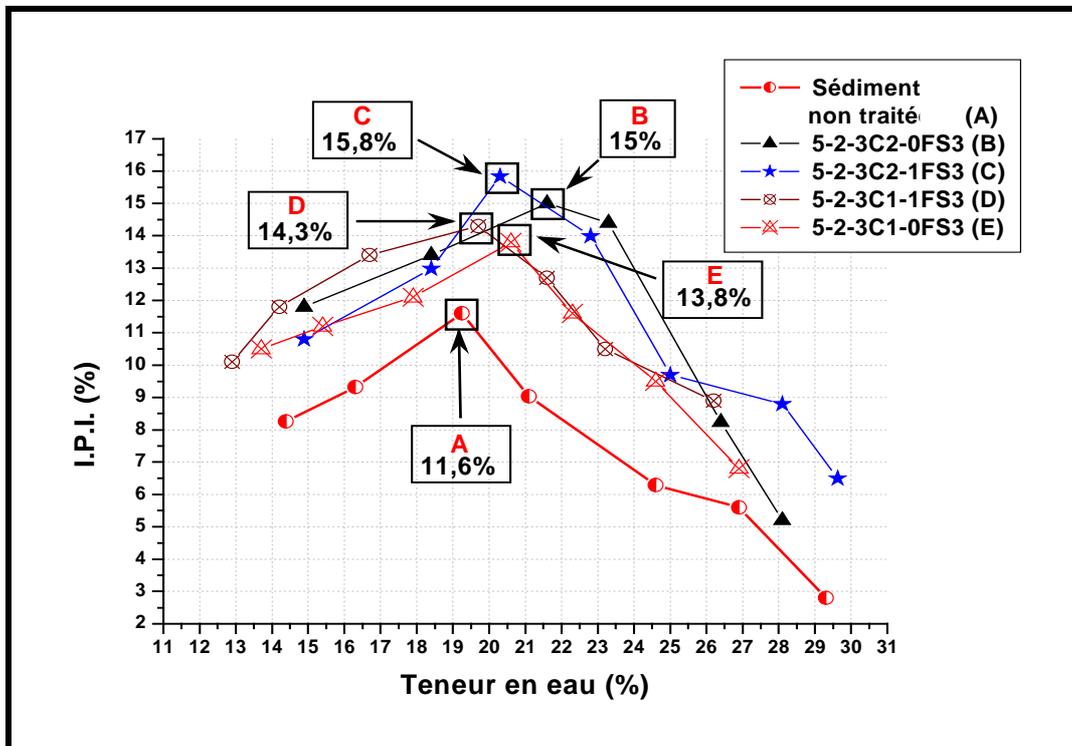


Figure V-5 : Courbes IPI pour le sédiment non traité et des traité avec 2% de ciment

L'effet de la réactivité des deux différentes chaux (C1 et C2) sur la figure V5 sans ajout de fumée de silice (5-2-3C1-0FS3 et 5-2-3C2-0FS3, voir B et D sur la figure V-5), montre que la réactivité de la chaux C2 augmente la valeur de portance d'environ 1.2%. Par contre, l'effet de la réactivité des deux chaux sur les mélanges avec ajout de fumée de silice (5-2-3C1-1FS3 et 5-2-3C2-1FS3, voir D et C) donne une augmentation de la portance environ 1,5%.

L'effet d'un ajout de 1% de fumée de silice peut être également identifié en observant les mélanges traités à la chaux C1 (5-2-3C1-0FS3 et 5-2-3 C1-1FS3) et traités à la chaux C2 (5-2-3C2-0FS3 et 5-2-3C2-1FS3). L'effet d'un ajout de 1% de fumée de silice sur les mélanges traités à la chaux C1 provoque une augmentation de la portance d'environ 0,5% (5-2-3C1-0FS3 et 5-2-3 C1-1FS3, voir E et D sur la figure V-5). Cette augmentation de la valeur de portance est d'environ 0,8% pour les mélanges traités à la chaux C2 (5-2-3C2-0FS3 et 5-2-3C2-1FS3, voir B et C).

5.1.1.2.b. Résistance en compression simple.

En présence de 5% de sable dans les mélanges (figure V-6), la variation de la résistance mécanique montre une augmentation significative par rapport aux résultats précédents obtenus sans ajout de sable. La variation de résistance aux jeunes âges, à 7 jours) entre les mélanges traités avec chaux de la C1 et C2 (voir A2 sur la figure V-6) est très faible. Ces résultats montrent que la chaux avec une réactivité plus importante n'a aucun effet sur l'augmentation de la résistance aux jeunes ages qui était notable sur les résultats précédents avec les mélanges sans ajout de sable (voir figure V-3).

A 28 jours, la forte réactivité de la chaux C2 commence à avoir de l'effet sur l'augmentation de la résistance mécanique (voir B3 et B4 sur la figure V-6). Pour les mélanges traités avec la chaux C1 on obtient une valeur de résistance variant entre 1,39 à 1,4 MPa et pour les mélanges traités avec la chaux C2, on a une valeur de résistance de 1,83 MPa (voir le tableau V-3).

Cet effet se poursuit sur le long terme jusqu'à 360 jours. Les mélanges traités avec la chaux C2 montrent toujours une résistance supérieure à celle obtenue pour les mélanges traités avec la chaux C1 (voir D2 et D3 sur la figure V-6). Cette augmentation peut être vérifiée en lisant le tableau V-2, qui montre que les résistances des mélanges traités avec la chaux C2 et un ajout de 1% de fumée de silice donnent une valeur de résistance comprise 1,93 et 2,03 MPa. Par contre pour celle du mélange avec la même composition mais sans ajout de sables et traités avec da la chaux C1, les valeurs sont comprises entre de 1,62 à 1,66 MPa.

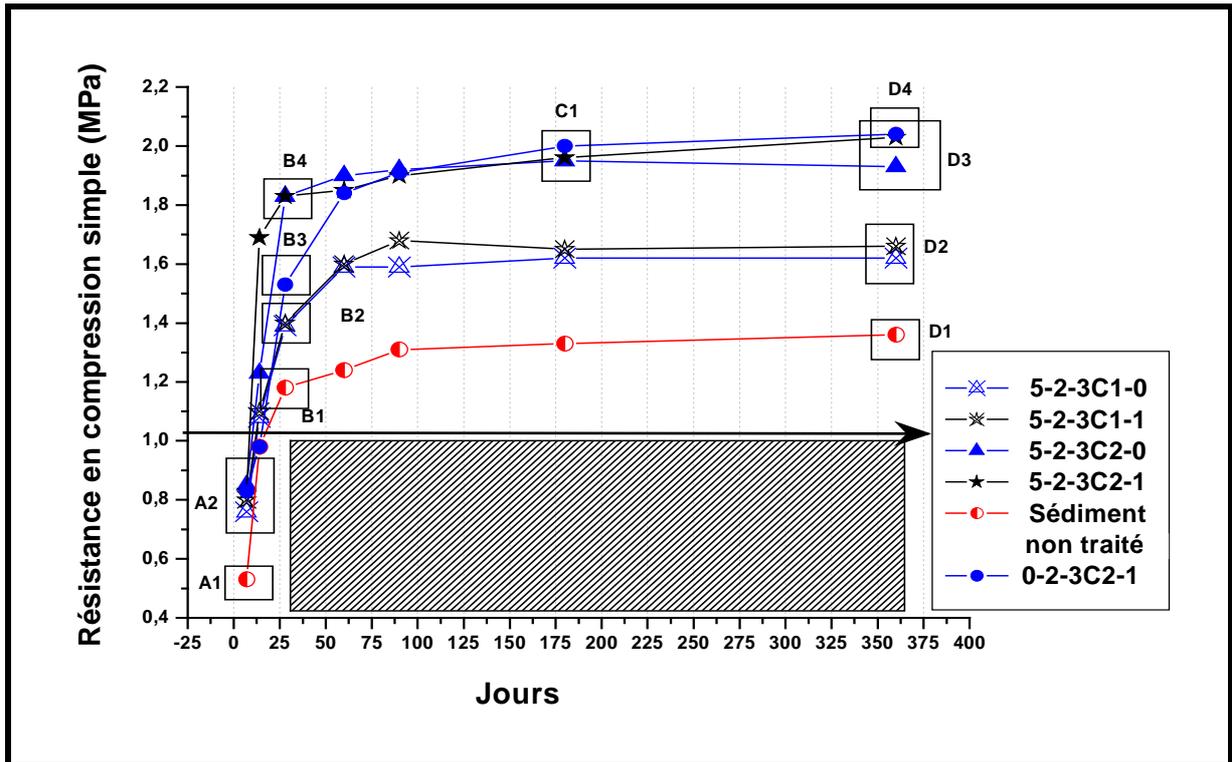


Figure V-6 : Evolution des résistances à la compression pour le sédiment traité avec deux types de chaux et 5% de sable

L'effet de l'ajout de fumée de silice sur la résistance mécanique aux jeunes âges ne montre aucune différence appréciable. L'augmentation de la résistance provoquée par l'ajout de fumée de silice s'observe de manière importante au delà de 200 jours pour les mélanges traités avec la chaux **C2**. Cette augmentation peut être vérifiée sur la figure V-6 (voir D3), où précisément, la variation de résistance mécanique à long terme (360 jours) est attribuée à l'ajout de 1% de fumée de silice dans les mélanges traités avec la chaux **C2**, cette augmentation vaut 0,1 MPa (voir tableau V-2). Par contre, l'effet d'un ajout de fumée de silice sur les mélanges traités avec la chaux **C1** est moins important (voir D2 sur la figure V-6) cette différence n'est que de 0,04 Mpa, (voir tableau V-3). Ces résultats montrent encore une fois, que la réactivité de la chaux est très importante pour activer un liant pouzzolanique comme la fumée de silice.

Tableau V-3 : Résistances mécaniques à la compression obtenues sur le sédiment traité avec deux types de chaux et un ajout de 5% de sable

Formulation	Jours						
	7	14	28	60	90	180	360
5%Sab-2%Cim-3%chx(C1)-0%FS	0,76	1,08	1,39	1,59	1,59	1,62	1,62
5%Sab-2%Cim-3%chx(C1)-1%FS	0,8	1,1	1,4	1,6	1,68	1,65	1,66
5%Sab-2%Cim-3%chx(C2)-0%FS	0,85	1,23	1,83	1,9	1,92	1,95	1,93
5%Sab-2%Cim-3%chx(C2)-1%FS	0,83	1,69	1,83	1,85	1,90	1,96	2,03
Sédiment non traité	0,53	0,98	1,18	1,24	1,31	1,33	1,36
0%Sab-2%Cim-3%chx(C2)-1%FS	0,83	0,98	1,53	1,84	1,91	2,00	2,04

L'effet d'un ajout de sable donne une augmentation de la résistance mécanique. Par rapport aux mélanges traités sans sable depuis la période de jeunes

âges (7 jours). Nous pouvons constater que tous les mélanges avec un ajout de sable ont plus de résistance mécanique que le mélange sans ajout de sable, (voir A2 sur la figure V-6). Un ajout de sable est considéré comme une correction de granulométrie du mélange. Cette théorie explique l'augmentation des performances mécaniques, toutes par ailleurs conditions égales ceci se produit sur la valeur de portance (essai CBR) (voir figure V-5) où l'effet d'ajout de sable fournit une augmentation de la valeur IPI.

L'augmentation de la résistance mécanique grâce à un ajout de sable se montre plus importante à 28 jours. La différence entre les mélanges avec un ajout de 5% de sable et sans ajout, s'observe clairement sur la figure V-6 (voir B2 et B4). Le mélange traité avec la chaux **C2**, 1% de fumée de silice et un ajout de 5% de sable (voir B4) fournit une résistance de 1,83 MPa. Par contre, le mélange traité avec la même chaux (voir B2) et 1% de fumée de silice sans l'ajout de sable présente une valeur de résistance de 1,53 MPa, soit 16% d'augmentation qui peut être attribuée à l'ajout de 5% de sable. A partir de 90 jours, la résistance du mélange sans ajout de sable jusqu'à la période de 180 jours, où cette même résistance dépasse la valeur de résistance des mélanges avec un ajout de 5% de sable (voir C1 sur la figure V-6). Cependant, après la période de 180 jours, le mélange avec un ajout de 5% de sable montre toujours très légère augmentation. Ces résultats montrent aussi que l'ajout de 5% de sable perturbe ou retarde la réaction pouzzolanique à long terme au-delà de 90 jours.

5.1.1.3 Traitement avec un ajout de 10% de sable

5.1.1.3.a. Condition de mise en œuvre de mélanges

Les résultats d'essai Proctor Normal sont présentés sur la figure V-7. L'effet de la réactivité des deux différentes chaux (C1 et C2) peut être identifié en comparant les mélanges sans fumée de silice (10-2-3**C1**-0FS3 et 10-2-3**C2**-0FS3).

Cet effet peut être décelé avec les mélanges ayant un ajout de fumée de silice : 10-2-3**C1**-1FS3 et 10-2-3**C2**-1FS3. L'effet de la réactivité de deux différentes chaux (C1 et C2) sur les mélanges sans fumée de silice influence la valeur de teneur en eau optimale qui augmente de 17,5% (voir D sur la figure V-7) à 18,3% (voir C), soit 0,8% d'augmentation de la teneur en eau optimale. Par contre, la réactivité de la chaux **C2** provoque une diminution de 18.6 à 18 de la valeur du poids volumique sec maximal qui passe de 18.6 kN/m³ (voir C) à 18 kN/m³ (voir D). L'effet de la réactivité de deux différentes chaux (C1 et C2) sur les mélanges avec l'ajout de 1% de fumée de silice (10-2-3**C1**-1FS3 et 10-2-3**C2**-1FS3) montre que la valeur de teneur en eau optimale augmente de 18,2% (10-2-3**C1**-1FS3, voir E sur la figure V-7) à 19,5% (10-2-3**C2**-1FS3, voir B) soit 0,7% d'augmentation de la teneur en eau optimale. Ensuite, cette réactivité de la chaux **C2** provoque toujours une diminution de la valeur du poids volumique sec maximal de 18,4 kN/m³ (10-2-3**C1**-1FS3, voir E) à 17,8 kN/m³ (10-2-3**C2**-1FS3, voir B).

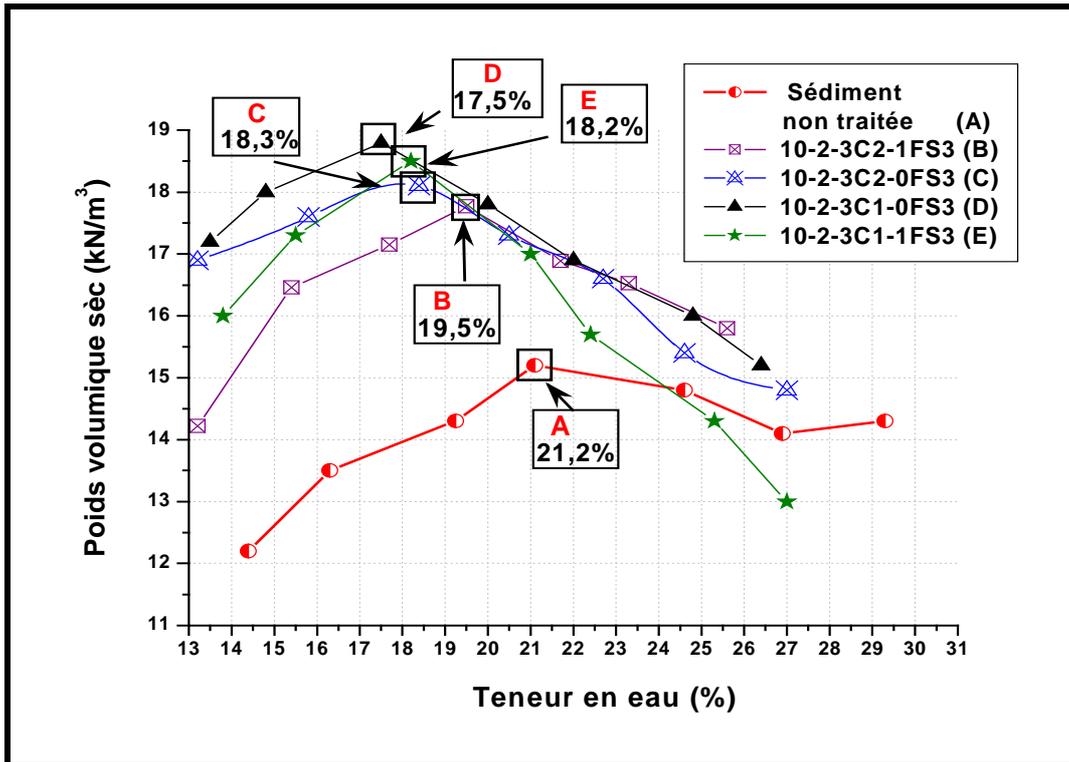


Figure V-7 : Courbes Proctor Normal pour sédiment non traité et traité avec 2% de ciment

La figure V-8 montre que parmi tous les mélanges avec 10% de sable, le mélange 10-2-3C2-1FS3 (voir B sur la figure V-8) fournit une meilleure valeur de portance avec de 17,8%.

L'effet de la réactivité des deux différentes chaux (C1 et C2) sur les mélanges sans fumée de silice (10-2-3C1-0FS3 et 10-2-3C2-0FS3, voir C et E sur la figure V-8) montre que la réactivité de la chaux C2 augmente la valeur de portance environ de 0,3%. Par contre, l'effet de la réactivité des deux chaux sur les mélanges avec fumée de silice (10-2-3C1-1FS3 et 10-2-3C2-1FS3, voir B et E) donne une augmentation de la portance d'environ 2%.

L'effet d'un ajout de 1% de fumée de silice peut être également identifié en regardant les mélanges traités à la chaux C1 (10-2-3C1-0FS3 et 10-2-3 C1-1FS3) et traités à la chaux C2 (10-2-3C2-0FS3 et 10-2-3C2-1FS3). L'effet d'un ajout de 1% de fumée de silice sur les mélanges traités à la chaux C1 provoque une augmentation de la portance d'environ 0,5% (10-2-3C1-0FS3 et 10-2-3 C1-1FS3, voir D et E sur la figure V-8). Cette augmentation de valeur de portance est d'environ 0,9% pour les mélanges traités à la chaux C2 (5-2-3C2-0FS3 et 5-2-3C2-1FS3, voir B et C).

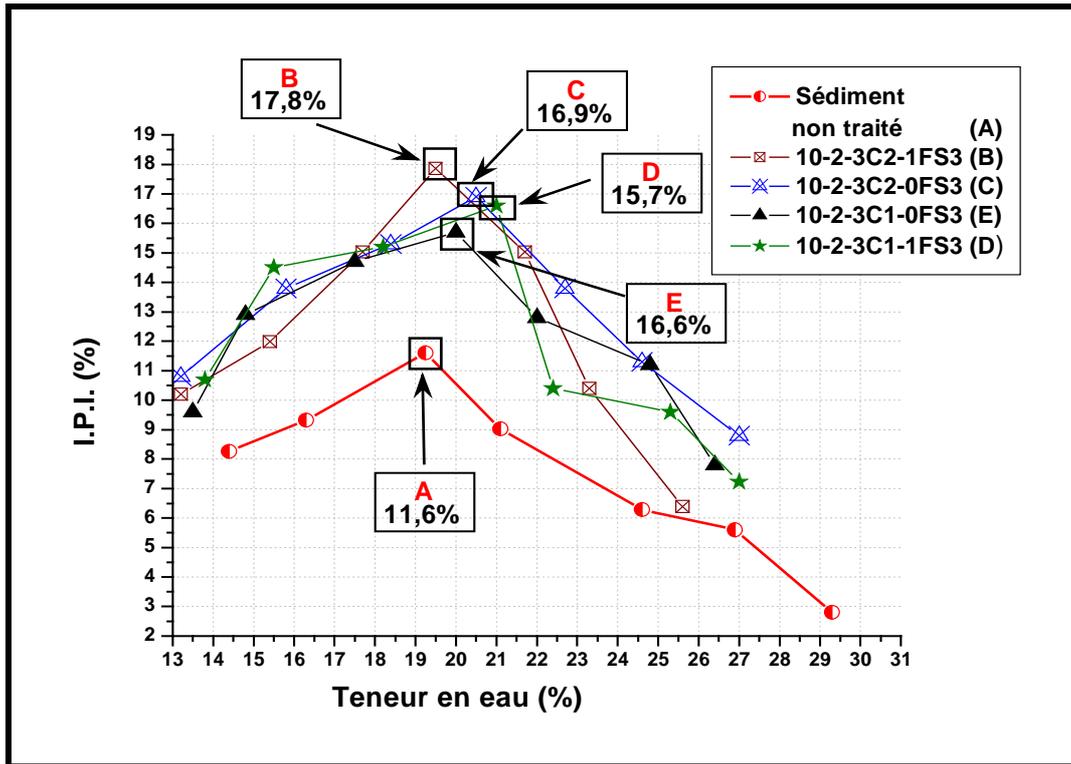


Figure V-8 : Courbes IPI pour le sédiment non traité et traité avec 2% de ciment

5.1.1.3.b. Résistance en compression simple.

L'effet de l'ajout de 10% de sable dans le mélange sur la variation de la résistance mécanique est montré sur la figure V-9, la variation de la résistance aux jeunes âges, à 7 jours, entre les mélanges traités avec chaux **C1** et **C2** (voir A2 et A3 sur la figure V-9). Les mélanges traités avec la chaux **C1** (A2) obtient une valeur de résistance moins importante que ceux traités avec de la chaux **C2** (A3).

L'effet de la réactivité de la chaux sur les performances mécaniques aux jeunes ages montre que, pour les mélanges traités avec la chaux **C1** les résistances (voir A2, sur la figure V-9) sont inférieures à celles des mélanges traités avec la chaux **C2** (voir A3 sur la figure V-9). L'explication pour ces résultats a déjà été discutée précédemment. Pour les performances mécaniques à 28 jours, l'effet de la réactivité de la chaux se développe nettement, les résistances des mélanges traités avec la chaux **C1** sont légèrement au-dessus de celles des mélanges non traités (voir B2 sur la figure V-9). Ces résultats montrent clairement que l'effet d'un ajout de 10% de sable, à cette période, empêche les hydrations du ciment pour fournir une résistance mécanique. Nous pouvons aussi considéré que la réactivité moyenne de la chaux 1 ne suffit pas à fournir une quantité de CaO qui est nécessaire pour enclencher la réaction pouzzolanique des fumées de silice fournissant une résistance additionnelle sur le mélange traité. Par contre, ce n'est pas le cas pour le mélange traité avec la chaux **C2** (voir B2 sur la figure V-9). Les valeurs obtenues par ces mélanges (voir B3 et B4) sont supérieures à celles des mélanges sans ajout de sable (voir B2). Ces résultats montrent qu'avec une réactivité suffisamment forte, un ajout de 10% de sable donne une amélioration de résistance mécanique

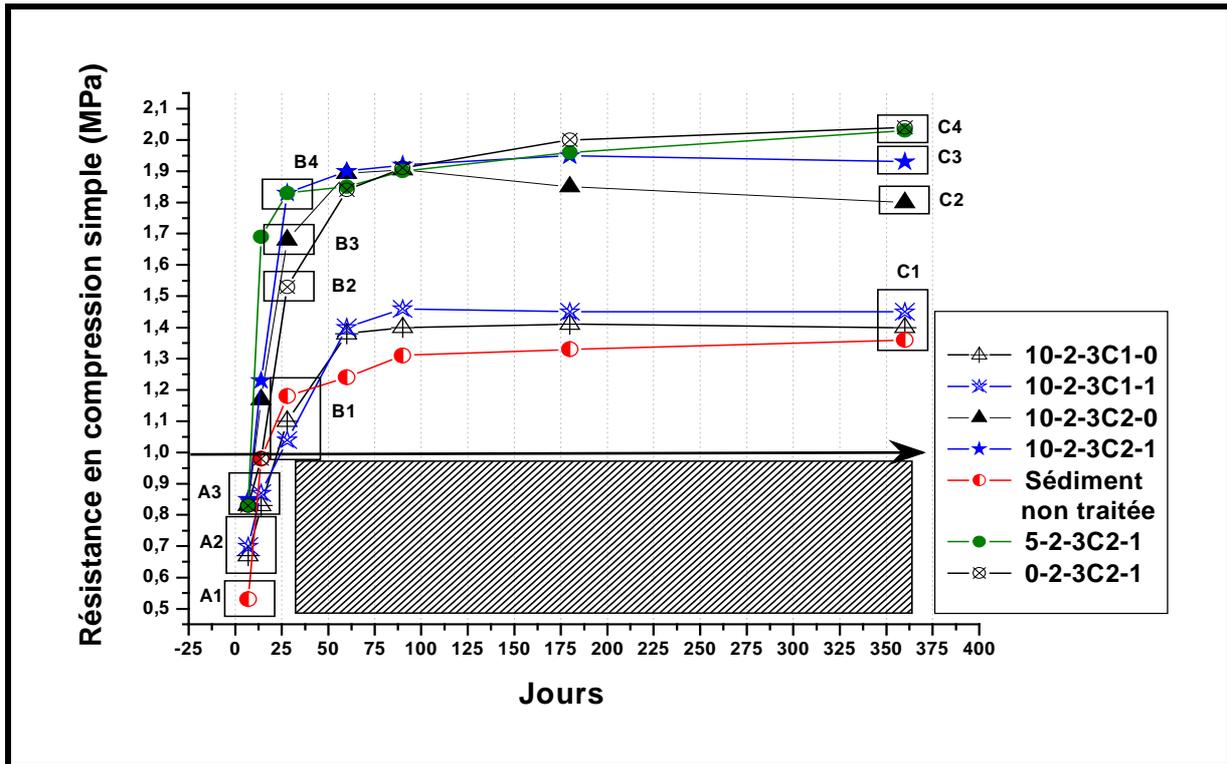


Figure V-9 : Evolution des résistances à la compression pour le sédiment traité avec deux types de chaux et 10% de sables

Par rapport à la résistance des mélanges traités avec l'ajout de 5% et de la chaux **C2**, les résultats ne montrent aucune augmentation de la résistance (voir B4). Si l'on observe les performances mécaniques après 60 jours, les résistances de mélanges traités avec la chaux **C2** montrent des valeurs assez importantes qui dépassent les valeurs des résistances des mélanges non traités, mais cette augmentation s'arrête après 60 jours. Les résistances de ces mélanges ne montrent aucune augmentation jusqu'à la période de 360 jours (voir tableau V-4).

Tableau V-4 : Performances mécaniques obtenues sur un sédiment traité avec deux types de chaux avec un ajout de 10% de sable

Formulation	Jours						
	7	14	28	60	90	180	360
10%Sab-2%Cim-3%chx(C1)-0%FS	0.67	0.83	1.1	1.38	1.4	1.41	1.4
10%Sab-2%Cim-3%chx(C1)-1%FS	0.7	0.87	1.04	1.4	1.46	1.45	1.45
10%Sab-2%Cim-3%chx(C2)-0%FS	0.831	1.17	1.68	1.893	1.905	1.85	1.8
10%Sab-2%Cim-3%chx(C2)-1%FS	0.85	1.23	1.83	1.9	1.92	1.95	1.93
Sédiment non traitée	0.53	0.98	1.18	1.24	1.31	1.33	1.36
0%Sab-2%Cim-3%chx(C2)-1%FS	0.83	0.98	1.53	1.84	1.91	2	2.04
5%Sab-2%Cim-3%chx(C2)-1%FS	0.83	1.69	1.83	1.85	1.9	1.96	2.03

L'effet d'un ajout de sable sur les mélanges traités avec de la chaux **C2** montre un retard de l'augmentation de la résistance à long terme. Nous pouvons constater que l'augmentation de la résistance des mélanges sans ajout de sable ne s'arrête pas même après la période de 360 jours (voir le mélange de 0-2-3C2-1FS3). La résistance de ce mélange (sans un ajout de sable) est moins importante que celles des mélanges avec les ajouts de 5% et 10% de sable durant la période de 7

jours à 60 jours, mais au-delà, la résistance évolue assez continuellement et dépasse même toutes les valeurs des résistances à 180 jours. Pour les mélanges de 10% de sable, l'augmentation de la résistance s'arrête après la période de 180 jours. Pour les mélanges avec 5% de sable la valeur augmente jusqu'à 360 jours, même si cette évolution est moins importante que celles des mélanges sans ajout de sable. Nous pouvons évaluer cette augmentation plus précise sur le tableau V-4.

L'effet de l'ajout de fumée de silice pour les mélanges traités avec la chaux **C1** est plus important à partir de 28 jours (voir B1 sur la figure V-9), et continue jusqu'à une période à long terme de 360 jours (voir C1). Mais cette augmentation passe d'une valeur de 1,4MPa à 1,45 Mpa à 360 jours. Par contre, pour les mélanges traités avec la chaux **C2**, la valeur est plus importante (voir C3 et C4 sur la figure V-9). L'écart peut être vérifié en détail sur le tableau V-4 où nous pouvons observer que l'écart passe de 1,8 MPa à 1,93 MPa (dans la période de 360 jours). Ces résultats nous prouvent que l'effet de la fumée de silice peut être plus importante en utilisant la chaux avec une réactivité assez forte pour fournir une quantité de CaO pour enclencher la réaction de pouzzolanique de la fumée de silice.

5.1.1.4 Traitement avec un ajout de 15% de sable

5.1.1.4.a. Condition de mise en œuvre de mélanges

Les résultats des essais Proctor Normal sont présentés à la figure V-10. Les résultats montrent comment se comportent les différentes compositions des mélanges.

L'effet de la réactivité des deux différentes chaux (**C1** et **C2**) est présenté sur la figure V-10. Cet effet peut être identifié en comparant les mélanges sans fumée de silice et les mélanges avec un ajout de fumée de silice (15-2-3**C1**-1FS3 et 15-2-3**C2**-1FS3) L'effet de la réactivité des deux différentes chaux (C1 et C2) sur les mélanges avec un ajout de 1% de fumée de silice montre que la valeur de la teneur en eau optimale augmente de 17,3% (10-2-3**C1**-1FS3, voir B sur la figure V-10) à 17,8% (15-2-3**C2**-1FS3, voir E) soit 0,5% d'augmentation de teneur en eau optimale. Ensuite, cette réactivité de la chaux 2 provoque une diminution de valeur du poids volumique sec maximal qui passe de 18,3 kN/m³ (15-2-3**C1**-1FS3, voir D) à 15,4 kN/m³ (15-2-3**C2**-1FS3, voir E).

L'effet de la réactivité des chaux sur les mélanges sans fumée de silice (15-2-3**C1**-0FS3 et 15-2-3**C2**-0FS3) montre que la valeur de la teneur en eau optimale diminue de 18.3% (10-2-3**C1**-0FS3, voir D sur la figure V-10) à 15.9% (10-2-3**C2**-0FS3, voir C) soit 0,4% d'augmentation de la teneur en eau optimale. Ce dernier résultat est contradictoire avec la théorie, la réaction de la chaux absorbe l'eau, donc, une réactivité de la chaux plus forte provoque une augmentation de la teneur en eau plus important. Nous estimons que ce résultat est provoqué par le défaut de la granulométrie du sable (voir chapitre 4.6.1)

L'effet de la fumée de silice s'observe en comparant les mélanges traités avec la chaux **C2** 15-3**C2**-0FS3 et 15-3**C2**-1FS3. on constate une augmentation de la teneur en eau optimale de 15,4% (15-3**C2**-0FS3, voir C) à 17,8% (15-3**C2**-1FS3, voir

E), mais une réduction de valeur du poids volumique sec maximal qui passe de 18,1 kN/m³ (15-2-3C2-0FS3, voir C) à 18,7 kN/m³ (15-2-3C2-1FS3, voir E).

Par contre, pour l'effet de fumée de silice, nous remarquons une réduction de la teneur en eau en comparant les mélanges traités avec la chaux C1 15-3C2-0FS3 et 15-3C2-1FS3. Une réduction de la teneur en eau optimale de 18,3% (15-2-3C1-0FS3, voir D) à 18,3% (15-2-3C1-1FS3, voir B) est encore une fois notée et due à un défaut de la granulométrie du sable. L'ajout de la fumée de silice, grâce à ses fines particules, remplit les espaces vides, et réduit la porosité, ce qui provoque une amélioration de la résistance. Mais pour notre cas avec ces résultats nous estimons toute réduction de la résistance est provoquée par un défaut de sable.

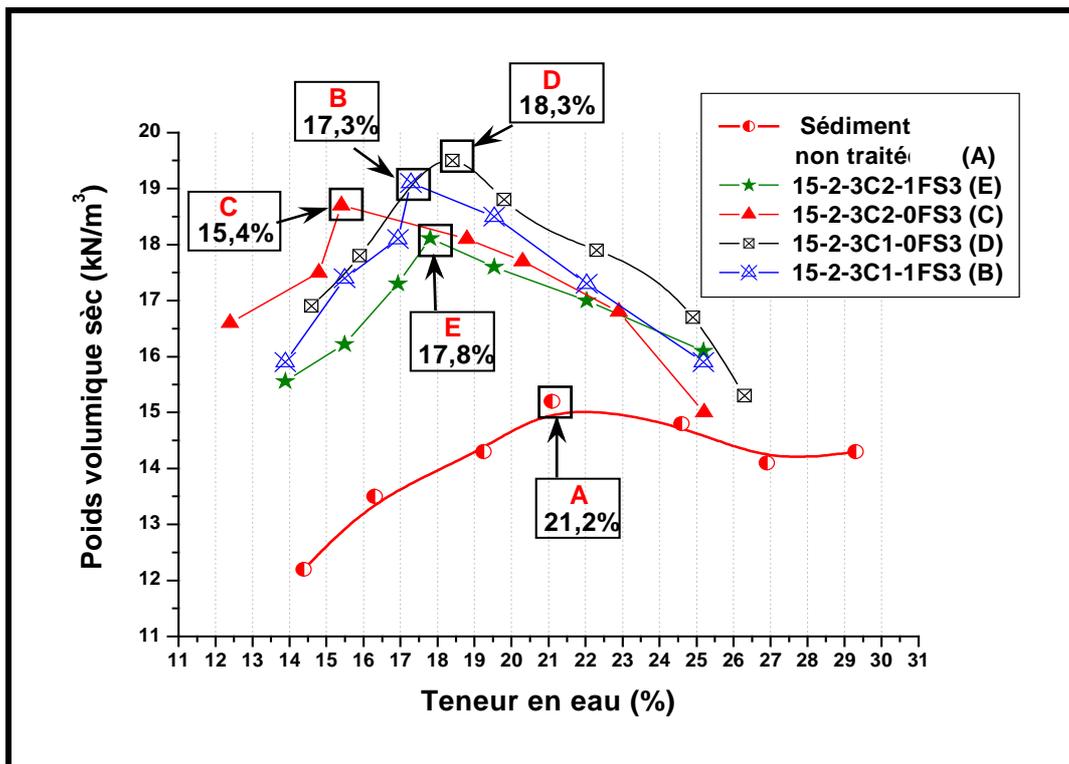


Figure V-10 : Courbes de Proctor Normal des sédiments non traités et traités avec 2% de ciment

La figure V-11 montre que parmi tous les mélanges avec 10% de sable, le mélange 15-2-3C2-0FS3 (voir C sur figure V-11) a une meilleure valeur de portance pour IPI de 18,9%.

L'effet de la réactivité des deux différentes chaux (C1 et C2) sur les mélanges sans fumée de silice (15-2-3C1-0FS3 et 15-2-3C2-0FS3, voir C et D sur la figure V-11) montre que la réactivité de la chaux C2 augmente la valeur de la portance d'environ 0,9%. Par contre, l'effet de la réactivité de deux chaux sur les mélanges avec fumée de silice (15-2-3C1-1FS3 et 15-2-3C2-1FS3, voir B et E) monte une réduction de la portance d'environ 0,2%.

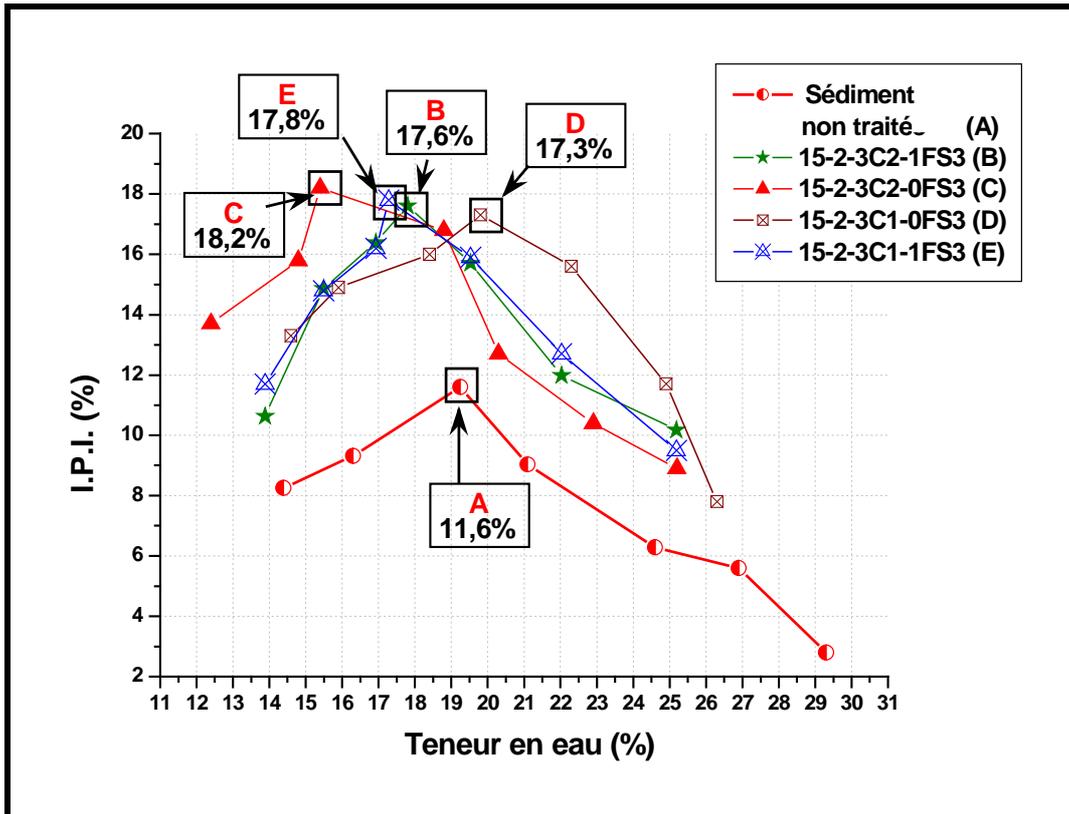


Figure V-11 : Evolution de la portance d'un sédiment non traité et traité avec 2% de ciment

L'effet d'un ajout de 1% de fumée de silice peut être également identifié en regardant les mélanges traités à la chaux **C1** (15-2-3**C1**-0FS3 et 15-2-3 **C1**-1FS3) et traités à la chaux **C2** (15-2-3**C2**-0FS3 et 15-2-3**C2**-1FS3). L'effet d'un ajout de 1% de fumée de silice sur les mélanges traités à la chaux **C1** provoque une augmentation de la portance d'environ 0,5% (15-2-3**C1**-0FS3 et 15-2-3 **C1**-1FS3, voir D et E sur la figure V-11). Par contre, l'effet d'ajout de 1% de fumée de silice sur les mélanges traités à la chaux **C2** provoque une réduction de la portance environ 0,6% (15-2-3**C2**-0FS3 et 15-2-3 **C2**-1FS3, voir B et C sur la figure V-11). Le dernier résultat peut être attribué au défaut de granulométrie du sable, (déjà expliquée précédemment).

5.1.1.4.b. Résistance en compression simple.

L'ajout de 15% de sable représente la quantité maximale de sable qu'on introduit dans le mélange. L'effet d'un ajout de 15% de sable sur les résistances mécaniques sont montrées sur la figure V-12.

La légère variation de la résistance aux jeunes âges (à 7 jours) entre les mélanges traités avec la chaux **C1** et la chaux **C2** (voir A2 sur la figure V-12) indique qu'un ajout de 15% de sable ne fournit aucun effet important. A 28 jours, la variation de cette résistance en compression se dévoile et est plus importante. Les mélanges traités avec la chaux **C1** donnent une résistance variant entre 1,2 à 1,28 MPa (voir B1 sur la figure V-12). Pour les mélanges traités avec la chaux **C2**, ces valeurs obtenues se situent entre 1,59 et 1,78 MPa (voir B2 et B3 sur la figure V-12). Nous pouvons remarquer plus clairement l'importance de la réactivité de la chaux sur l'augmentation de la résistance des mélanges traités à long terme soit 360 jours.

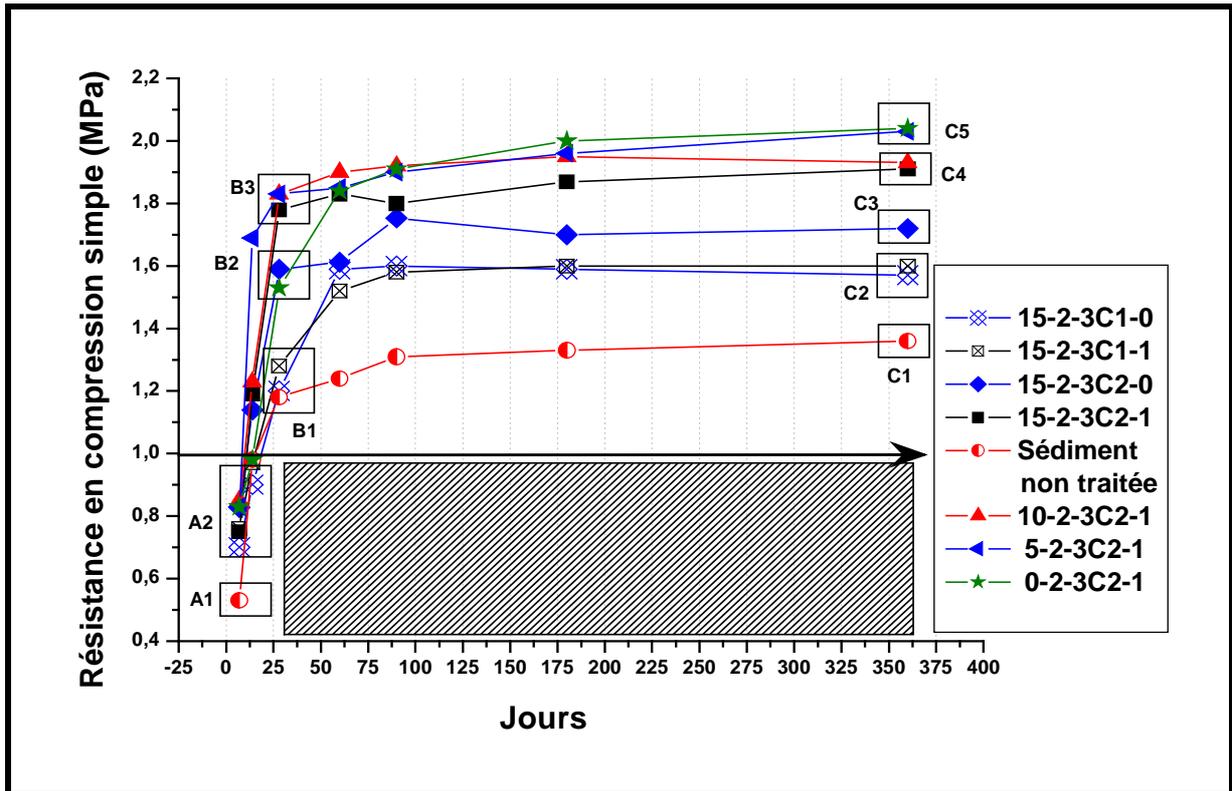


Figure V-12 : Résistance mécanique obtenue sur le sédiment traité avec deux types de chaux et 15% de sable

A 360 jours l'écart de la résistance entre les mélanges traités avec la chaux **C1** (voir C2 sur la figure V-12) et la chaux **C2** (voir C3 et C4 sur la figure V-12).

L'effet d'un ajout de 15% de sable à 28 jours confirme un effet important par rapport aux mélanges avec un ajout de 5% et 10% de sable, avec la même composition. En observant B2 et B3 sur la figure V-12, nous pouvons constater que les résistances obtenues pour les mélanges traités avec 1% de fumée de silice et avec un ajout de sable (5%, 10% et 15%) se trouvent en B3, par contre, la résistance pour le mélange sans ajout de sable (0-2-3-1) se trouve en B2. Pour la période à long terme, après 60 jours, les résistances des mélanges montrent une variation assez importante. L'évolution de la résistance des mélanges avec l'ajout de 15% de sable (15-2-3C2-1) ne montre aucune augmentation significative après 60 jours. A 360 jours, les résistances à la compression des mélanges traités avec la chaux **C2** et 1% de fumée de silice, elles se divisent en 2 classes, la première contient les mélanges avec un ajout de 10 et 15% de sable (voir C4 sur la figure V-12) avec une valeur de résistance inférieure à celle de la deuxième classe qui contient les mélanges sans ajout de sable et 5% de sable (voir C5 sur la figure V-12). Ces résultats confirment l'explication précédente, où nous supposons que l'ajout de sable donne une résistance aux jeunes âges mais retarde la réaction de pouzzolanique à long terme.

Dans le cas de relative aux d'un ajout de fumée de silice, cet effet ne fournit aucune augmentation importante aux performance mécaniques à long terme pour les mélanges traités avec la chaux **C1** (voir C2 sur la figure V-12). Cependant pour la période de 28 jours à 60 jours, la résistance des mélanges sans fumée de silice (15-2-3C2-0) dépasse celle du mélange avec 1% de fumée de silice (15-2-3C2-1) ces

résultats ne correspondent à ce qui peut être la théorie. Mais la résistance des mélanges traités avec 1% de fumée de silice évolue progressivement après 60 jours.

Tableau V-5 : Résistance mécaniques obtenues sur le sédiment traité sur deux types de chaux et un ajout de 15% de sables

Formulation	Jours						
	7	14	28	60	90	180	360
15%Sab-2%Cim-3%chx(C1)-0%FS	0.70	0.90	1.20	1.59	1.60	1.59	1.57
15%Sab-2%Cim-3%chx(C1)-1%FS	0.76	0.97	1.28	1.52	1.58	1.60	1.60
15%Sab-2%Cim-3%chx(C2)-0%FS	0.82	1.13	1.59	1.612	1.73	1.70	1.72
15%Sab-2%Cim-3%chx(C2)-1%FS	0.75	1.19	1.78	1.83	1.8	1.87	1.91
Vase non traité	0.53	0.98	1.18	1.24	1.31	1.33	1.36
0%Sab-2%Cim-3%chx(C2)-1%FS	0.83	0.98	1.53	1.84	1.91	2,00	2.04
5%Sab-2%Cim-3%chx(C2)-1%FS	0.83	1.69	1.83	1.85	1.90	1.96	2.03
10%Sab-2%Cim-3%chx(C2)-1%FS	0.85	1.23	1.83	1.9	1.92	1.95	1.93

Nous estimons que ce retard d'augmentation est provoqué par la réactivité moyenne de la chaux **C1**, qui perturbe la réaction de pouzzolanique de la fumée de silice. Par contre, pour les mélanges traités avec la chaux **C2**, l'effet de l'ajout de fumée de silice est bien marqué. Le mélange avec un ajout de 1% de fumée de silice montre une performance mécanique qui s'évolue jusqu'à la période à long terme (voir B3 et C4 sur la figure V-12).

Pour le mélange sans ajout de fumée de silice, n'aucune augmentation des performances mécaniques (voir B2 et C3) n'est observée. Cet effet de fumée de silice sur l'évolution des performances mécaniques peut être vérifier en observant le tableau V-5, la différence entre les mélanges sans et avec ajout de fumée de silice à 360 jours traités (avec la chaux **C2**), est 0,19 MPa soit 9,9% d'augmentation grâce à l'ajout de 1% fumée de silice. Par contre, pour la différence entre les mélanges traités à la chaux **C1**, elle est de 0,03 MPa soit 1% d'augmentation. Avec ces résultats nous pouvons constater que la réactivité de la chaux dans un traitement à liant pouzzolanique est très important.

5.1.2. Choix de la fumée de silice.

Nous avons réalisé treize formulations de mélanges. Pour chaque série de mélange, trois éprouvettes ont été réalisées pour chaque période d'essai (7, 14, 28, 60, 90, 180 et 360 jours). Le tableau V-6 montre les pourcentages de liant utilisées.

Tableau V-6 : Pourcentages des mélanges de liant utilisées

Série	Sable (%)	Ciment (%)	Chaux2 (%)	Fumée de silice 1 (%)	Fumée de silice 2 (%)	Fumée de silice 3 (%)
Vase Non traité	-	-	-	-	-	-
0-2-3 C2 -1FS1	-	2	3	1	-	-
0-2-3 C2 -1FS2	-	2	3	-	1	-
0-2-3 C2 -1FS3	-	2	3	-	-	1
5-2-3 C2 -1FS1	5	2	3	1	-	-
5-2-3 C2 -1FS2	5	2	3	-	1	-
5-2-3 C2 -1FS3	5	2	3	-	-	1
15-2-3 C2 -1FS1	15	2	3	1	-	-
15-2-3 C2 -1FS2	15	2	3	-	1	-
15-2-3 C2 -1FS3	15	2	3	-	-	1

5.1.2.1. Traitement sans ajout de sable

5.1.2.1.1. Résultats et analyse des essais de la résistance en compression simple

Les résultats obtenus pour un traitement sans ajout de sable avec trois types différents de fumée de silice sont donnés sur la figure V-13. Nous pouvons remarquer que les résistances à la compression simple aux jeunes âges (7 et 14 jours) pour les mélanges traités sont supérieures à celle du mélange de sédiment non traité (voir A1, A2 et A3 sur la figure V-13). Nous pouvons remarquer également à ces âges que les résistances des mélanges traités avec la fumée de silice de type 3 (**FS3**) et fumés de type 1 (**FS1**) ne montrent aucune différence importante (voir A3). Par contre, pour le mélange traité avec de la fumée de silice de type 2 (**FS2**) on obtient une valeur de résistance inférieure que celles de mélanges traités avec **FS1** et **FS3** (voir A2).

A 28 jours, le mélange traité avec **FS3** fournit toujours une valeur supérieure aux autres mélanges (1,53 MPa) ; le mélange avec FS1 a une valeur identique à celle du mélange **FS2** (1,33 MPa). Mais cette forte augmentation est suivie par une réduction assez importante à 90 jours. La valeur de la résistance diminue jusqu'à 1,83 MPa (voir tableau V-7) soit 5,16% de diminution de la résistance par rapport la résistance à 60 jours.

Les résistances à la compression simple à 60 jours sont contraires l'ordre des résultats obtenus précédemment. Le mélange traité avec **FS2** montre une augmentation de la résistance assez importante (1,92 MPa) par rapport à la résistance à 28 jours (1,32 MPa). La valeur de cette augmentation est de 31,6%. Cette résistance est la meilleure résistance obtenue pour la période de 60 jours (voir C4). Pour les mélanges traités avec **FS1** et **FS3**, les résistances obtenues ne montrent aucune diminution (voir C2 et C3).

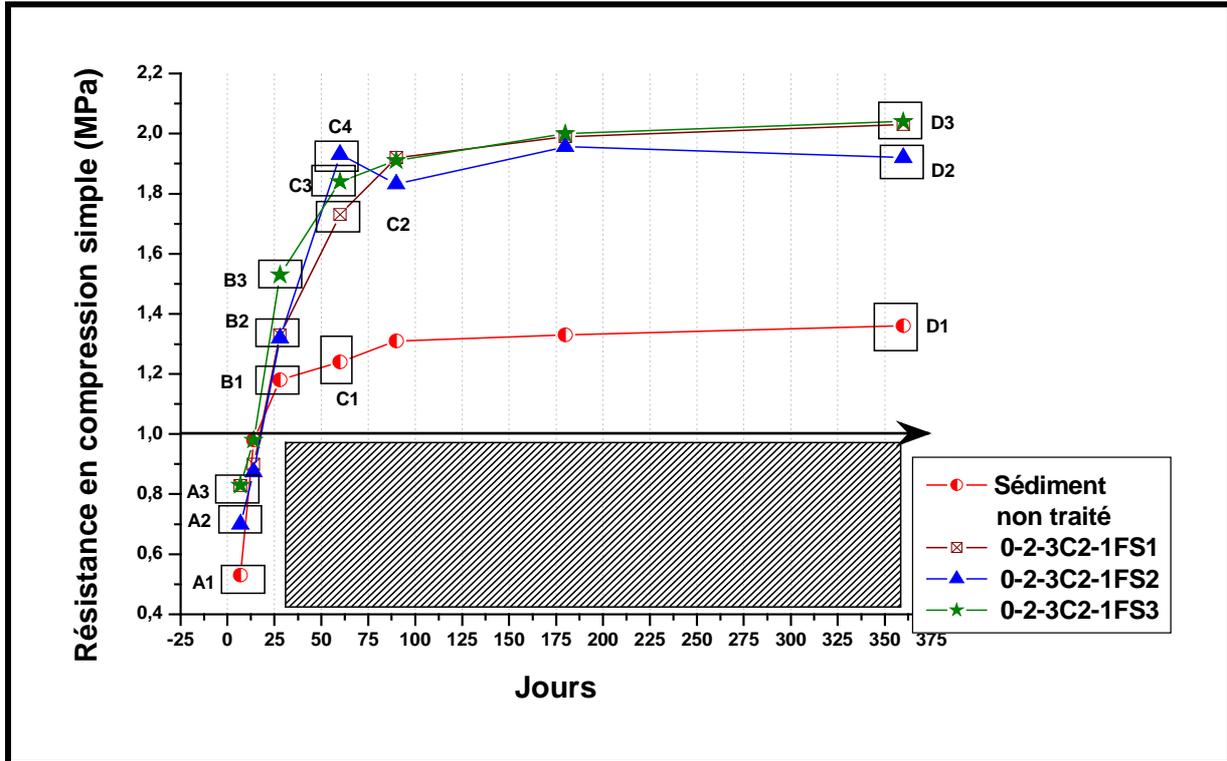


Figure V-13. Evolution de Rc mécaniques obtenues sur le sédiment traité avec deux types de fumée de silices sans ajout de sable

Tableau V-7 : Résistances mécaniques obtenues sur le sédiment traité avec différents types de fumée de silice sans ajout de sable

Formulation	Jours						
	7	14	28	60	90	180	360
Vase non traité	0.53	0.98	1.18	1.24	1.31	1.33	1.36
0% <i>sab</i> -2% <i>cim</i> -3% <i>chx</i> (C2)-1%FS1	0.82	0.89	1.33	1.73	1.92	1.99	2.03
0% <i>sab</i> -2% <i>cim</i> -3% <i>chx</i> (C2)-1%FS2	0.7	0.87	1.32	1.93	1.831	1.95	1.92
0% <i>sab</i> -2% <i>cim</i> -3% <i>chx</i> (C2)-1%FS3	0.83	0.98	1.53	1.84	1.91	2	2.04

L'évolution de la résistance à long terme (de 180 à 360 jours) des mélanges traités avec **FS1** et **FS3** montre une légère augmentation (voir D3). Nous pouvons la quantifier en considérant les valeurs du tableau V-7, où le mélange traité avec **FS1** possède une augmentation de la résistance de 1,97% (de 1,99 MPa à 2,03 MPa) et pour le mélange traité avec **FS3**, la valeur de cette augmentation est de 1,96% (de 2 MPa à 2,04 MPa). D'après les résultats obtenus, nous pouvons constater que les différentes caractéristiques des fumées de silices provoquent des différences des niveaux des résistances mécaniques obtenues.

Théoriquement, grâce à ses particules fines, la fumée de silice occupe des espaces des pores et réduit une partie des espaces vides qui n'ont pas été remplis par le produit des hydrations du ciment. Les particules fines de fumée de silice remplissent les pores vides ce qui réduit la perméabilité globale. Mais cet effet va s'accroître suivant de l'âge des éprouvettes. Donc grâce à leurs granulométries, qui contiennent ces particules très fines, le mélange traité avec la fumée de silice de type 1 (**FS1**) doit fournir une résistance supérieure à celle des autres. Mais les

résultats obtenus montre que le mélange avec de la fumée de silice type 3 (**FS3**) possède une meilleure résistance que celui traité avec la fumée de silice de type 1 (**FS1**). Donc nous pouvons conclure que c'est les caractéristiques chimiques de la fumée de silice qui provoque cette augmentation de résistance.

5.1.2.1.2. Résultats et analyse des essais de gel-dégel

5.1.2.1.2.a. Evolution de la perte de masse

Les résultats du suivi morphologique des échantillons, sans sable sont présentés sur la figure V-14. Sur la série d'échantillons âgés de 7 jours soumise aux essais de gel-dégel pendant 20 jours (40 cycles), nous pouvons constater que les éprouvettes des mélanges de vase non traitée, au 20^{ème} cycle, a une perte de masse d'environ 14%, mais pour les éprouvettes traitées avec des liants, la perte de masse est comprise entre 8% et 9%, soit environ 4% de diminution de la perte de masse.

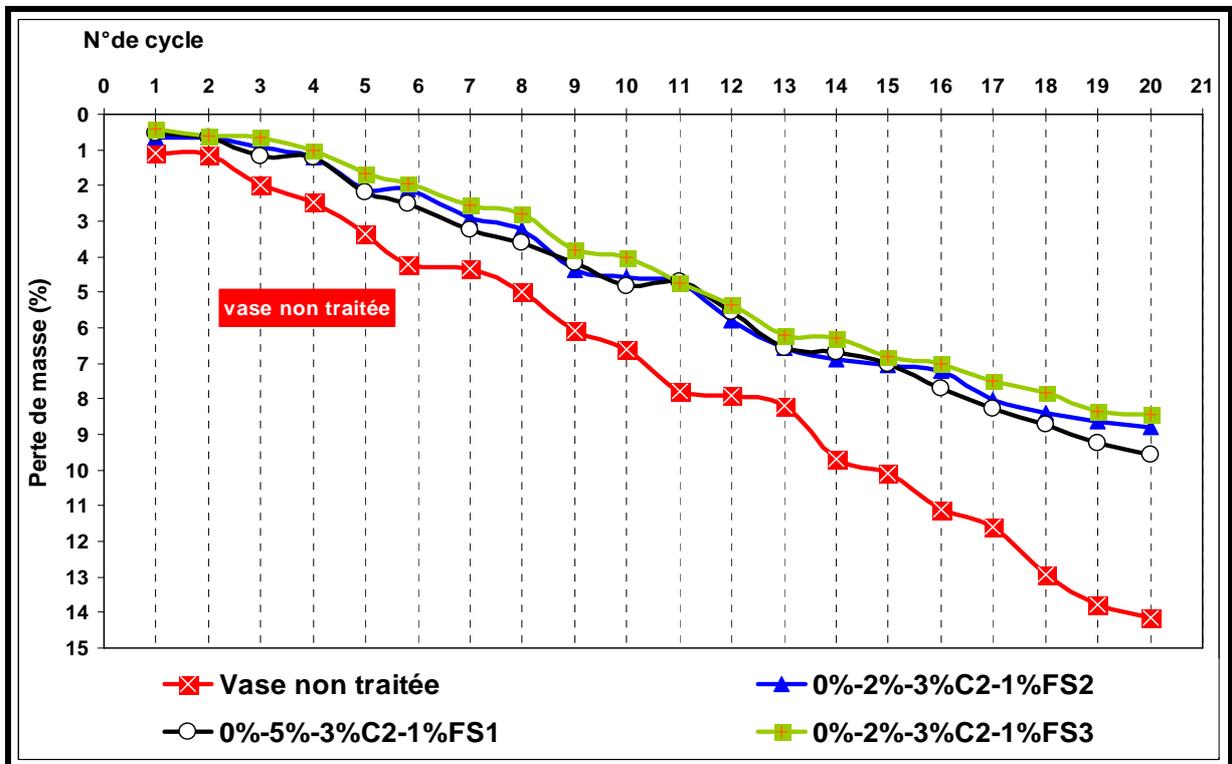


Figure 14 : Evolutions de la perte de masse des échantillons sans sable soumis à des cycles gel-dégel

Pour les échantillons des mélanges de vase non traitées des écailles (3^{ème} cycle) et des morceaux (6^{ème} cycle) se détachent. Les pertes de masse relatives varient linéairement en fonction du nombre de cycles pour atteindre une perte totale à la fin de l'essai d'environ 14%. Par contre, pour l'échantillon de référence 0-2-3C2-1FS3, des écailles (à partir du 9^{ème} cycle) et des morceaux (à partir du 13^{ème} cycle) apparaissent. Ces résultats montrent que les échantillons traités avec de la fumée de silice (sans sable) résistent mieux aux conditions de gel-dégel que l'échantillon non traité. Du point d'une résistance en compression simple, pour les échantillons sans sable (figure V-14), le mélange 0-2-3C2-1FS2 a obtenu la valeur la plus importante en compression simple. Mais dans cet essai, les résultats montrent que le mélange

0-2-3C2-1**FS3** se comporte mieux aux phases de gel-dégel que le mélange 0-2-3C2-1**FS1**.

5.1.2.1.2.b. Evolution de la résistance en compression simple

L'essai de gel-dégel est décrit par la norme NFP 98-234-1. Il permet de comparer la résistance en compression simple d'échantillons ayant subi des cycles de gel-dégel à celle des échantillons témoins du même âge. Nous avons effectué l'essai de gel-dégel sur 2 séries différentes. La première série permet une comparaison des résistances mécaniques en compression simple d'échantillons témoins âgés de 7 jours et ayant subi 21 cycles de gel-dégel avec des échantillons témoins du même âge et conservés à la température ambiante. La deuxième série permet une comparaison des résistances mécaniques en compression simple avec des échantillons témoins âgés de 28 jours et ayant subi 32 cycles de gel-dégel avec des échantillons témoins du même âge (60 jours) et conservés à la température ambiante

La figure **V-15** montre la réduction de la compression simple observée après 21 cycles de gel-dégel. Sur cette figure, une résistance est effectuée entre les échantillons témoins à 28 jours (conservés à l'air libre) et les échantillons à 7 jours (conservés à l'air libre) ayant subi 21 cycles de gel-dégel.

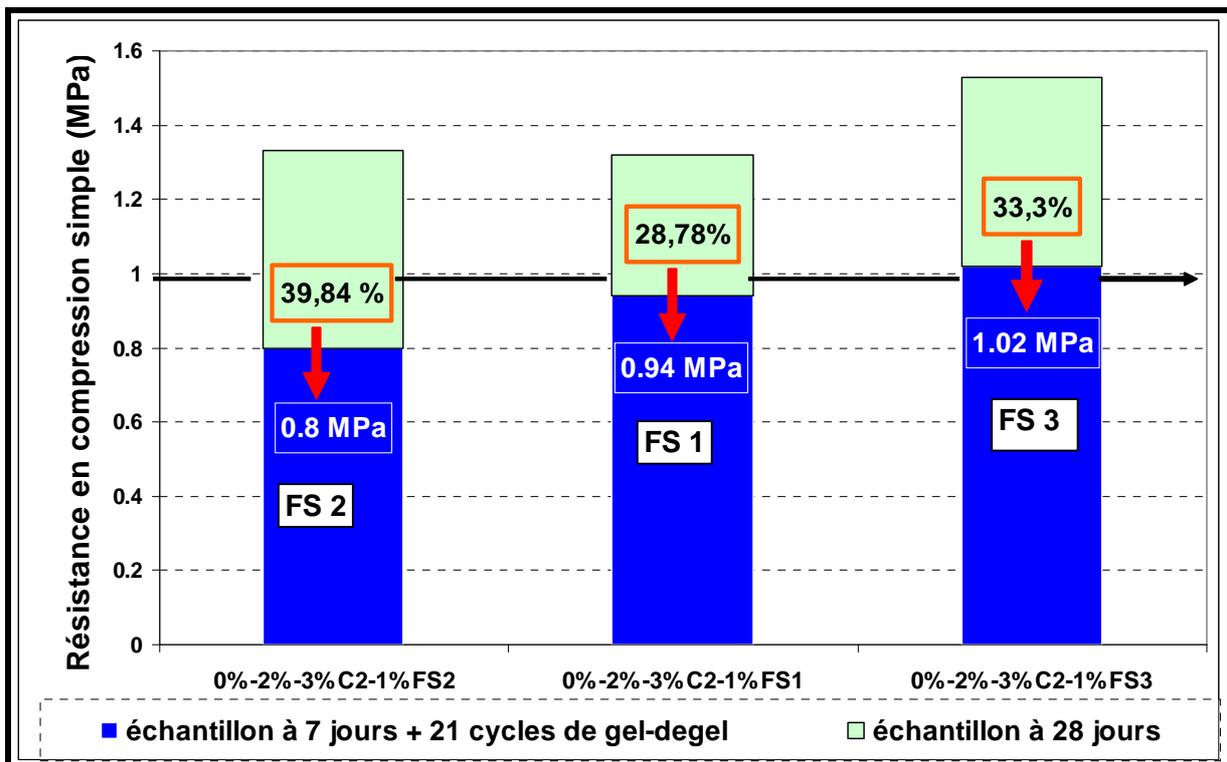


Figure V-15 : Evolution de la résistance en compression simple d'éprouvettes sans sable soumises à des cycles de gel-dégel (1^{ère} série)

Les résultats montrent que les échantillons sans sable, mais mélangés avec de la fumée de silice de type 3 (**FS3**) possèdent une meilleure résistance après 21 cycles de gel-dégel. Comme nous pouvons remarquer sur la figure V-15, la réduction de la résistance après 21 cycles de gel-dégel, dans le cas des échantillons avec la

fumée de silice type 1 montre une réduction à la compression simple d'environ 28,78% par rapport aux échantillons témoins à 28 jours. Par contre, dans le cas des échantillons avec de la fumée de silice de type 2 (FS2), la diminution de la résistance atteinte environ 33,3% soit 4,52% plus élevée par rapport aux échantillons avec de la fumée de silice type 1 (FS1). Mais si nous observons les résistances obtenus après 21 cycles de gel-dégel, seule les mélanges traités avec la fumée de silice type 3 (FS3) montre une valeur de la résistance en compression simple supérieure à 1 MPa, ce que permet de conclure que le traitement avec ce type de fumée de silice (FS3), peut être applicable pour des travaux routière

Les résultats obtenus pour l'essai de gel-dégel après 7 jours nous montrent que la fumée de silice de type 3 est plus réactive que les autres types. Nous estimons que les caractéristiques chimiques de la fumée de silice de type 3 (FS3) a'un effet positif en fournissant la résistance additionnelle.

La figure V-16 montre les résultats de comparaison entre l'échantillon témoin à 60 jours (conservé à l'air libre) et l'échantillon à 28 jours (conservé à l'air libre) et ayant subi 32 cycles de gel-dégel. Les résultats sont presque similaires. La comparaison présentent la même tendance que les résultats précédents, (figure V-15). L'échantillon avec la fumée de silice de type I montre une meilleure résistance après 32 cycles de gel-dégel. Les pourcentages de réduction sont moins importants aux valeurs précédentes (figure V-15).

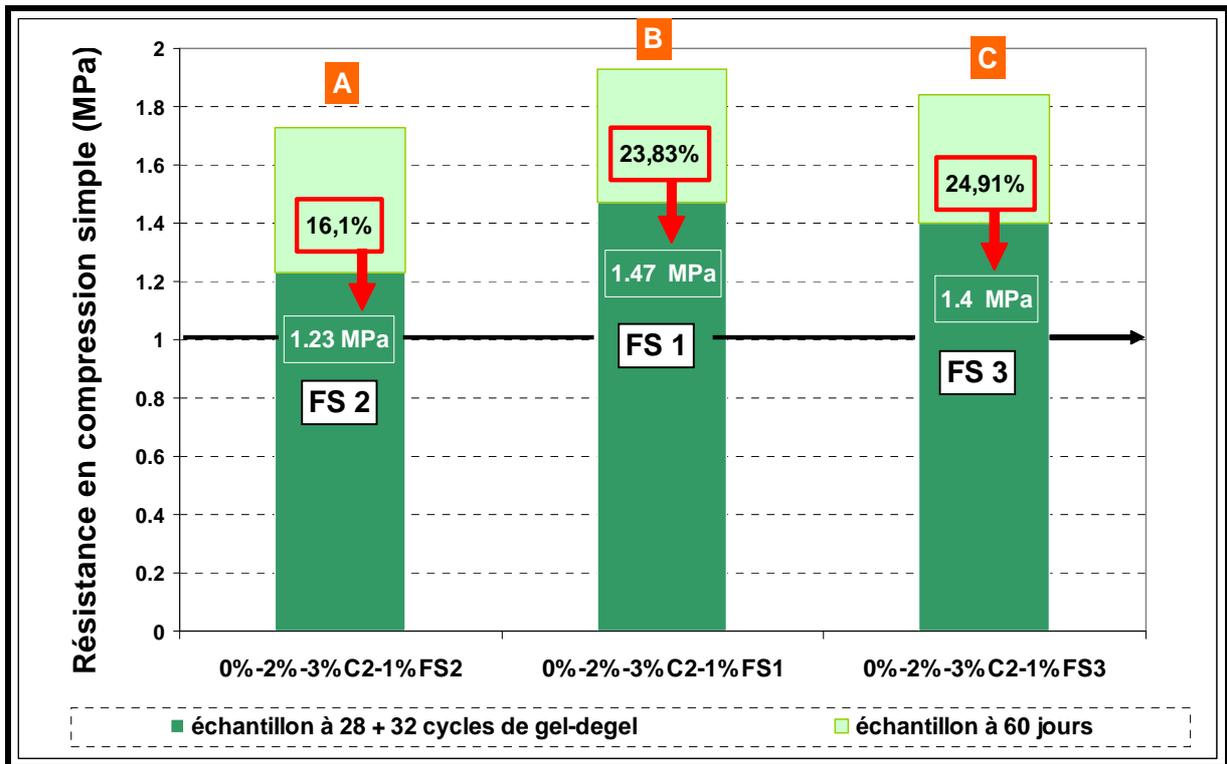


Figure V-16 : Evolution de la résistance en compression simple d'éprouvettes sans sable soumises à des cycles de gel-dégel (2^{ème} série)

L'échantillon avec la fumée de silice type 2 (FS2) présente une réduction de la résistance à la compression simple de l'ordre 16,1%. Le résultat précédent (après 7 jours à l'air libre) présente une réduction d'environ 39,84%, soit 23,74% d'amélioration de la résistance après avoir subi les cycles de gel-dégel. Les

échantillons avec de la fumée de silice de type 1 (FS1), après 28 jours à l'air libre et 32 cycles gel-dégel, la réduction est d'environ 23,83%. Par rapport aux résultats précédents (échantillons après 7 jours à l'air libre et 21 cycles gel-dégel), on obtient une diminution d'environ 4,95%, (figure V-16). En revanche, pour les mélanges traités avec la fumée de silice type 3 (FS3) après 28 jours à l'air libre et 32 cycles gel-dégel, la réduction de la résistance est d'environ 24,94%. Par rapport aux résultats précédents (échantillon après 7 jours à l'air libre et 21 cycles gel-dégel) l'amélioration de la résistance à la compression est de l'ordre 8,39%.

5.1.2.1.3. Résultats et analyse des essais de mouillage-séchage

Le but de ces essais est d'apprécier la durabilité des échantillons solidifiés lorsqu'ils sont soumis à des cycles répétés de mouillage/séchage. La méthodologie d'essai est tirée et modifiée du protocole d'évaluation proposé pour les déchets solidifiés à base de ciment. Nous avons effectué des essais de mouillage-séchage avec 2 séries différentes. La première série permet une comparaison des résistances mécaniques en compression simple d'échantillons témoins âgés de 7 jours et ayant subi 10 cycles de mouillage-séchage avec des échantillons témoins de même âge et conservés à la température ambiante. La deuxième série concernera la comparaison des résistances mécaniques en compression simple d'échantillons témoins âgés de 28 jours et ayant subi 18 cycles de mouillage-séchage avec des échantillons témoins de même âge (60 jours) et conservés à la température ambiante.

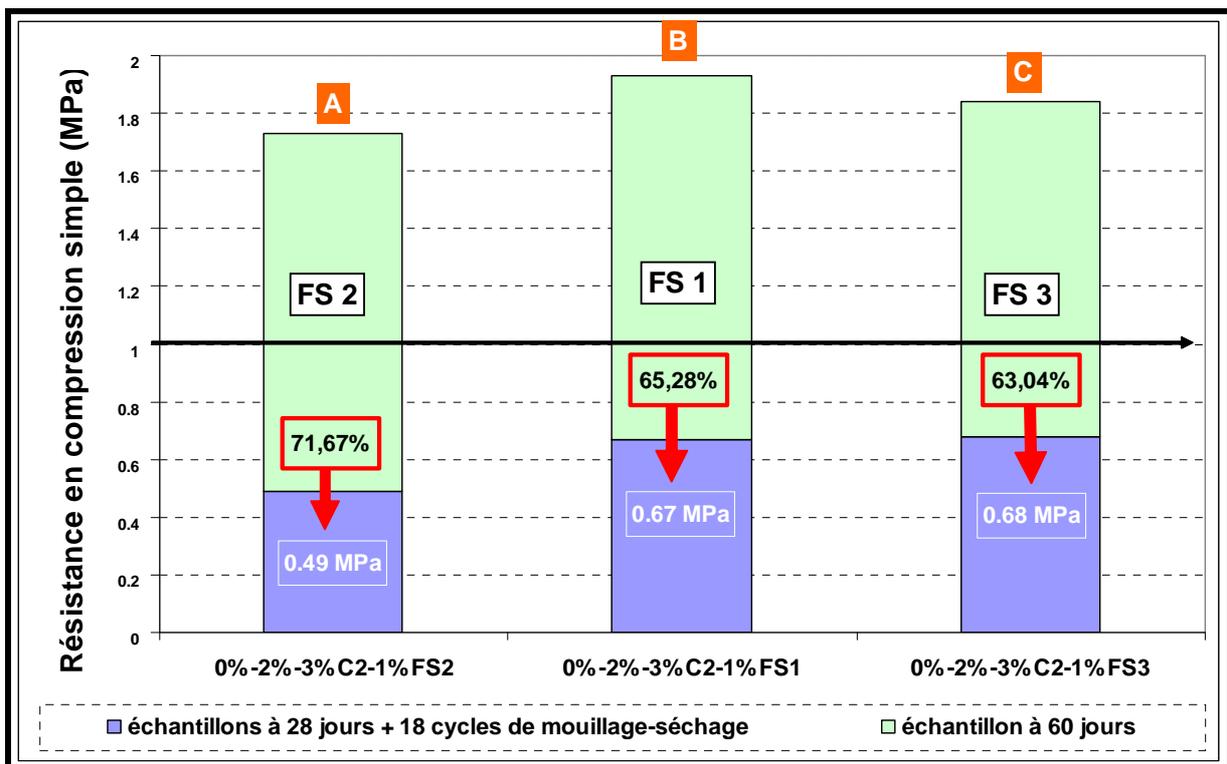


Figure V-17 : Evolution de la résistance en compression simple d'éprouvettes sans sable soumises à des cycles de mouillage-séchage (2^{ème} série)

Pour la première série des échantillons âgés de 7 jours et 10 cycles mouillage-séchage, les résultats à fournir ne sont pas présentés ici, parce que la plupart des échantillons ont été détériorés avant la fin d'essai (10^{ème} cycle). Nous estimons que la réaction pouzzolanique de la fumée de silice n'est pas maximale. A

l'âge de 7 jours, la résistance des éprouvettes a été fournie par l'hydratation du ciment, L'hydratation du ciment démarre automatiquement avec la présence de l'eau. L'addition de la fumée de silice, aide à remplir les espaces vides et diminue la porosité et de ce fait augmente la résistance. Cependant, pour obtenir une résistance maximale, le mélange avec l'ajout de la fumée de silice besoin plus de temps car la réaction pouzzolanique relative à la fumée de silice est activée par l'hydroxyde de calcium provenant de l'hydratation du clinker ou de la chaux. Les matériaux pouzzolaniques, contrairement aux matériaux hydrauliques, ont besoin d'être activés autrement que par simple ajout d'eau pour déclencher la formation de produits liants.

Les cendres volantes et la fumée de silice sont principalement composées d'oxydes de silicium et d'aluminium, mais leur teneur en oxydes de calcium très faible, ne permet pas, lorsqu'ils sont mélangés avec l'eau, d'élever le pH à des valeurs suffisantes pour permettre la dissolution des composés d'oxydes de silicium et d'aluminium pour former des chaînes de produits pouzzolaniques nommés C-S-H (Calcium Silicate Hydraté). La dissolution de composés d'oxydes de calcium et d'aluminium nécessite plus de temps. Ainsi, pour cette raison, l'éprouvette traitée avec de la fumée de silice n'est pas assez performance pour réussir à l'essai de mouillage/séchage à l'âge de 7 jours.

Quant à l'échantillon âgé de 28 jours et soumis aux 18 cycles de mouillage-séchage les résultats sont présentés sur la figure V-17. Avec un pourcentage de perte de la résistance de 63,04%. La résistance d'éprouvette à 60 jours conservés à la température ambiante, l'éprouvette avec de la fumée de silice de type 3 montre une meilleure résistance aux cycles de mouillage-séchage. De plus, la résistance de 0,68 Mpa obtenue après 16 cycles de mouillage-séchage est supérieure à celles des autres échantillons.

L'éprouvette traitée avec la fumée de silice 1 (**FS1**) montre une résistance presque similaire que l'éprouvette traité avec la fumée de silice 3, avec une valeur de 0,6 MPa. Par contre, pour les éprouvettes avec de la fumée de silice de type 2, le pourcentage de perte de résistance est la plus importante (71,6%), avec une résistance de 0,49 MPa. Selon ces résultats, nous pouvons conclure que la fumée de silice de type 3 présente une moindre perte de résistance aux cycles de mouillage séchage par rapport aux autres types de fumées de silice.

Ces résultats montre également que les résistances obtenues de tous mélanges sont inférieures à 1 MPa, ce qui signifie que la performance mécanique des éprouvettes n'est pas suffisante pour une application en travaux routiers.

5.1.2.2. Traitement avec ajout de 5% de sable

5.1.2.2.1. Résultats et analyse des essais de résistance en compression simple

L'évolution de la résistance en compression simple avec un ajout de 5% de sable est donnée sur la figure V-18. Nous pouvons observer que les résistances en compression simple obtenues pour tous les mélanges traités après 28 jours sont supérieures à 1 MPa, ce qui signifie que, le mélange utilisé serait satisfaisant pour être appliqué en travaux routiers. Les résultats montrent également que l'augmentation de la résistance des mélanges traités avec FS3 est plus importante

que les autres. Cette augmentation peut être vérifiée depuis l'évolution de performances mécaniques des les jeunes âges, i.e. à 7 jours. Sur cette figure nous pouvons constater que les résistances aux jeunes âges peuvent être classées dans 3, premièrement, le mélange pour le sédiment (voir A1 sur la figure V-18) ensuite les mélanges traités avec **FS1** et **FS2** (voir A2 sur la figure V-18), et le mélange traité avec FS1 (voir A3 sur la figure V-18).

L'augmentation des résistances aux jeunes âges est attribuée à la rapide hydratation du ciment ainsi théoriquement en augmentant le pourcentage du ciment nous augmentons la performance mécanique du mélange aux jeunes âges. Donc nous pouvons constater que l'addition de fumée **FS3** donne un effet positif sur l'hydratation du ciment, cet effet dû à **FS3** est bien meilleur que pour les autres types de fumées de silice. Nous estimons que cet effet positif de **FS3** ne provient pas de sa granulométrie. Nous rappelons que la fumée de silice de type 1 (**FS1**) contient des particules fines avec pourcentages plus importants que la fumée de silice type 3 (**FS3**). Des autres travaux précédents on a vérifié que la finesse est une importante caractéristique des fumées de silice par rapport à la réaction pouzzolanique. En effet elle permet aux particules des fumées de silice d'être absorbées par celles du ciment et d'empêcher celui-ci de flocculer. De plus, les micro-particules de fumée de silice peuvent diminuer l'espace vide entre les particules du ciment. Contrairement à cette théorie, nous constatons que la caractéristique des fumées de silice fourni un effet positif en fonction de la finesse de sa granulométrie.

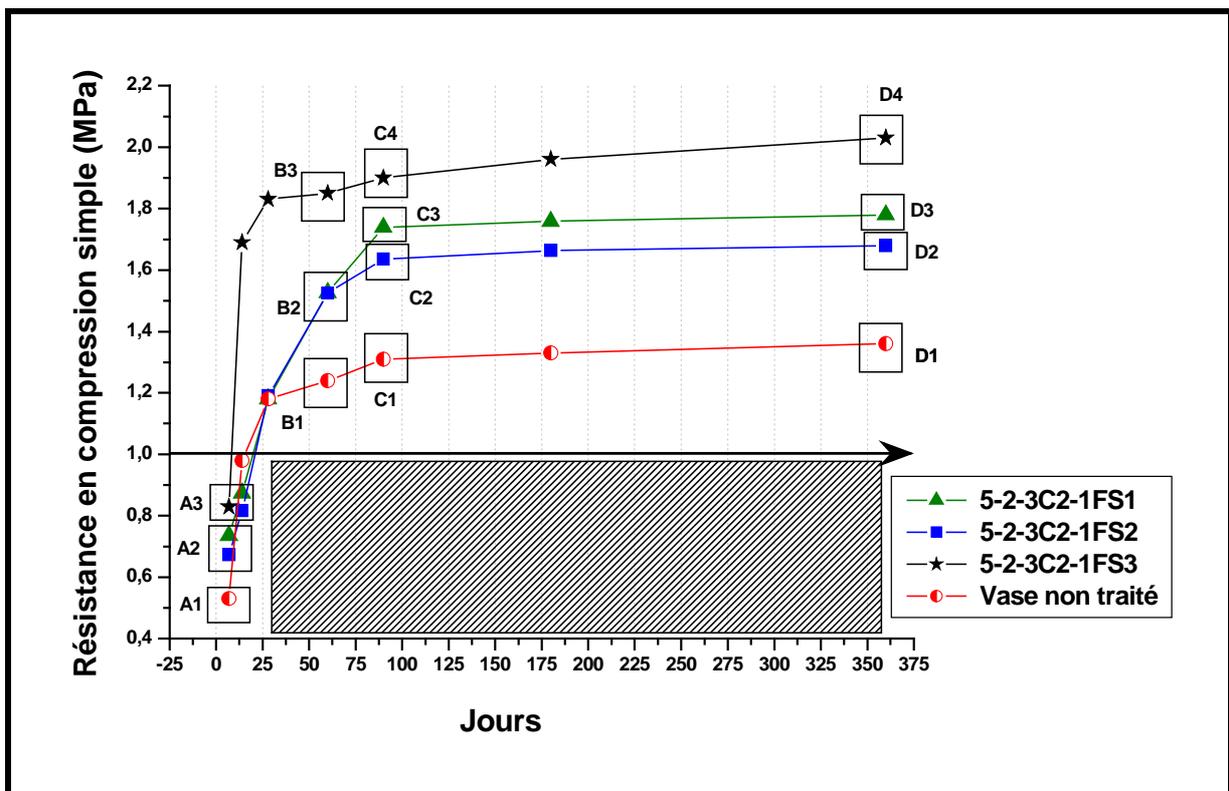


Figure V-18 : Evolution de Rc pour le sédiment traité avec différents types de fumée de silice avec un ajout de 5% de sable

La résistance du mélange traité avec FS3 est toujours supérieure, quel que soit l'âge, même à long terme (voir C4 et D4 sur la figure V-18) avec une valeur de résistance à 360 jours de 2,03 MPa (voir tableau V-6) soit 33% d'augmentation de la

résistance par rapport aux mélanges sans traitement (vase non traitée). Pour les mélanges traités avec **FS1** et **FS2** (voir D3 et D2), les valeurs d'augmentation de la résistance sont de 23,59% (**FS1**) et 19% (**FS2**) par rapport au mélange sans traitement (vase non traitée)

Tableau V-8 : Performances mécaniques obtenues sur le sédiment traité à deux différents types de fumées de silices avec l'ajout de 5 de sable.

Formulation	Jours						
	7	14	28	60	90	180	360
Vase non traité	0.53	0.98	1.18	1.24	1.31	1.33	1.36
0%sab-2%cim-3%chx(C2)-1%FS1	0.82	0.89	1.325	1.93	2.18	2.24	2.27
0%sab-2%cim-3%chx(C2)-1%FS2	0.70	0.87	1.33	1.73	1.83	1.95	1.92
0%sab-2%cim-3%chx(C2)-1%FS3	0.83	0.98	1.53	1.84	1.91	2.00	2.04
5%sab-2%cim-3%chx(C2)-1%FS1	0.73	0.87	1.18	1.52	1.73	1.759	1.78
5%sab-2%cim-3%chx(C2)-1%FS2	0.67	0.81	1.19	1.52	1.63	1.66	1.68
5%sab-2%cim-3%chx(C2)-1%FS3	0.83	1.69	1.83	1.85	1.9	1.96	2.03

Le tableau V-8 rassemble tous les résultats obtenus sur les mélanges sans et avec ajout de sable (5%). Nous constatons qu'un ajout de 5% de sable pour le mélange traité avec de la fumée de silice type 1 (**FS1**) réduit la résistance en période de jeunes âges à long terme. La valeur de cette réduction de la résistance à 360 jours est environ 12,31%. Pour le mélange traité avec de la fumée de silice type 2 (**FS2**), la réduction de la résistance à 360 jours, qui se produit également est d'environ 12,5%. Par contre, pour le mélange traité avec fumée de silice type 3 (**FS3**), la réduction de la résistance à 360 jours est négligeable (0,4%), mais nous pouvons constater que l'ajout de 5% de sable fournit une augmentation de la résistance aux jeunes âges (14 jours) jusqu'à l'âge 28 jours. Ces résultats peuvent être liés à la caractéristique du sable utilisé, qui perturbe la réaction pouzzolanique de la fumée de silice qui donne une résistance additionnelle à l'éprouvette. Cette perturbation a un effet moins important sur la résistance du mélange traité avec **FS3**.

5.1.2.2.2. Résultats et analyse des essais de gel-dégel

5.1.2.2.2.a. Evolution de la perte de masse

Pour la série d'échantillons avec de 5% de sable, la différence de perte de masse entre le mélange de sédiment non traité et les mélanges traités, est plus faible si l'on considère la série de mélange sans sable.

Sur la figure V-19, nous pouvons remarquer que la différence de la perte de masse entre le mélange de sédiment non traité et les mélangés traités avec de la fumée de silice est d'environ 3%. Donc nous pouvons dire que l'addition de 5% de sable réduit la perte de masse des éprouvettes pendant les cycles de gel-dégel. Cette possibilité d'augmentation de perte de masse peut être attribuée à la taille des grains de sable qui est largement plus importante que des liants, ce qui provoque une augmentation de la porosité par rapport la série précédente (avec 0% de sable).

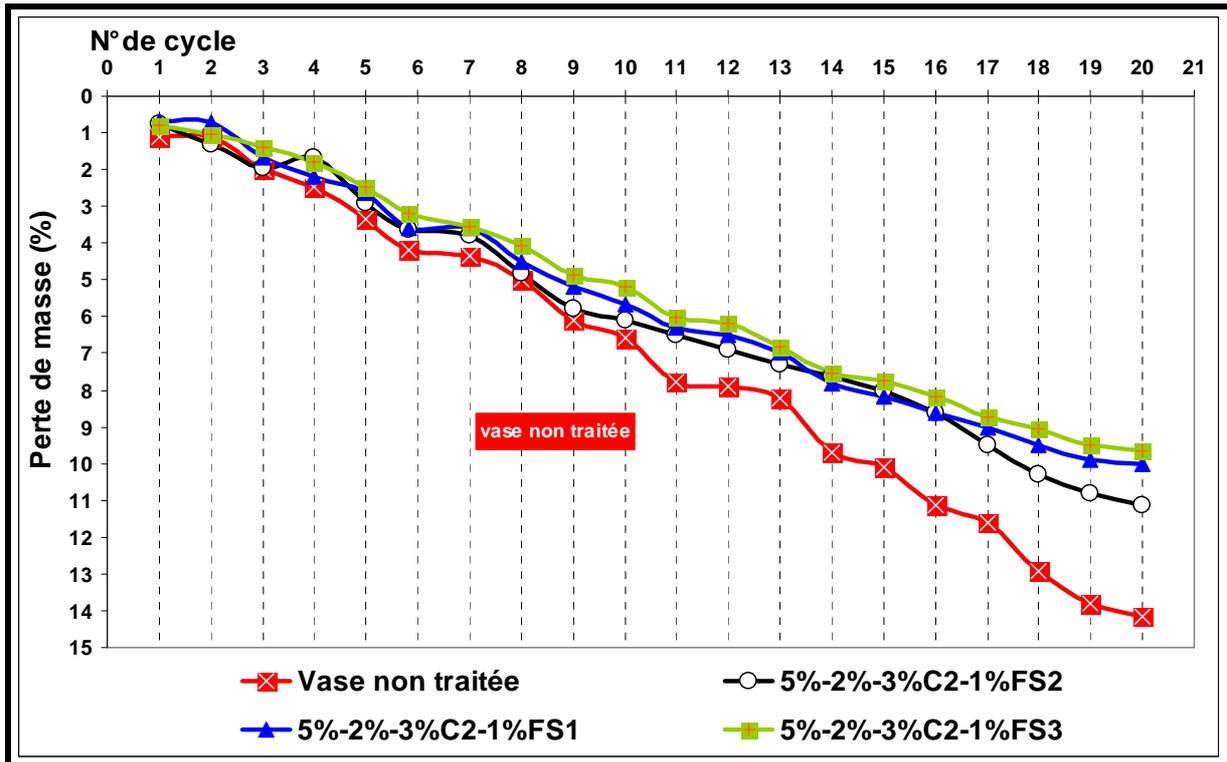


Figure V-19 : Evolution de la perte de masse des échantillons soumis à des cycles gel-dégel avec 5% de sable

5.1.2.2.2.b. Evolution de la perte de résistance en compression simple

Nous rappelons que l'essai de gel-dégel a été effectué sur 2 séries différentes. La première série permet une comparaison des résistances mécaniques en compression simple d'échantillons témoins âgés de 7 jours et ayant subi 21 cycles de gel-dégel avec des échantillons témoins de même âge et conservés à la température ambiante. La deuxième série établie une comparaison des résistances mécaniques en compression simple avec des échantillons témoins âgés de 28 jours et ayant subi 32 cycles de gel-dégel avec des échantillons témoins de même âge (60 jours) conservés à la température ambiante.

La figure V-20 montre une réduction des résistances en compression simple des éprouvettes témoins âgés de 7 jours et ayant subi 21 cycles de gel-dégel par rapport aux éprouvettes témoins de même âge (28 jours) conservés à la température ambiante.

Au niveau de pourcentage de réduction de résistance, le mélange traité avec **FS1** présente le plus faible pourcentage de réduction (9,32%). Après avoir subi 21 cycles de gel-dégel, le mélange traité avec **FS3** offre la meilleure résistance (1,38 MPa). Pour les deux mélanges traités avec **FS1** et **FS2** (1,07 et 1,02 MPa), les résistances montrent une différence assez faible. Ces résultats sont comparables à ceux des essais de résistance en compression simple. Ces résultats d'essai gel-dégel avec 5% de sable montrent une augmentation de la résistance après les cycles de gel-dégel.

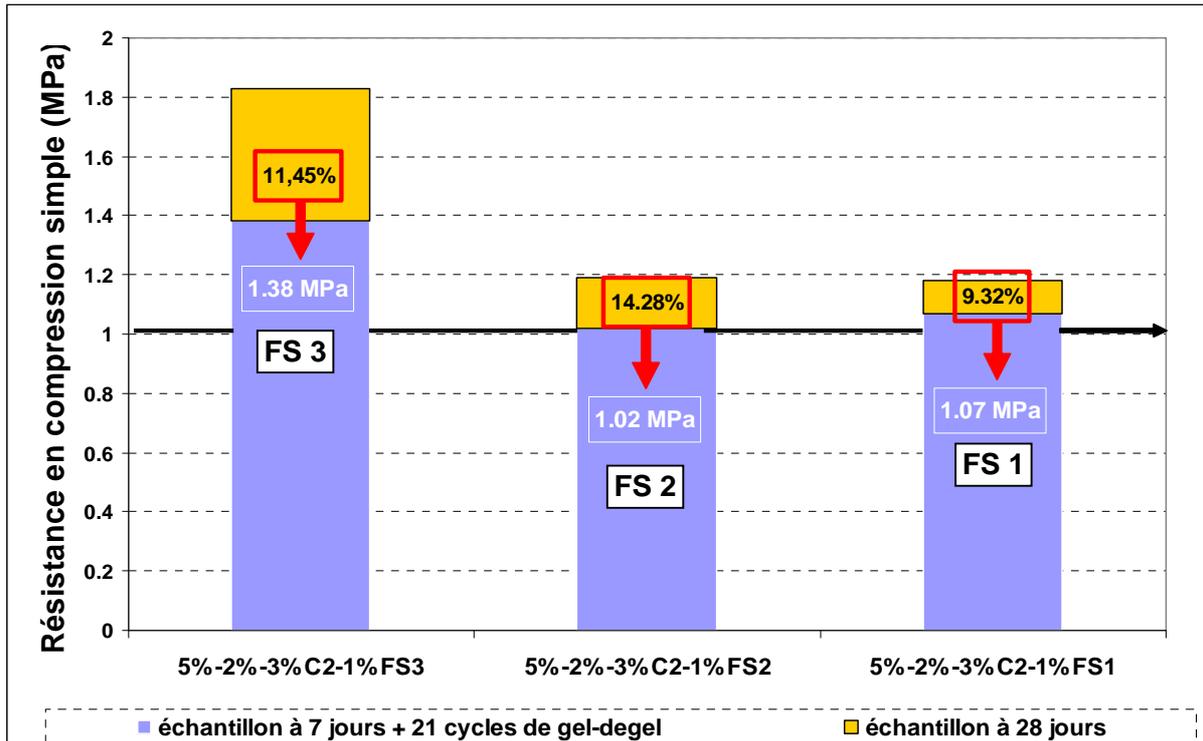


Figure V-20 : Evolutions des résistances en compression simple d'éprouvettes soumises à des cycles de mouillage-séchage avec ajout de 5% de sable (1^{ère} série).

Les résistances des éprouvettes sans ajout de sable ne dépassent pas une valeur de 1 MPa. Contrairement aux résultats précédents, les résultats de l'ensemble des éprouvettes avec un ajout de 5% de sable les résistances à la compression simple sont supérieures à 1 MPa. Ces résultats nous montrent que l'ajout de 5% de sable a un effet positif sur la résistance en conditions extrêmes (cycle de gel-dégel). Le rôle de l'ajout de 5% de sable est celui d'un correcteur granulométrique sur l'essai de gel-dégel a un effet important

Les résultats des essais gel-dégel sont présentés sur figure V-21. Il s'agit d'une comparaison des résistances mécaniques en compression simple avec des échantillons témoins âgés de 28 jours et ayant subi 32 cycles de gel-dégel avec des échantillons témoins du même âge (60 jours) conservés à la température ambiante série 2. Nous pouvons constater que les résultats des essais de gel-dégel sont semblables aux résultats de la série 1. Le mélange traité avec la fumée de silice type 1 (**FS1**) possède un pourcentage minimum de réduction de l'ordre 10,52%. Au niveau de la résistance obtenue, le mélange traité avec **FS3** présente la meilleure résistance à la compression simple qui atteint d'environ 1,63MPa.

Nous constatons également que les valeurs des résistances des mélanges dans cette série 2 sont supérieures à celles de la série 1. Si l'on compare les séries de mélange traité avec de la fumée de silice type 3 (**FS3**) on constate une augmentation de 15,33% de la résistance (soumis aux phases gel-dégel) par rapport celle de série 1, pour le mélange traité avec **FS2**, où la valeur d'augmentation est 21,32%, et 19,68% d'augmentation de la résistance pour le mélanges traité avec **FS1**. L'âge des éprouvettes avant d'être soumises aux cycle des gel-dégel est la cause de cette augmentation de résistance.

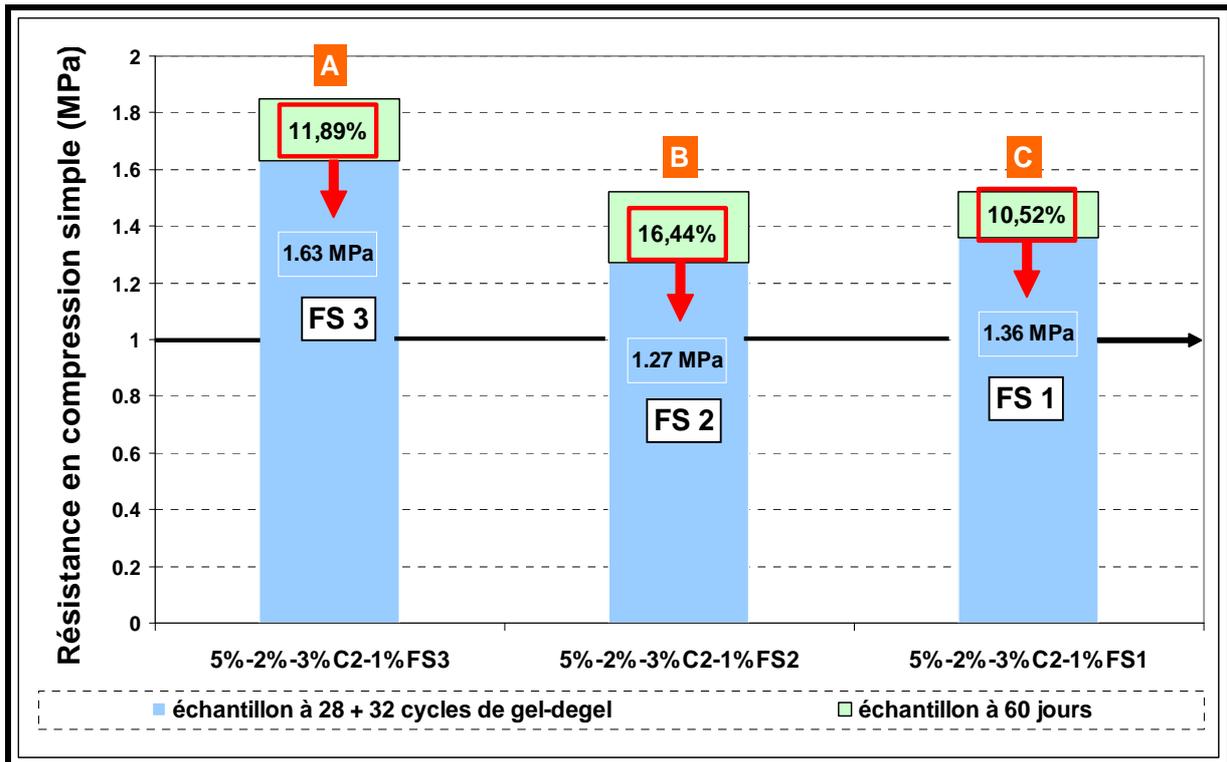


Figure V-21: Evolution de la résistance en compression simple des éprouvettes soumises à des cycles de gel-dégel avec ajout de 5% de sable (2^{ème} série)

En effet dans la série 1, l'éprouvette est mise à l'air libre pendant 7 jours avant d'être soumise aux cycles de gel-dégel, mais, pour la série 2, nous avons laissé l'éprouvette pendant 28 jours. Donc, les éprouvettes de la série 2, ont un temps de maturation plus longue pour les réactions des liants (hydratation du ciment/chaux et réaction pouzzolanique de la fumée de silice) ce qui fournit une résistance plus importante. Une fois les éprouvettes soumises aux cycles de gel-dégel, les réactions de liants sont perturbées.

5.1.2.2.3. Résultats et analyse des essais de mouillage-séchage

Nous avons aussi effectué des essais de mouillage-séchage sur 2 séries différentes. La première série permet une comparaison des résistances mécaniques en compression simple d'échantillons témoins âgés de 7 jours et ayant subi 10 cycles de mouillage-séchage avec des échantillons témoins de même âge et conservés à la température ambiante. La mesure de la résistance pour la première série n'a pas pu être effectuée, parce que les éprouvettes sont détériorées. Pour la deuxième série, elle concerne une comparaison des résistances mécaniques en compression simple d'échantillons témoins âgés de 28 jours et ayant subi 18 cycles (36 jours) de mouillage-séchage avec des échantillons témoins de même âge (60 jours) et conservés à la température ambiante, les résultats sont présentés sur la figure V-22.

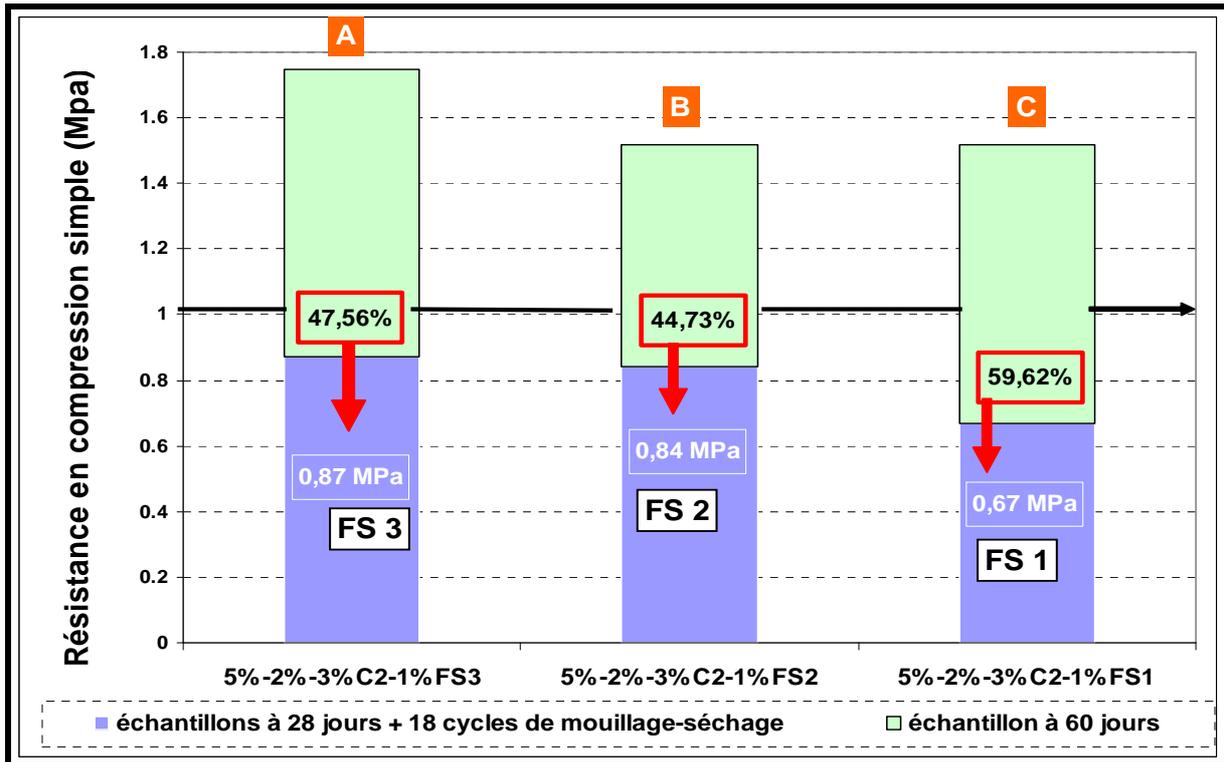


Figure V-22 : Evolution de la résistance en compression simple d'éprouvettes soumises à des cycles de mouillage-séchage sans l'ajout de sable (2^{ème} série)

La figure V-22 illustre les résultats de la deuxième série des essais de mouillage-séchage. Considérant les résultats précédents pour l'essai de gel-dégel, les résultats de mouillage-séchage montre que le mélange traité avec de la fumée de silice type 2 (**FS2**) offre une meilleure résistance au phénomène de mouillage-séchage (réduction du 4,73%) après être soumis aux cycles de mouillage-séchage.

Nous estimons que la formule de ce mélange (avec 5% de sable) est la meilleur formule pour la fumée de silice type 2(**FS2**) Par contre, la meilleure résistance obtenue après être soumis les mouillage-séchage, et celle du mélange traité avec **FS3** avec (0,87 MPa). Nous pouvons également remarquer que l'ajout de 5% de sable provoque une augmentation assez importante des résistances aux cycles de mouillage-séchage par rapport aux mélangés sans ajout de sable (voir tableau V-8). L'ajout de 5% de sable donne environ 21,83% d'augmentation de la résistance aux cycles de mouillage-séchage pour le mélange traité avec **FS3**. Ces valeurs d'augmentation pour le mélange traité avec **FS2** de 41,66%, est de 0% pour le mélange traité avec **FS1**. Ces résultats peuvent confirmer que l'ajout de 5% sable fournit une augmentation de la résistance aux cycles de mouillage-séchage très importante pour le mélange traité avec fumée de silice type 2 (**FS2**). Malheureusement, pour ces mélanges, aucune résistance n'atteint le niveau requis de 1 MPa en compression simple pour satisfaire critère de traficabilité. La sensibilité à l'eau des mélanges est toujours élevée malgré l'ajout de 5 % de sable.

5.1.2.3. Traitement avec l'ajoute de 15% de sable

5.1.2.3.1. Résultats et analyse des essais de la résistance en compression simple

Un ajout de 15% de sable a été effectué pour vérifier le comportement mécanique des mélanges. La figure V-23 montre l'évolution des résistances en compression simple en fonction du temps.

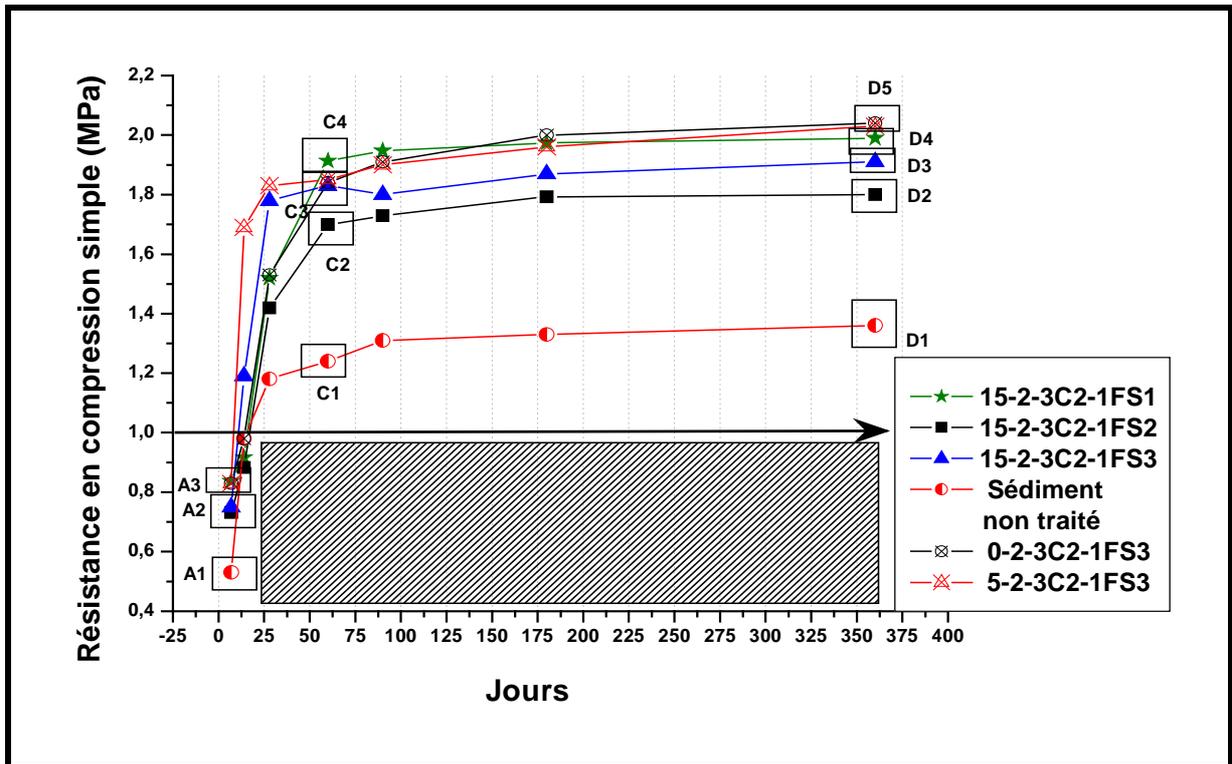


Figure V-23 : Evolution des résistances pour le sédiment traité aux différents types de fumée de silice avec un ajout de 15% de sable.

L'évolution de la résistance à 7 jours montre que tous les mélanges ont une valeur presque identique (0,78-0,83 voir A2 sur la figure V-23). A 14 jours, le mélange traité avec **FS3** affiche une valeur supérieure (1,19 MPa) par rapport aux autres (voir le tableau V-9). Ces résultats prouvent encore une fois la fumée de silice de type 3 (**FS3**) a une réactivité assez importante qui permet de fournir une résistance additionnelle au mélange. Les résistances à 28 jours pour tous les mélanges traités avec la fumée de silice dépassent 1 MPa.

L'évolution des résistances à 60 jours montre une tendance identique à celle des mélanges sans ajout de sable (voir C3 sur la figure V-5). Nous pouvons voir sur le tableau V-9 que la résistance du mélange traité avec **FS1** donne une valeur supérieure (1,93 MPa) par rapport aux autres. La figure V-23 montre également que c'est le mélange traité avec de fumée de silice Type 2 (**FS2**) qui fournit la plus faible valeur de résistance entre tous les mélanges (voir C2 sur la figure V-23).

Parmi les mélanges traités avec 15% de sable nous pouvons constater que l'évolution de la résistance à long terme (360 jours), pour le mélange traité avec FS2 constitue la meilleure composition comparée aux autres mélanges (voir D2, D3 et D4 sur la figure V-23),

Tableau V-9 : Résistances mécaniques obtenues sur le sédiment traité aux deux différentes types de fumée de silice avec un ajout de 15% de sable

Formulation	Jours						
	7	14	28	60	90	180	360
Sédiment non traitée	0.53	0.98	1.18	1.24	1.31	1.33	1.36
0%sab-2%cim-3%chx(C2)-1%FS3	0.83	0.98	1.53	1.84	1.91	2	2.04
5%sab-2%cim-3%chx(C2)-1%FS3	0.83	1.69	1.83	1.85	1.9	1.96	2.03
15%sab-2%cim-3%chx(C2)-1%FS1	0.8379	0.9163	1.52	1.913	1.947	1.974	1.99
15%sab-2%cim-3%chx(C2)-1%FS2	0.7313	0.8835	1.418	1.698	1.7293	1.793	1.8
15%sab-2%cim-3%chx(C2)-1%FS3	0.75	1.19	1.78	1.83	1.8	1.87	1.91

Une comparaison de la résistance entre les mélanges traités sans sable, avec 5% et 15% de sable est également présentée sur la figure V-23 et donnée dans tableau V-9. C'est le mélange traité avec **FS3** sans sable (0%sab-2%cim-3%chx (C2)-1%**FS3**) et avec 5% de sable, (5%sab-2%cim-3%chx (C2)-1%**FS3**) qui ont été retenus parce que ces deux mélanges sont considéré comme étant les meilleurs mélanges. En effet, l'ajout de 15% de sable montre une diminution de la résistance depuis l'âge de 7 jours jusqu'à 360 jours, excepté à l'âge 60 jours où le mélange traité avec **FS3** et 15% de sable donne une valeur de résistance presque identique par rapport aux mélanges avec 5% de sable et sans un ajout de sable (voir C3 sur la figure V-23)

L'effet d'un ajout de 15% de sable diminue la résistance à long terme d'environ 6,40% par rapport aux mélanges sans sable et avec 5% de sable (voir D5 et D3 sur la figure V-23, voir tableau V-9).

5.1.2.3.2. Résultats et analyse des essais de gel-dégel

5.1.2.3.2.a. Evolution de la perte de masse

Pour les ajouts avec 15% de sable, la résistance aux cycles de gel-dégel des mélanges traités avec des liants montre une diminution assez importante par rapport aux éprouvettes sans sable. Comme sur la figure V-24, une diminution de perte de masse se produit depuis la 1^{er} cycle d'essai de gel-dégel, où le pourcentage de la perte de masse des mélanges traités (15-2-3C2-1**FS1**, 15-2-3C2-1**FS2**, 15-2-3C2-1**FS3**) atteint des valeurs comprises entre 10 et 12,3 MPa soit environ 2,2 % de différence de perte de masse par rapport aux mélanges de sédiment non traité.

Pour les mélanges traités avec de la fumée de silice, des écailles (3^{ème} cycle) et des morceaux (5^{ème} cycle) se détachent rapidement. Avec les résultats obtenus, si on peut considérer que l'addition de liant (spécialement la fumée de silice) diminue la porosité d'échantillon grâce à leur finesse, mais l'ajout de sable augmente la porosité d'éprouvette, ce qui nous explique la perte de la masse des éprouvettes avec les cycles gel-dégel.

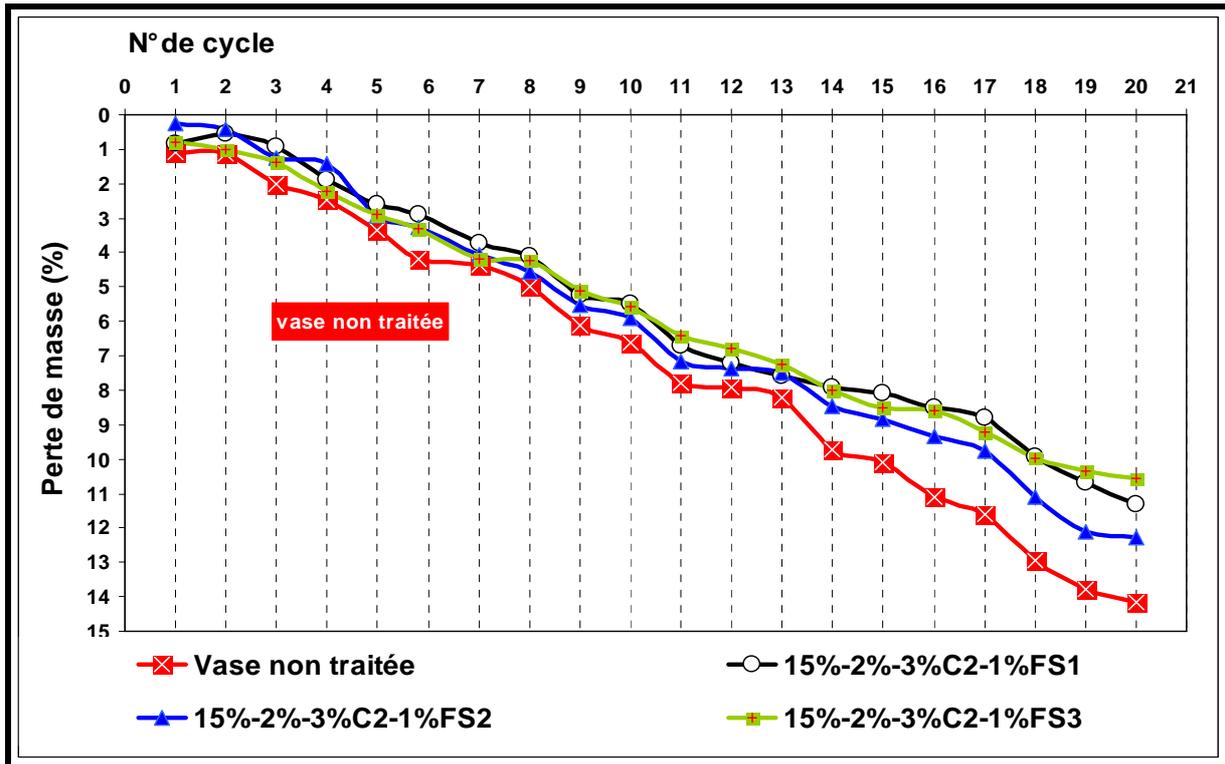


Figure 24 : Courbes d'évolution de la perte de masse des échantillons soumis à des cycles gel-dégel avec 15% de sables

5.1.2.3.2.b. Evolution de la résistance en compression simple

La figure V-25 montre les résultats obtenus pour la première série d'essai de gel-dégel. Cette série constitue une comparaison des résistances mécaniques en compression simple d'échantillons témoins âgés de 7 jours et ayant subi 21 cycles de gel-dégel avec des échantillons témoins de même âge et conservés à la température ambiante.

Les résultats de cette première série permet d'observer que le mélange traité avec fumée de silice type 3 (**FS3**) offre la meilleure valeur de résistance après l'essai de gel-dégel a été effectué (voir A sur la figure V-25). Le pourcentage de diminution de la résistance mécanique après les cycles gel-dégel pour le mélange traité avec **FS1** montre une diminution assez faible par rapport aux autres. Ces résultats permettent d'identifier que pour l'échantillon avec de 15% de sable et traité avec **FS3** (voir A sur la figure V-25), on observe une diminution assez importante de la résistance aux cycles de gel-dégel de l'ordre 25,28% par rapport à la résistance d'éprouvettes témoins.

Nous pouvons également remarquer que l'ajout de 15% de sable a un effet positif assez important sur le mélange traité avec **FS1**. L'augmentation de la résistance aux cycles de gel-dégel évolue de 15,07% par rapport au mélange avec 5% de sable (voir figure 22). L'effet d'un ajout de 15% de sable sur l'augmentation de la résistance aux cycles gel-dégel pour le mélange traité avec **FS2** fournit une valeur supérieure de l'ordre de 4,67%. Par contre, pour le mélange traité, **FS3**, l'effet d'ajout de 15% de sable montre une légère diminution d'environ 3,62% par rapport au mélange avec 5% de sable (voir figure 22)

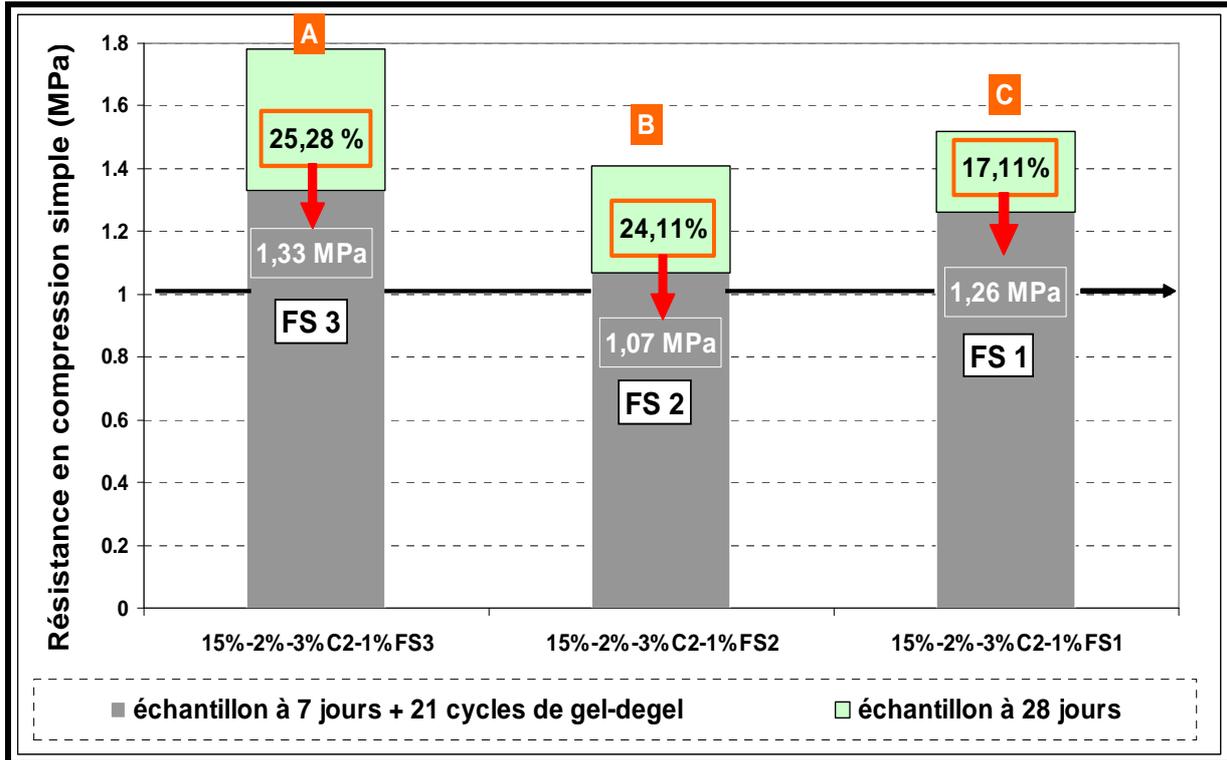


Figure V-25 : Evolution de la résistance en compression simple d'éprouvettes soumises à des cycles de gel-dégel avec un ajout de 15% de sable (1^{ère} série)

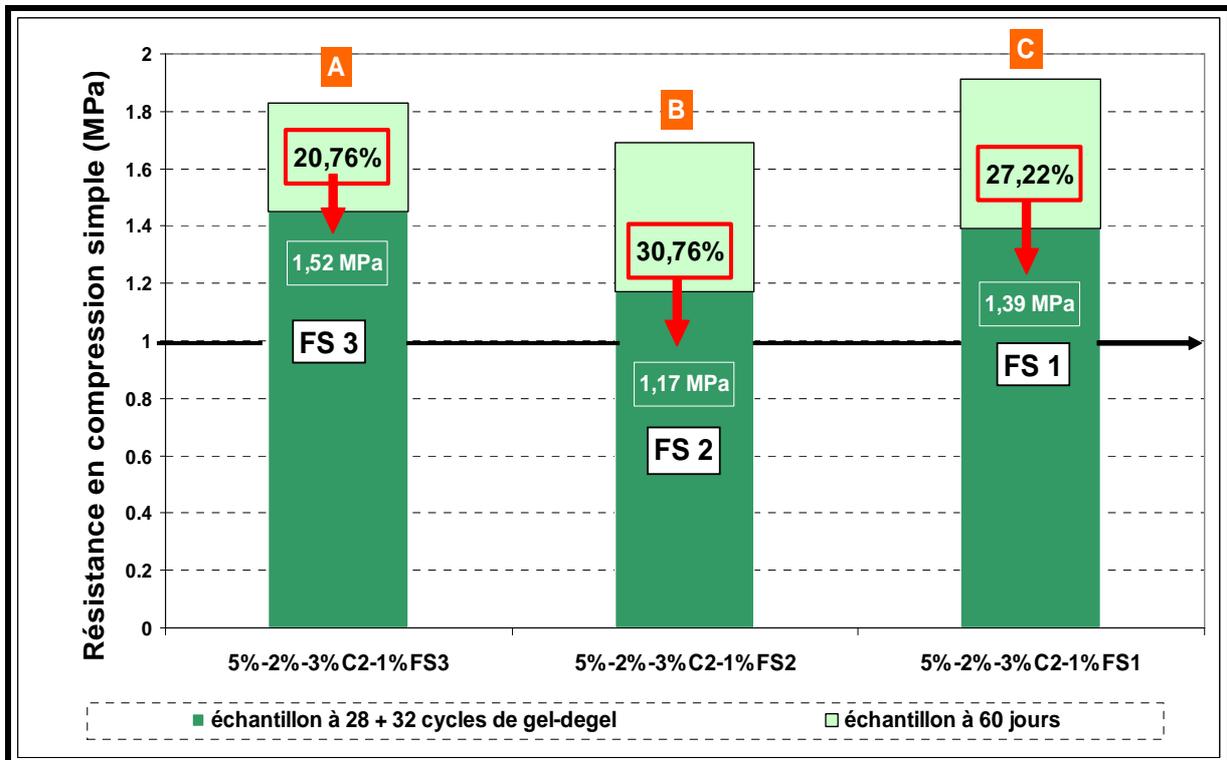


Figure V-26 : Evolution de la résistance en compression simple d'éprouvettes soumises à des cycles de gel-dégel avec un ajout de 15% de sable (2^{ème} série)

Sur la figure V-26, les résultats des essais relatifs aux cycles de gel-dégel sont présentés. Par rapport aux résultats précédents (1^{ère} série, voir figure 25), tous les

résultats montrent une augmentation de résistance, cette augmentation a une valeur de 12,5% pour le mélange traité avec **FS3** 8,5% d'augmentation pour le mélange traité avec fumée de silice type 2 (FS2), et de 9,35% pour le mélange traité fumée de silice type 1(**FS1**). La raison de cette augmentation de résistance a déjà été présentée. L'âge des éprouvettes, avant les cycles de gel-dégel permet la réaction de pouzzolanique de la fumée de silice qui fournit une résistance additionnelle. L'effet d'un ajout de 15% de sable pour l'éprouvette du mélange traité avec **FS3** montre une résistance aux cycles de gel-dégel bien supérieure (voir A sur la figure V-26) aux autres mélanges. Ces résultats sont identiques aux résultats avec un ajout de 5% de sable.

5.1.2.3.2.c. Résultats et analyse des essais de mouillage-séchage

Les résultats de la mesure de résistance pour la première série n'a pas pu être déterminée car tous les éprouvettes sont complètement détériorées en fin de cycles de l'essai de mouillage-séchage.

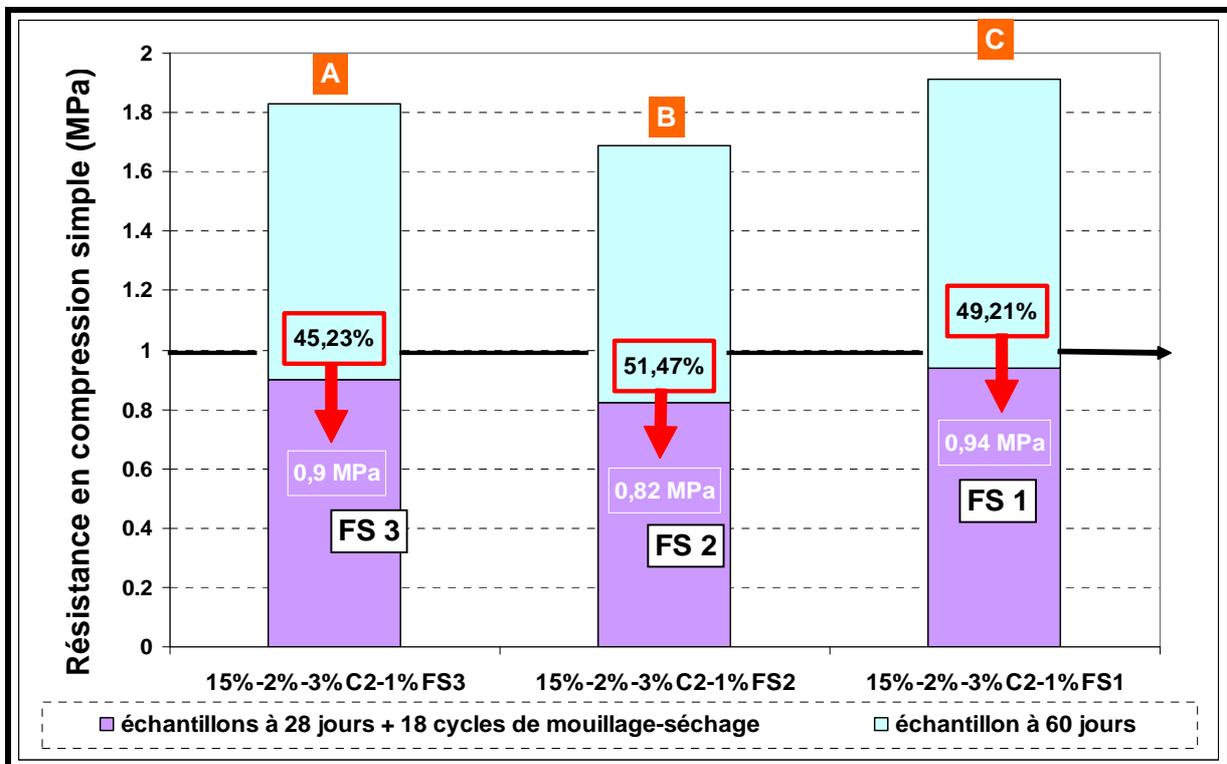


Figure V-27 : Evolution de la résistance en compression simple d'éprouvettes soumises à des cycles de mouillage-séchage sans ajout de sable (2^{ème} série)

Les résultats de la deuxième série ont permis une comparaison des résistances mécaniques en compression simple des échantillons témoins âgés de 28 jours et ayant subi 18 cycles de mouillage-séchage (36 jours) avec des échantillons témoins de même âge (60 jours) et conservés à la température ambiante. Les résultats sont présentés sur la figure V-27. Ces résultats montrent que le mélange traité avec de la fumée de silice type 3 (FS3) donne un pourcentage de réduction de la résistance la plus faible de 45,23% (voir A sur la figure V-27) après avoir été soumis aux cycles de mouillage-séchage. Mais la résistance obtenue après les cycles de mouillage-séchage, pour le mélange traité avec FS1 est supérieure aux autres mélanges ; (0,94 MPa, voir C sur la figure V-27). Nous estimons que cette

formule de mélange avec 15% de sables est la meilleure formule pour la fumée de silice type 3 (FS3). Ces résultats démontrent que l'ajout de 15% de sable fournit une très importante augmentation de la résistance aux cycles de mouillage-séchage pour le mélange traité avec FS3. En général, l'ajout de 15 sable donne une meilleure résistance aux cycles de mouillage-séchage (par rapport aux mélanges avec l'ajout de 5% de sable comme sans un ajout de sable), pour tous les mélangés sauf pour le mélange traité avec FS2. Malheureusement, malgré l'augmentation de la résistance aux cycles mouillage-séchage, parmi les trois mélanges appliqués, aucun mélange ne dépasse le niveau requis de 1.0 MPa en compression simple pour satisfaire le critère de traficabilité. La sensibilité à l'eau des mélanges est toujours élevée malgré l'ajout de 15 % de sable.

5.1.3. Choix de la cendre volante

La différence des caractéristiques entre la Sodeline et la Soproline peut influencer l'évolution de la résistance selon leur propre réactivité. Comme expliqué dans la chapitre précédent, et compte tenu de leur composition chimique, la Sodeline possède plus de pourcentage de $\text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$ que la Soproline mais, la Soproline possède plus de CaO que la Sodeline. Les $\text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$ sont des éléments principaux qui produisent la C-S-H et la C-A-H, qui peuvent fournir une résistance additionnelle. Par contre, la CaO est l'élément qui peut y contribuer.

Tableau V-10 : Pourcentages des mélanges de liant utilisées

Série	Sable (%)	Ciment (%)	Chaux2 (%)	Cendre volante SODELINE	Cendre volante SOPROLINE
Sédiment non traité	-	-	-	-	-
0-2-3C2-4SDL	-	2	3	4	-
0-2-3C2-8SDL	-	2	3	8	-
0-2-3C2-4SPRL	-	2	3	-	4
0-2-3C2-8SPRL	-	2	3	-	8
5-2-3C2-4SDL	5	2	3	4	-
5-2-3C2-8SDL	5	2	3	8	-
5-2-3C2-4SPRL	5	2	3	-	4
5-2-3C2-8SPRL	5	2	3	-	8
15-2-3C2-4SPRL	15	2	3	-	4
15-2-3C2-8SPRL	15	2	3	-	8

Nous avons réalisé onze formulations de mélanges. Pour chaque série des mélanges, trois éprouvettes ont été réalisées pour chaque période d'essai (7, 14, 28, 60, 90, 180 et 360 jours). Le tableau V-10 résume les pourcentages de liant utilisées.

5.1.3.1. Sans ajout de sable

5.1.3.1.1. Résultats et analyse des essais de la résistance en compression Simple

La figure V-28, montre l'évolution de la résistance en compression simple du mélange avec 4% de cendre volante et sans ajout de sable. Sur cette figure, nous pouvons observer la résistance des échantillons traités par liant pouzzolanique.

Nous pouvons constater également que le mélange avec la cendre volante nommée Sodeline, offre une meilleure résistance par rapport à celles relatives à la Soproline. Pour la résistance aux jeunes âges de 7-14 jours, le mélange 0-2-3C2-**8SPRL** (voir A3 sur la figure V-28) donne la meilleure résistance comparativement aux autres. Au-delà de 60 jours, elle est dépassée par celle du mélange 0-2-3C2-**8SDL**. Ces résultats montrent que l'effet de l'ajout de 8% de Soproline, aide à fournir une résistance aux jeunes âges (de 7 à 14 jours).

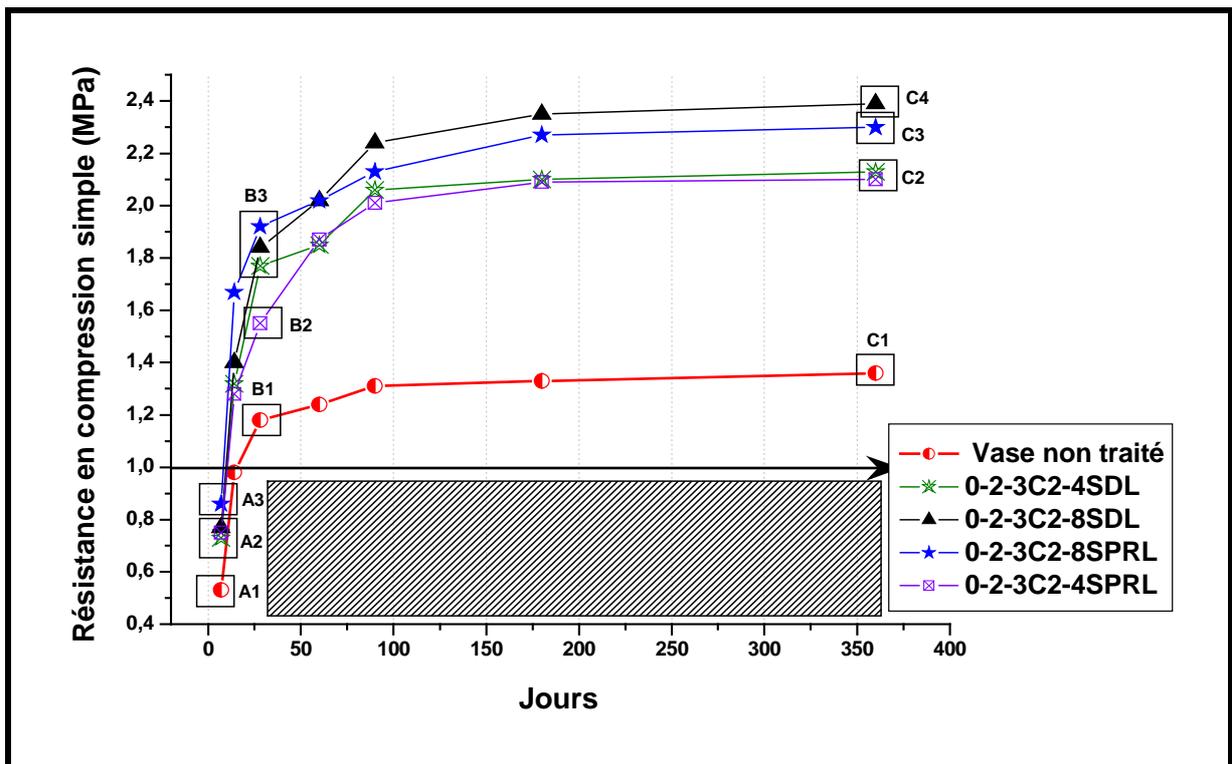


Figure V-28 : Résistance en compression simple du sédiment traité sans ajout de sable

Pour une période à 28 jours, le mélange 0-2-3C2-**8SPRL** fournit une valeur supérieure aux autres (voir B3 sur la figure V-28). Notons que la valeur de la résistance du mélange de 0-2-3C2-**4SPRL** est inférieure à toutes les valeurs des mélanges traités (voir B2 sur la figure V-33).

Les résultats de la résistance à long terme (360 jours) montrent que c'est le mélange 0-2-3C2-**4SPRL** (voir C4) donne le meilleur résultat, suivi par le mélange 0-2-3C2-**8SPRL** (voir C3) avec une faible différence valeur de résistance. Par contre pour les mélanges avec 4% de cendres volantes (0-2-3C2-**4SDL** et 0-2-3C2-**4SPRL**) après 90 jours ne montre aucune différence au niveau de la résistance.

5.1.3.1.2. Résultats et analyse des essais de gel-dégel

5.1.3.1.2.1. Evolution de la perte de masse

Les résultats du suivi morphologique concernent les échantillons avec différents pourcentages de cendres volantes (4% et 8%) sans l'ajout de sable, sur une série de 7 jours soumis à 40 cycles de gel-dégel (pendant 20 jours).

Nous pouvons constater que l'éprouvette de mélange de sédiment non traité au 20^{ème} cycle a une perte de masse de 15,4% suivie de l'éprouvette 0-2-3C2-4SDL (4% de Sodeline) avec une perte de masse 14,92%, et de l'éprouvette 0-2-3C2-8SDL (8% de Sodeline) montre une meilleure résistance aux cycles de gel-dégel (vis-à-vis de la perte de masse) avec 11,92%, (Figure V-29). Nous pouvons remarquer également que les pertes de masse relative varient linéairement en fonction du nombre de cycles.

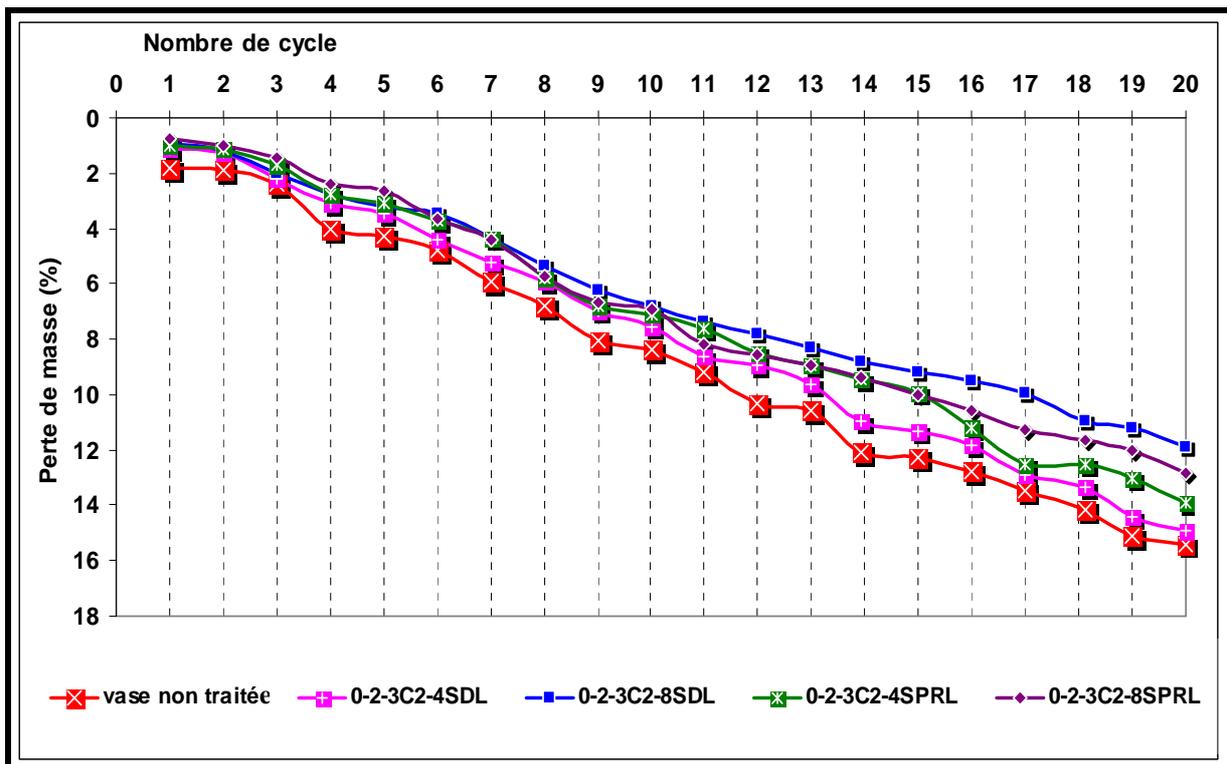


Figure V-29 : Evolution des pertes de masse des échantillons soumis à des cycles gel-dégel est à pour deux pourcentages de cendres volantes et sans sable

5.1.3.1.2.2. Evolution de la résistance en compression simple

Cet essai consiste à comparer la résistance en compression simple d'éprouvettes ayant subi 21 cycles de gel dégel à celle des éprouvettes témoins de même âge. Nous avons mesuré la résistance en compression simple des éprouvettes à la fin des cycles gel-dégel. Les figures qui suivent montrent les résultats comparés aux valeurs des résistances des éprouvettes avec différents pourcentages de sable.

5.1.3.1.2.2.a. Eprouvettes à 7 jours

La figure V-30 montre une réduction de la résistance en compression simple des éprouvettes de 7 jours, après avoir été soumises aux 21 cycles de gel-dégel. Sur cette figure, une comparaison de la résistance est illustrée entre les éprouvettes de

sédiment non traité ou témoin à l'âge de 28 jours, conservées à l'air libre, et les éprouvettes de 7 jours, conservées à l'air libre et puis soumises aux 21 cycles de gel-dégel.

Les résultats sur la figure V-30, montrent que les éprouvettes (sans sable) pour le mélange 0-2-3C2-**8SPRL** (avec 8% de Soproline) possèdent une meilleure résistance après avoir subi les cycles gel-dégel avec une valeur de 1,27MPa, suivies par celles du mélange 0-2-3C2-**8SDL** (8% de Sodeline) avec une résistance de 1,2MPa, et puis celles du mélange 0-2-3C2-**4SDL** (4% de Soproline) avec une résistance en compression simple de 1,1MPa et du mélange 0-2-3C2-**4SDL** (4% de Sodeline) avec la résistance de 1MPa.

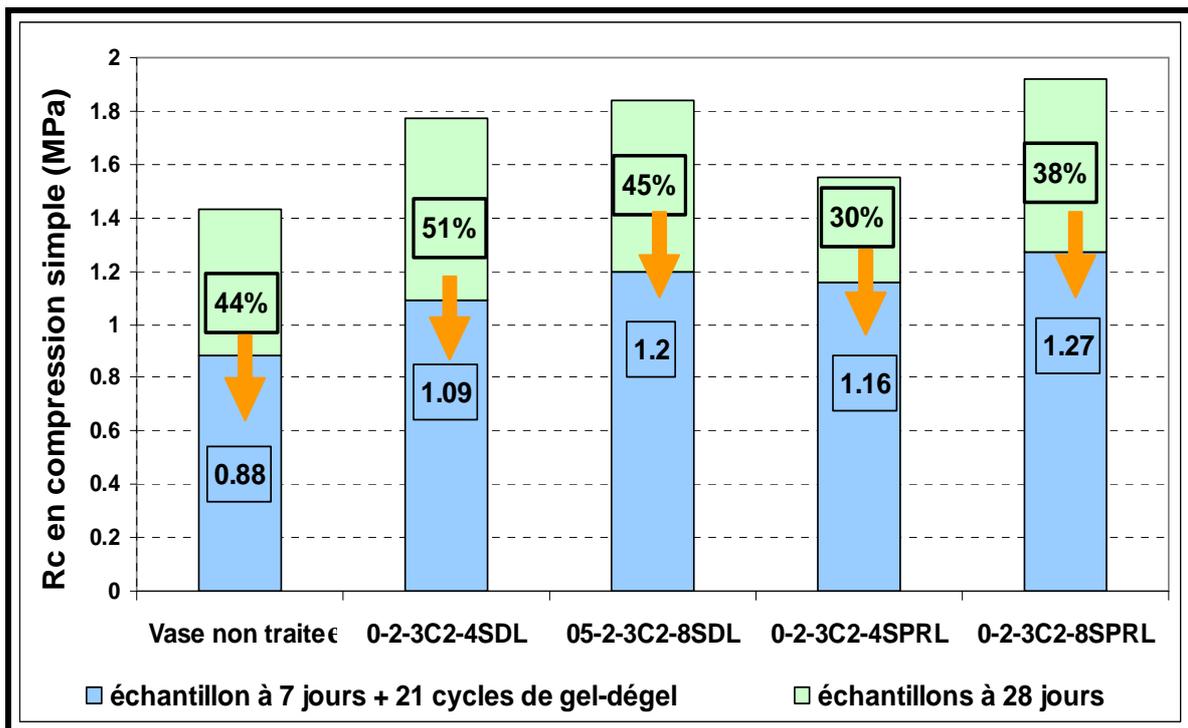


Figure V-30 : Evolution de la résistance en compression simple des éprouvettes soumises à des cycles de gel-dégel sans ajout de sable à 7 jours

Par contre, pour le mélange vase non traitée la résistance ne dépasse pas le seuil de 1MPa. Le pourcentage de réduction de la résistance après les cycles de gel-dégel pour le mélange 0-2-3C2-**4SPRL** (avec 4% de Soproline) est de 30%. Par contre, pour le mélange 0-2-3C2-**8SDL** (8% de Sodeline) et 0-2-3C2-**4SDL** (4% de Sodeline) la réduction de la résistance est la plus importante. Les résultats montrent que les mélanges avec la Soproline résistent mieux aux cycles de gel-dégel par rapport à ceux avec de la Sodeline.

5.1.3.1.2.2.b. Eprouvettes à 28 jours

La figure V-31, montre la comparaison de la résistance en compression simple entre les éprouvettes témoins de 60 jours (conservées à l'air libre) et les éprouvettes de 28 jours (conservées à l'air libre) et puis ayant subi 32 cycles de gel-dégel. Nous pouvons remarquer que la réduction de la résistance pour toutes les éprouvettes a diminué par rapport aux résultats précédents (voir figure V-30). Toutes les réductions de résistance pour les éprouvettes traitées aux liants

pouzzolaniques sont inférieures ou égales à 10%. Par contre, pour le mélange vase non traitée la réduction atteint 15%. La résistance obtenue avec les mélanges avec 8% de cendres volantes (0-2-3C2-8SDL et 0-2-3C2-8SPRL) est toujours supérieure à celles des autres mélanges. Nous pouvons également remarquer que la résistance de toutes les éprouvettes est supérieure à 1MPa, ceci signifie que les formules sont applicables dans les travaux routiers.

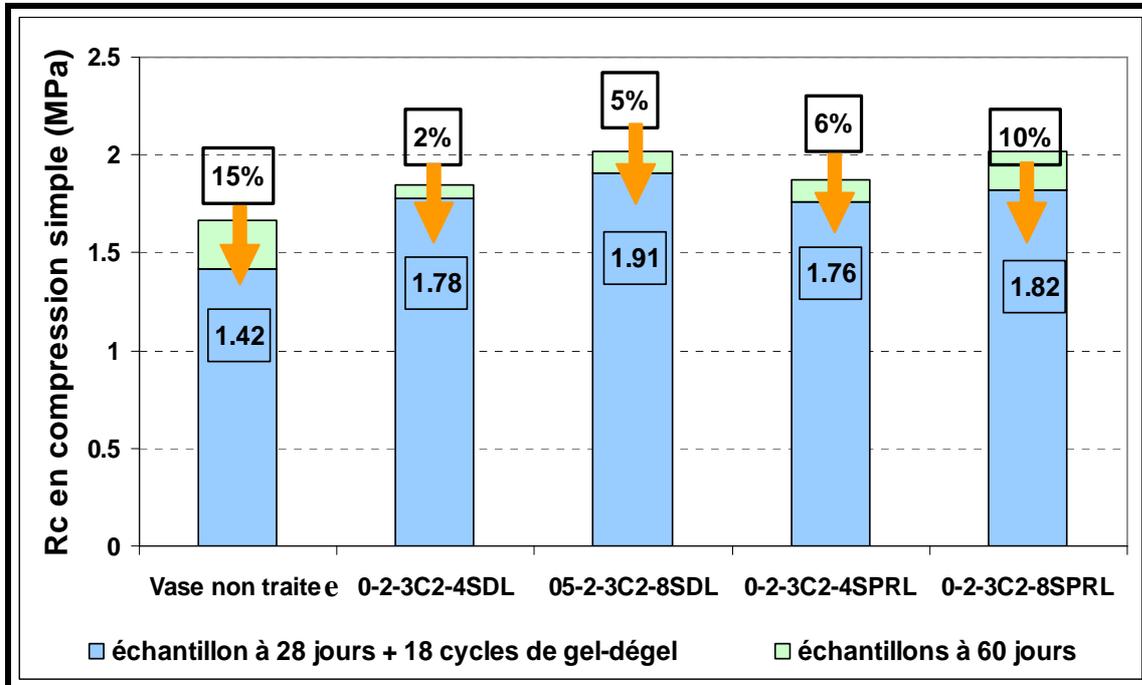


Figure V-31 : Evolution de la résistance en compression simple des éprouvettes soumises à des cycles de gel-dégel sans ajout de sable à 28 jours

5.1.3.1.3. Résultats et analyses des essais de mouillage-séchage

Pour la première série (avec les échantillons âgés de 7 jours et après avoir été soumis aux 10 cycles mouillage-séchage), les résultats ne peuvent pas être présentés, parce que la plupart des échantillons sont détériorés avant la fin d'essai (10^{ème} cycle). Par contre, pour l'échantillon d'âge 14 jours et soumis aux 14 cycles de mouillage-séchage les résultats sont présentés dans la figure V-32. Le mélange de de sédiment non traité montre une réduction de résistance la plus importante (71%) après avoir subi les cycles de mouillage-séchage. Les mélanges traités avec un liant pouzzolanique a des réductions de résistance entre 34% à 49%, mais nous pouvons remarquer qu'avec l'augmentation du pourcentage de cendres volantes, la réduction de résistance a diminué également.

Et le plus important à noter dans ces résultats est que, la résistance en compression simple après les cycles de mouillage-séchage sont toutes inférieures à 1MPa, ce qui signifie que tous les mélanges effectués (sans sable) ne peuvent pas être appliqués sur le terrain pour des travaux routiers. La différence entre la Sodeline et la Soproline est négligeable, avec le même pourcentage de cendres volantes, nous obtenons les résistances avec une valeur presque similaire

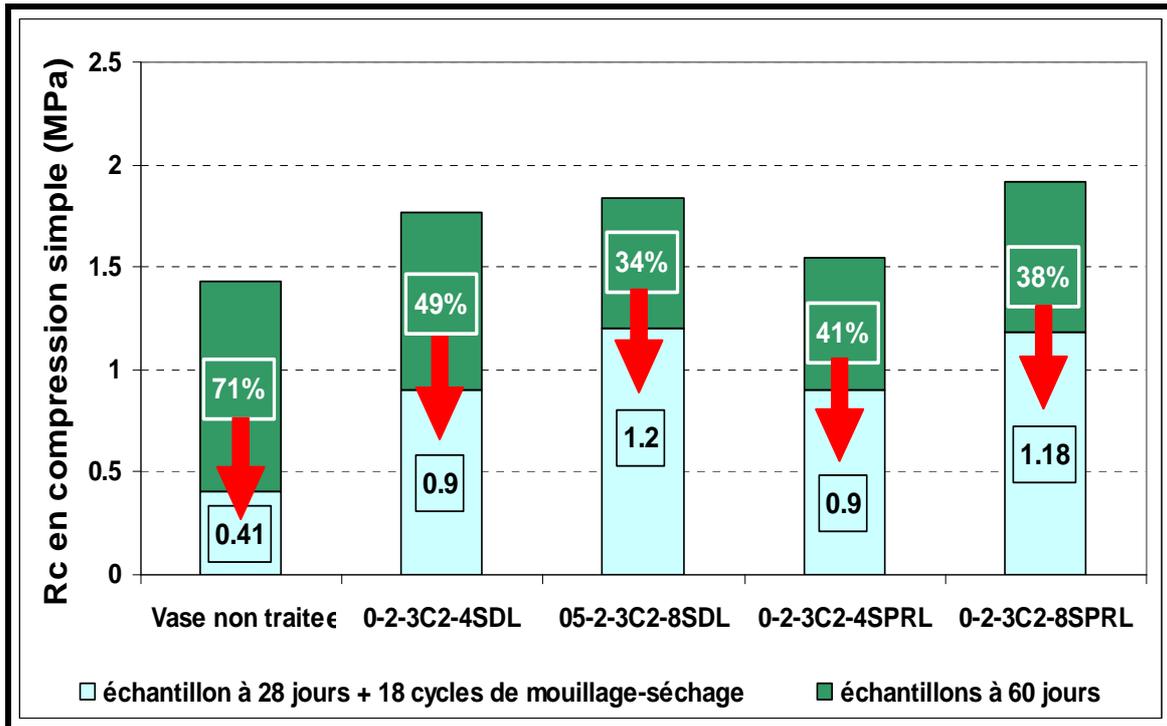


Figure V-32 : Evolution de la résistance en compression simple des éprouvettes soumises à des cycles de mouillage-séchage à 28 jours sans sable

5.1.3.2. Avec un ajout de 5% de sable

5.1.3.2.1. Résultats et analyse des essais de la résistance en compression simple

Un ajout de 5% de sable donne un effet positif pour l'amélioration de la résistance des éprouvettes. La figure V-33 montre les résultats de l'évolution de la résistance des mélanges avec 5% de sable. Toutes les résistances obtenues avec 5% de sable ont une augmentation assez importante par rapport aux résultats des mélanges sans sable. La résistance obtenue pour le mélange à 4% de cendres volantes avec 5% de sable est d'environ 2,7MPa. La résistance du même mélange sans sable (voir figure V-32) est d'environ 2MPa. Soit 37% d'augmentation de la résistance avec l'ajout de 5% de sable. Considérons maintenant les mélanges avec 8% de cendres volantes (0-2-3C2-8SDL et 0-2-3C2-8SPRL), la résistance pour le mélange sans sable est d'environ 2,27 - 2,35MPa, celle pour les mélanges avec 5% de sable se situe entre 2,9 - 3,1 MPa, soit 30% d'augmentation de la résistance.

La différence de résistance obtenue est assez importante entre les mélanges avec 4% de Sodeline et de Soproline (0-2-3C2-4SDL et 0-2-3C2-4SPRL). Le mélange 0-2-3C2-4SDL (avec 4% de Sodeline) a la meilleure résistance depuis les jeunes âges jusqu'à 180 jours par rapport celle du mélange 0-2-3C2-4SPRL (avec 4% de Soproline). Pour les mélanges avec 8% de cendres volantes, le mélange 0-2-3C2-8SPRL montre une meilleure résistance aux jeunes âges jusqu'à 180 jours. Par contre, pour le mélange 0-2-3C2-8SPRL (avec 8% de Soproline) après 60 jours la résistance obtenue est inférieure à celle du mélange 0-2-3C2-4SDL (avec seulement 4% de Sodeline). Si l'on se base sur ces résultats nous pouvons constater que la réaction pouzzolanique est perturbée par la présence de l'ajout de 5% de sable.

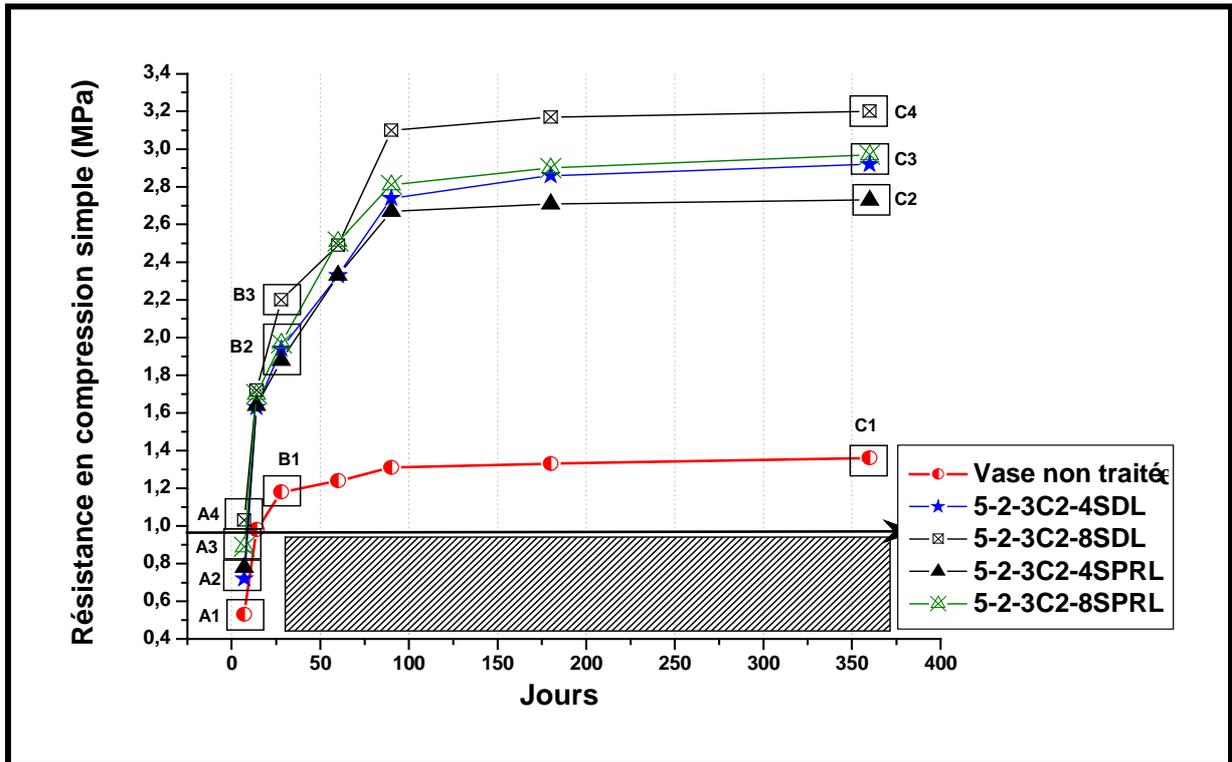


Figure V-33 : Résistance en compression simple des sédiments traités avec 5% de sable

5.1.3.2.2. Résultats et analyse des essais de gel-dégel

5.1.3.2.2.1. Effet des cendres volantes sur l'évolution de la perte de masse

La figure V-34 illustre l'évolution de la résistance de la série des échantillons avec 5% de sable. La différence de perte de masse entre l'éprouvette de mélange vase non traitée avec les autres éprouvettes traitées avec un liant pouzzolanique devient plus important par rapport aux résultats précédents, (voir figure V-33). La perte totale à la fin de l'essai pour les éprouvettes traitées avec un liant pouzzolanique est compris entre 9,5% et 12,5%, Alors que, celle pour l'éprouvette du sédiment non traité est de 15,4%. L'amélioration du comportement des éprouvettes face aux cycles de gel-dégel pour ces essais, montre que l'ajout de 5% de sable, donne un effet assez positif pour la résistance aux cycles gel-dégel.

Sur la figure V-34, l'éprouvette 5-2-3C2-8SPRL (8% de Soproline) a la meilleure résistance aux cycles gel-dégel avec une perte de masse de 9,72%, suivi par l'éprouvette 5-2-3C2-8SDL (8% de Sodeline) avec 10,6% de perte de masse, et l'éprouvette 5-2-3C2-4SDL (4% de Sodeline) avec la plus faible résistance aux cycles de gel-dégel à savoir 12,5% de perte de masse.

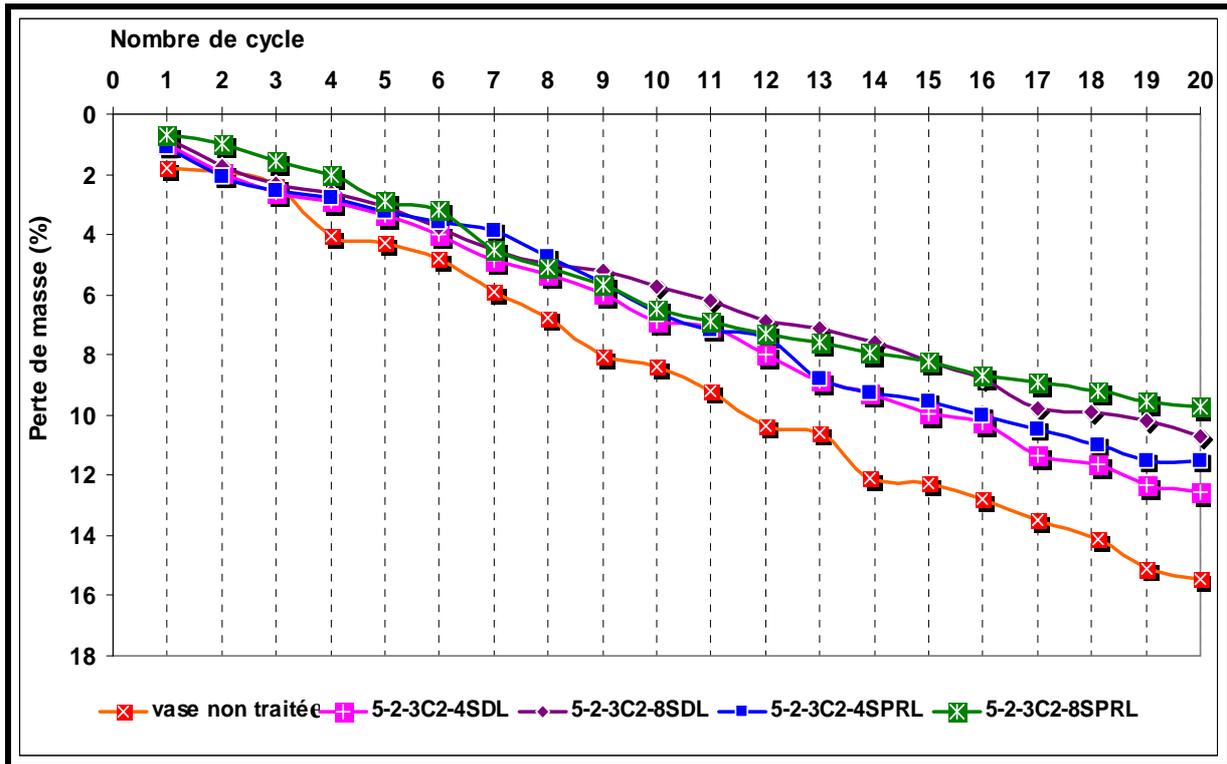


Figure V-34 : Evolution des pertes de masse des échantillons soumis à des cycles gel-dégel pour différents pourcentages de cendres volantes avec un ajout de 5% de sable

5.1.3.2.2.1.a. Eprouvettes à 7 jours

La figure V-35, illustre la réduction de la résistance en compression simple des échantillons de 7 jours, après avoir été soumises à 21 cycles de gel-dégel. Sur cette figure, une comparaison de la résistance est montrée entre une éprouvette témoin à l'âge de 28 jours, conservée à l'air libre et une éprouvette de 7 jours (conservée à l'air libre et puis soumise aux 21 cycles de gel-dégel). Si l'on observe les résultats de la figure V-35 on observe, que les échantillons (avec 5% de sable) pour le mélange 5-2-3C2-**8SDL** (avec 8% de Sodeline), 5-2-3C2-**8SPRL** (avec 8% de Soproline) et 5-2-3C2-**4SPRL** (avec 4% de Soproline) possèdent les mêmes résistances après avoir subi les cycles de gel-dégel avec une valeur d'environ 1.25MPa, suivies par le mélange 5-2-3C2-**4SDL** (4% de Sodeline) avec une résistance en compression simple de 0.98 Mpa. Par contre, pour le mélange dans le cas de sédiment non traité, la résistance ne dépasse pas le seuil du 1 MPa.

Notons que, pour le mélange 5-2-3C2-**8SPRL** (8% de Sodeline) et 5-2-3C2-**4SDL** (4% de Sodeline) la réduction de la résistance est plus importante que celle du sédiment non traité (vase non traitée), Les résultats montrent que le mélange avec de la Soproline résiste mieux aux cycles de gel-dégel par rapport à celui obtenu avec de la Sodeline.

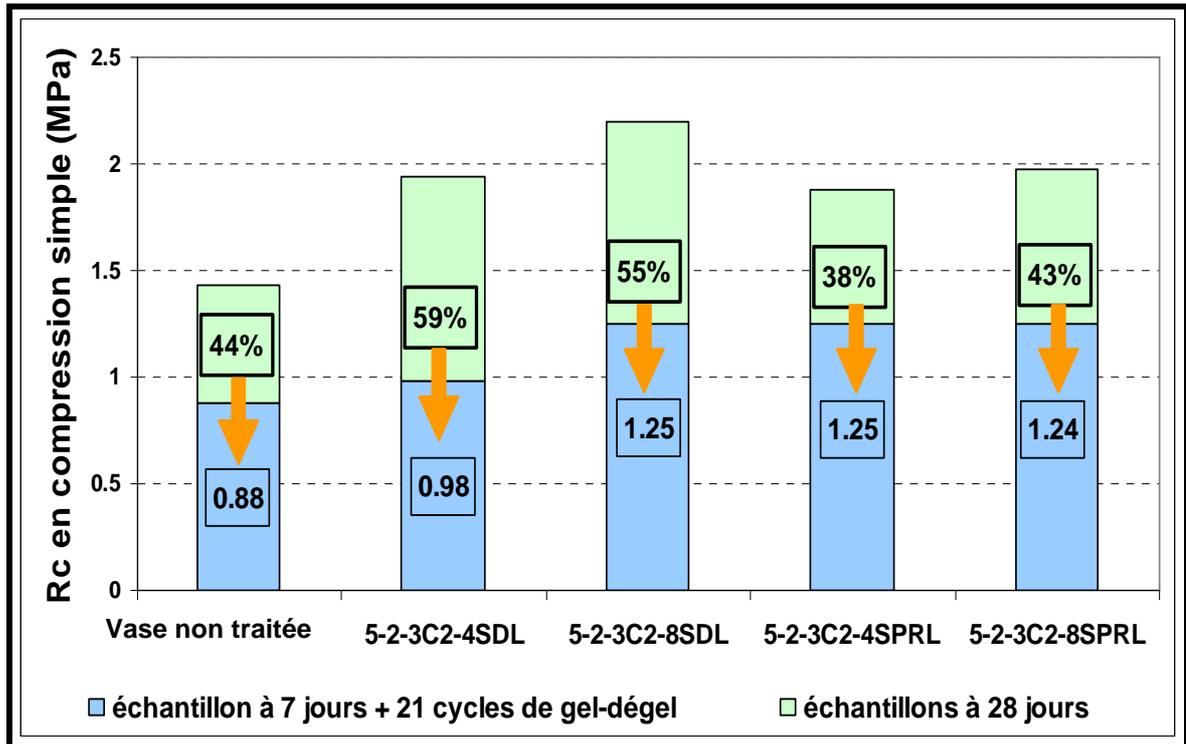


Figure V-35 : Evolution de la résistance en compression simple des éprouvettes soumises à des cycles de gel dégel avec 5% de sable à 7 jours

5.1.3.2.2.1.b. Eprouvettes à 28 jours

La figure V-36, permet d'observer la comparaison de la résistance en compression simple entre les éprouvettes témoins de 60 jours (conservées à l'air libre) et les éprouvettes de 28 jours (conservées à l'air libre) ayant subi 32 cycles de gel-dégel. Nous pouvons remarquer que la réduction de la résistance pour toutes les éprouvettes a diminué par rapport aux résultats précédents (voir figure V-35)

Les réductions de résistance pour les éprouvettes traitées aux liants pouzzolaniques sont inférieures ou égales à 16%. Pour le sédiment non traité, la réduction atteint 15%. La résistance obtenue pour les mélanges avec 8% de cendres volantes (5-2-3C2-8SPRL et 5-2-3C2-8SDL) sont toujours supérieures à celles des autres mélanges. Nous pouvons également remarquer que la résistance de toutes les éprouvettes est supérieure de 1MPa, ceci signifie que les formules sont applicables dans les travaux routiers.

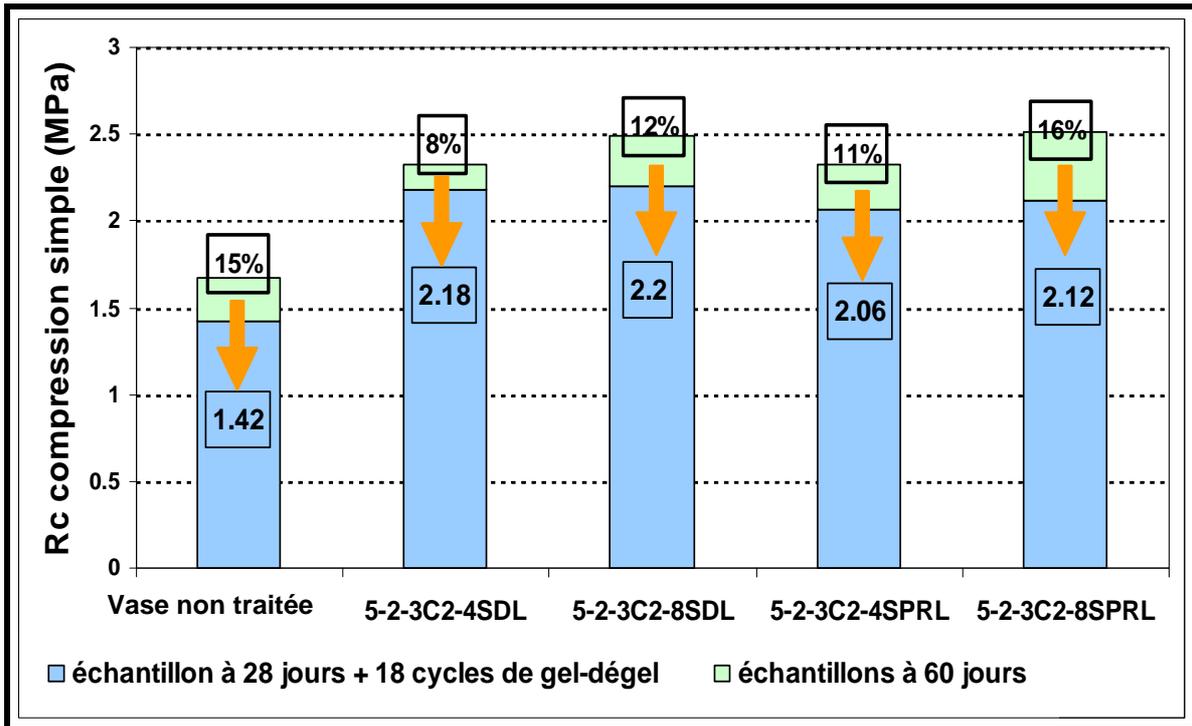


Figure V-36 : Evolution de la résistance en compression simple des éprouvettes soumises à des cycles de gel-dégel avec un ajout de 5% de sable à près 28 jours.

5.1.3.2.3. Résultats et analyses des essais de mouillage-séchage

Sur la figure V-37 nous pouvons remarquer que la réduction de la résistance des éprouvettes soumises aux cycles de mouillage-séchage, diminue avec l'ajout de 5% de sable. Les mélanges traités avec un liant pouzzolanique ont des réductions de résistance comprise entre 35% à 45%, mais nous pouvons remarquer qu'avec l'augmentation du pourcentage de cendres volantes, la réduction de la résistance diminue également.

Le mélange avec 8% de Sodeline (5-2-3C2-8SDL) a la meilleure résistance, mais le mélange avec 4% de Sodeline (5-2-3C2-4SDL) montre une augmentation importante par rapport la résistance précédente (avec 5% de sable). Nous pouvons constater que la différence de résistance obtenue entre le mélange de 8% de Sodeline avec celle de 4% de Sodeline diminue par rapport aux résultats précédents (avec 5% de sable).

Par exemple, les mélanges 5-2-3C2-4SDL et 5-2-3C2-8SDL (avec 4% et 8% de Sodeline respectivement), la résistance augmente de 1,21MPa à 1,31MPa, Pour les mélanges 5-2-3C2-4SPRL et 5-2-3C2-8SPRL (avec 4% et 8% de Soproline) la résistance passe également de 1,14 MPa à 1,27 MPa. Mais avec l'ajout de 5% de sable, nous pouvons voir que toutes les éprouvettes ont une résistance qui dépasse le seuil de 1 MPa. Donc, avec ces résultats, nous pouvons considérer qu'un ajout de 5% de sable améliore la résistance aux cycles de mouillage-séchage. La résistance obtenue avec les mélanges avec de la Sodeline et de la Soproline ne montrent pas de différence importante.

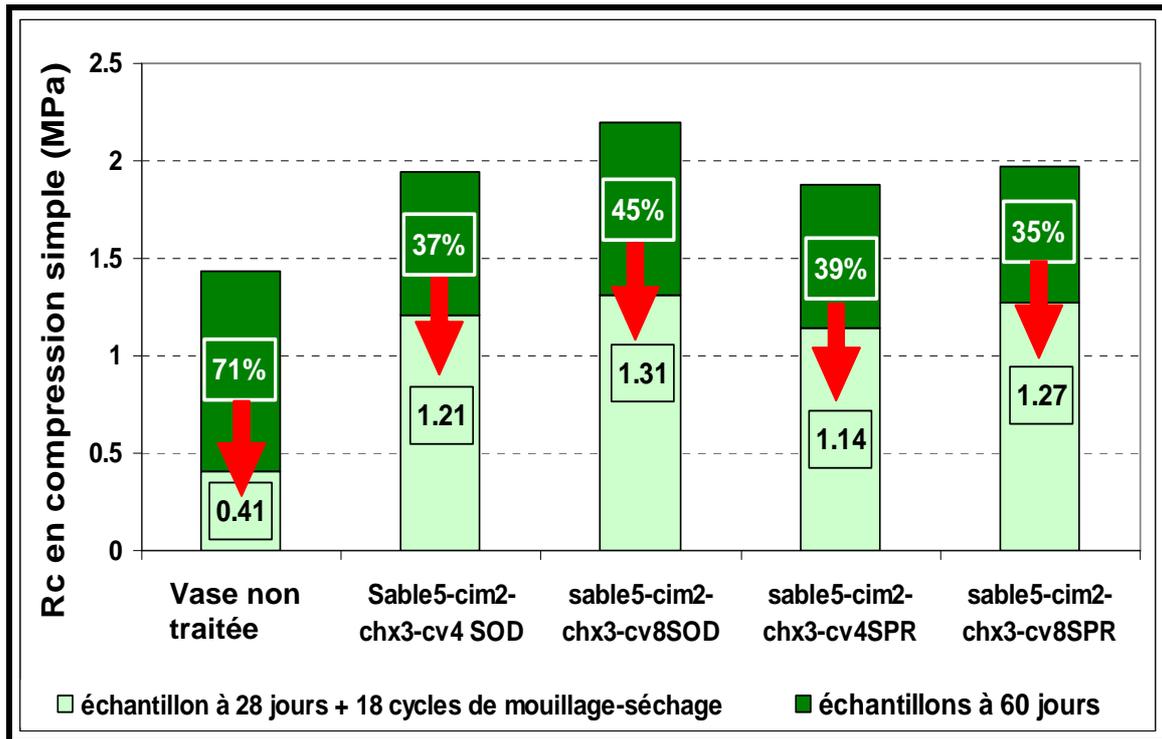


Figure V-37 : Evolution de la résistance en compression simple des éprouvettes soumises à des cycles de mouillage-séchage à 28 jours avec un ajout de 5% de sable

5.1.3.3. Avec un ajout de 15% de sable

5.1.3.3.1. Résultats et analyse des essais de la résistance en compression simple

Les résultats de l'essai en compression simple pour les mélanges avec 15% de sable sont présentés sur la figure V-38. la tendance est similaire aux résultats précédents (voir figure V-33).

Pour le mélange avec la Soproline (15-2-3C2-4SPRL et 15-2-3C2-8SPRL) l'évolution de la résistance s'arrête après 60 jours. En effet, à partir de cet âge, l'évolution de résistance pour les deux mélanges avec de la Soproline ne montre aucune amélioration importante. Ces résultats confirment que la présence de sable en pourcentage élevé peut perturber la réaction pouzzolanique de la Soproline.

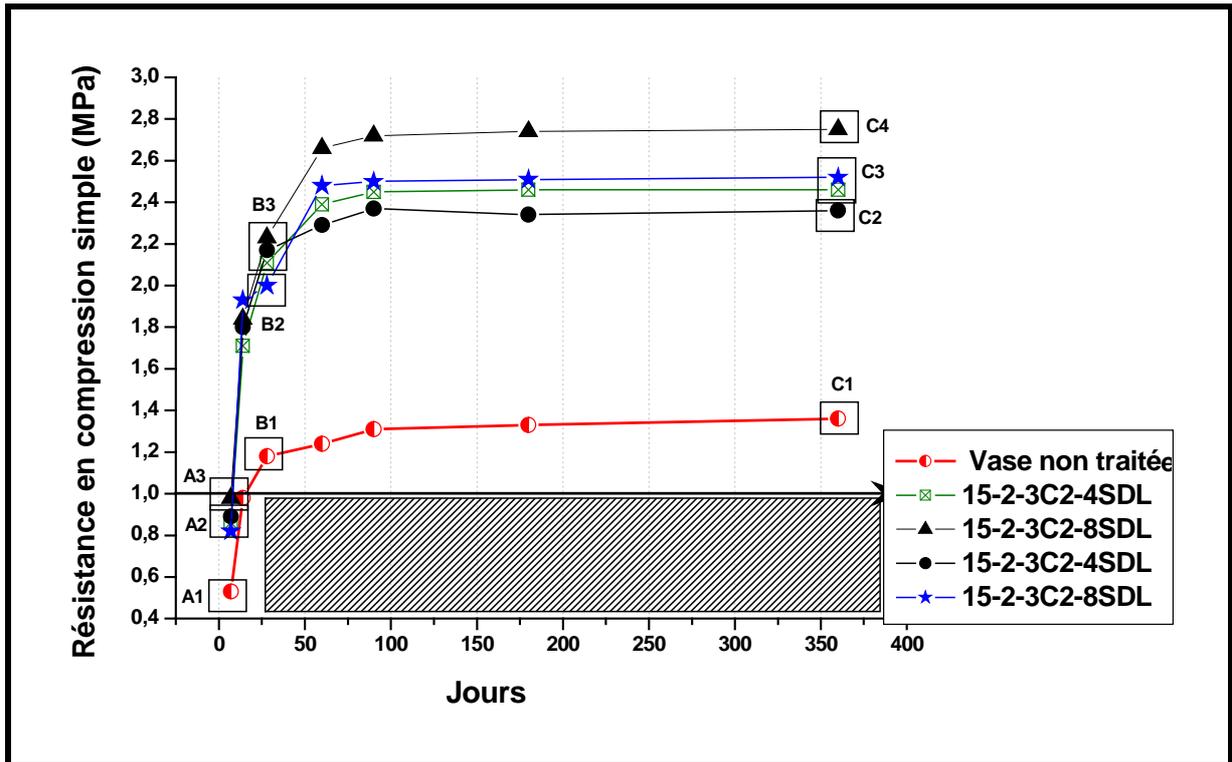


Figure V-38 : Résistance en compression simple des sédiments traités avec un ajout de 15% de sable

5.1.3.1.2. Résultats et analyse des essais de gel-dégel

5.1.3.1.2.1. Evolution de la perte de masse

L'ajout de sable dans les mélanges, théoriquement doit aider à améliorer la résistance en compression simple aux jeunes âges. Cette théorie est confirmée avec les résultats montrés sur la figure V-39, où nous pouvons voir que la différence de pourcentage de perte de masse, entre l'éprouvette de sédiment non traité et les éprouvettes traitées avec un liant pouzzolanique, est plus importante par rapport aux résultats précédents (avec 5% de sable). Mais, pour ce pourcentage de sable, l'éprouvette 15-2-3C2-8SPRL (8% de Soproline) est l'éprouvette qui a la meilleure résistance en compression simple (8,4% de perte de masse) suivie par l'éprouvette 15-2-3C2-8SDL (8% de Sodeline) avec une perte de résistance ou perte de masse de 9,8%. L'éprouvette 15-2-3C2-4SDL (4% de Sodeline) a 10,1% de perte de masse.

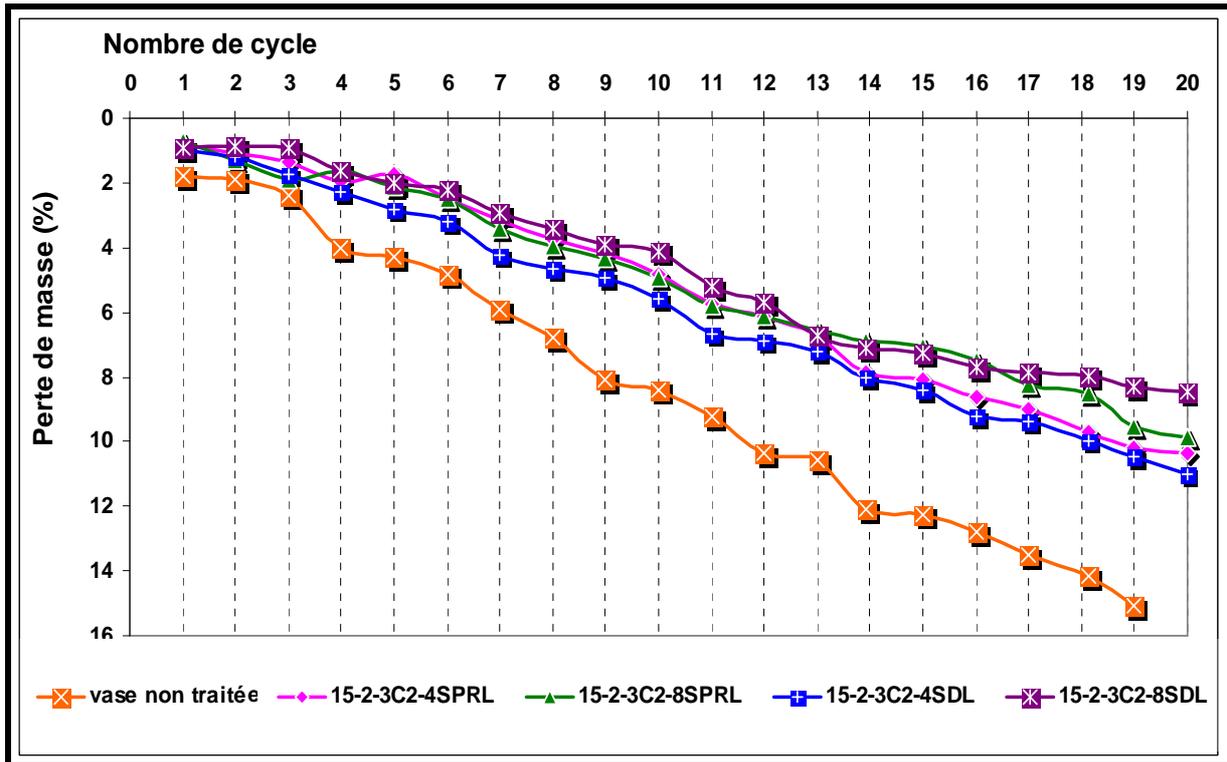


Figure V-39 : Evolution des pertes de masse des échantillons soumis à des cycles gel-dégel pour différents pourcentages de cendres volantes avec un ajout de 15% de sable

Pour l'éprouvette du sédiment non traité, elle présente des écailles au 2^{ème} cycle et des morceaux au 5^{ème} cycle s'en détachent. La perte de masse relative varie linéairement en fonction du nombre de cycles pour atteindre une perte totale à la fin de l'essai d'environ 15,11%.

5.1.3.3.2. Evolution de la résistance en compression simple

5.1.3.3.2.a. Epreuves à 7 jours

La figure V-40 montre une réduction de la résistance en compression simple des éprouvettes de 7 jours, après avoir été soumises aux 21 cycles de gel-dégel. Sur cette figure, une comparaison de la résistance est donnée entre l'éprouvette témoin à l'âge de 28 jours, conservée à l'air libre et l'éprouvette de 7 jours (conservée à l'air libre et puis soumise aux 21 cycles de gel-dégel).

Les résultats de la figure V-40, montrent que les éprouvettes, avec 15% de sable, pour le mélange 15-2-3C2-8SDL (avec 8% de Sodeline), 15-2-3C2-8SPRL (avec 8% de Soproline), 15-2-3C2-4SDL (avec 4% de Sodeline) et 15-2-3C2-4SPRL (avec 4% de Soproline) possèdent les mêmes résistances après avoir été soumises aux cycles de gel-dégel avec une valeur d'environ 1.2 MPa. Le sédiment non traité, a une résistance qui ne dépasse pas le seuil de 1 MPa. Le pourcentage de réduction de résistance après avoir été soumises aux cycles de gel-dégel pour le mélange 15-2-3C2-4SPRL (avec 4% de Soproline) est de 41%.

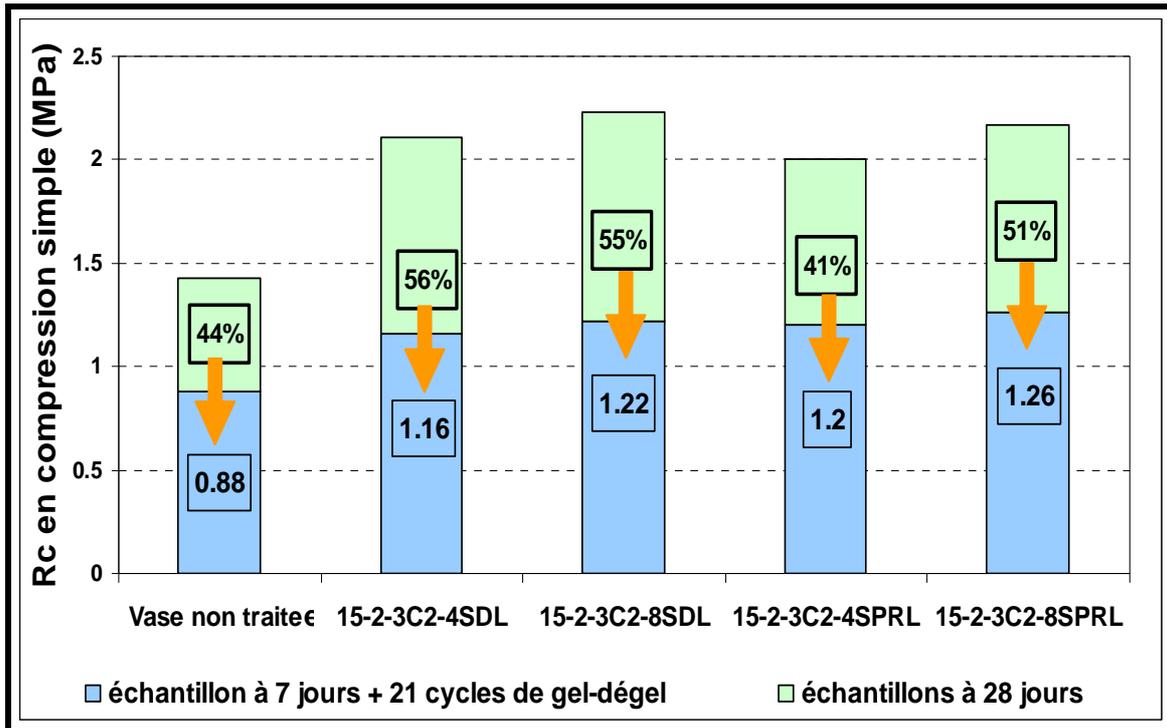


Figure V-40 : Evolution de la résistance en compression simple des éprouvettes soumises à des cycles de gel dégel à 7 jours avec un ajout de 15% de sable

Pour le mélange 15-2-3C2-**8SDL** (8% de Sodeline) et 15-2-3C2-**4SDL** (4% de Sodeline), la réduction de résistance est plus importante que celle obtenue avec le mélange L0 (sédiment non traité). Les résultats montrent que le mélange avec de la Soproline résiste mieux aux cycles de gel-dégel par rapport à celui réalisé avec de la Sodeline.

5.1.3.3.2.2.b. Eprouvettes à 28 jours

La figure V-41, montre la comparaison de la résistance en compression simple entre l'éprouvette témoin de 60 jours (conservée à l'air libre) et l'éprouvette de 28 jours (conservée à l'air libre) et ayant subi 32 cycles de gel-dégel. Nous pouvons remarquer que la réduction de la résistance pour toutes les éprouvettes a diminué par rapport aux résultats précédents (voir figure V-41). Toutes les réductions de résistance pour les éprouvettes traitées aux liants pouzzolaniques sont inférieures ou égales à 30%. Par contre, pour le sédiment non traité la réduction atteint 15%. La résistance obtenue pour les mélanges avec 8% de cendres volantes (15-2-3C2-**8SDL** et 15-2-3C2-**4SDL**) sont toujours supérieures aux autres mélanges.

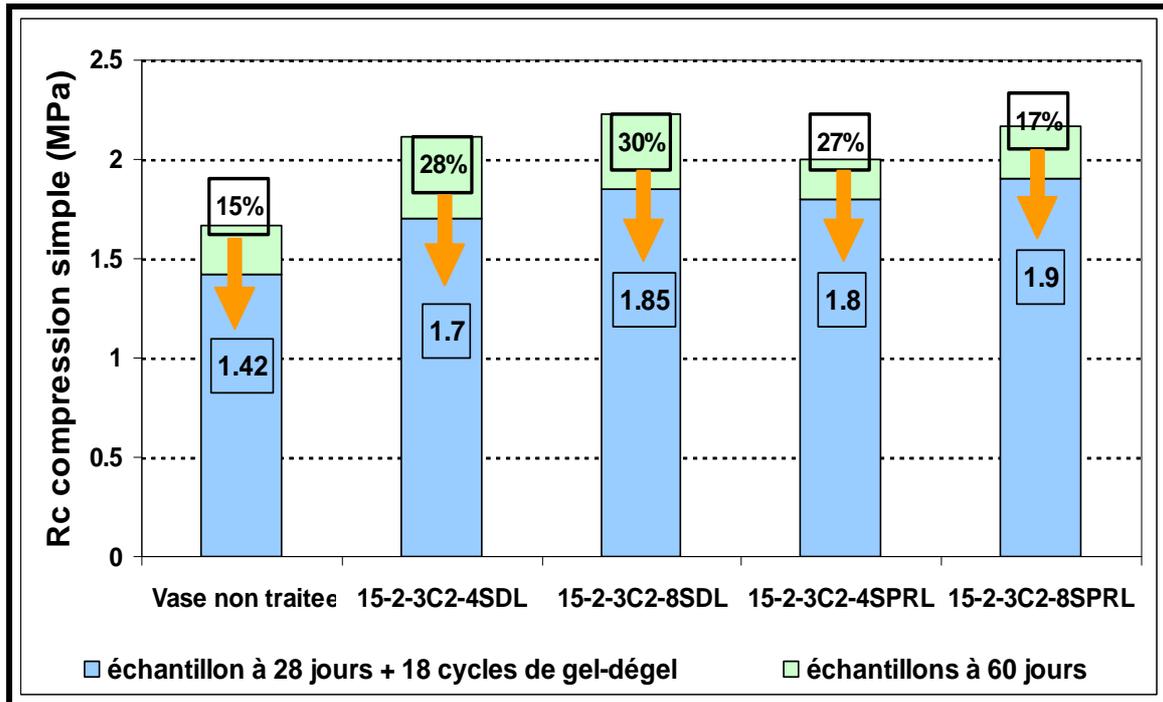


Figure 41 : Evolution de la résistance en compression simple des éprouvettes soumises à des cycles de gel dégel à 28 jours avec un ajout de 15% de sable

Nous pouvons également remarquer que la résistance de toutes les éprouvettes est supérieure à 1 MPa, ceci signifie que les formules sont applicables dans les travaux routiers

5.1.3.3.3. Résultats et analyses des essais de mouillage-séchage

Avec un ajout de 15% de sable, nous pouvons directement constater que la diminution de résistance après avoir subi les cycles de mouillage-séchage, est inférieure à 30%. Le pourcentage de diminution varie entre 17% à 26% (voir figure V-42) Nous pouvons remarquer également que la résistance en compression simple après les cycles de mouillage-séchage sont toutes supérieures à 1,5MPa.

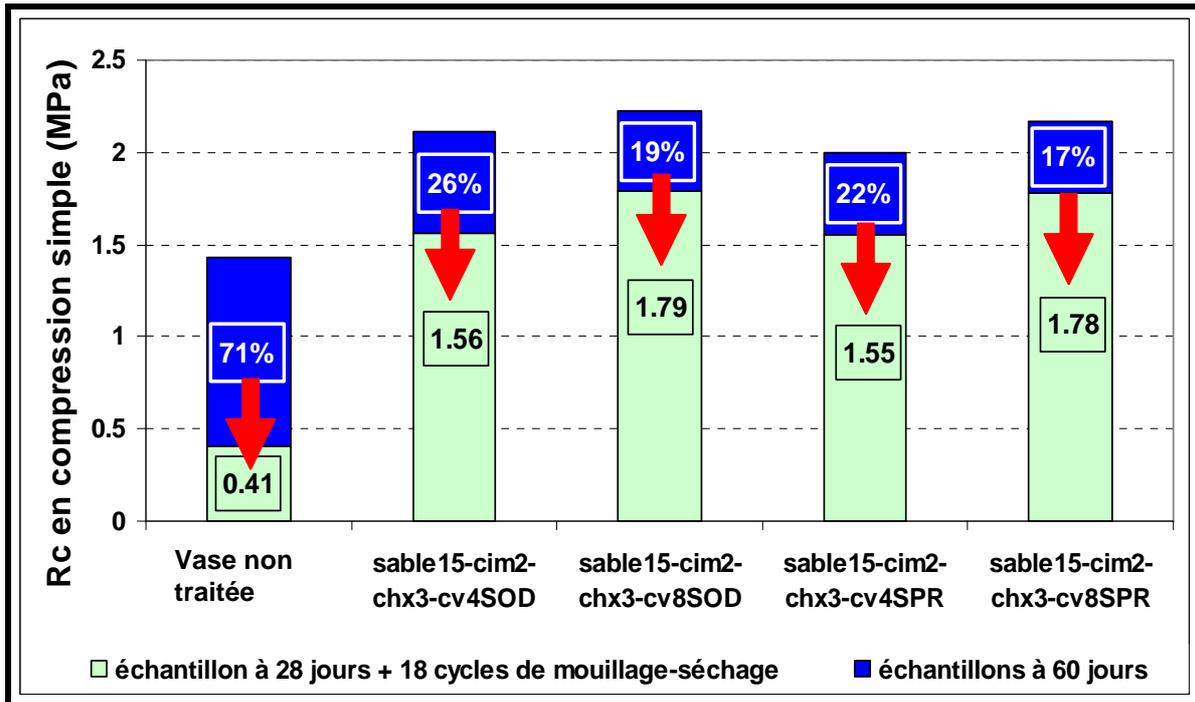


Figure V-42 : Evolution de la résistance en compression simple des éprouvettes soumises à des cycles de mouillage-séchage à 28 jours avec un ajout de 15% de sable

L'augmentation du pourcentage des cendres volantes, de 4% à 8% montre également une amélioration de la résistance en compression simple. Donc, ces résultats confirment que l'ajout de 15% de sable, est envisageable vis-à-vis des essais de mouillage-séchage. Si l'on compare la réactivité de la Sodeline et de la Soproline, malgré la différence de leurs caractéristiques chimiques et la taille des particules, pour ces essais nous ne pouvons pas remarquer de différence importante.

5.2. Traitement avec 5% de ciment et 3% de la chaux

5.2.1. Condition de mise en œuvre des mélanges

Les résultats d'essais Proctor sont présentés sur la figure V-43. Pour différentes compositions de mélanges.

L'effet de la fumée de silice s'identifie en comparant tous les mélanges traités, donc nous pouvons observer une augmentation de la teneur en eau optimale, et une réduction de valeur du poids volumique maximal. Pour les mélanges traités sans ajout de sable (0-2-3C2-0FS3 et 0-2-3C2-1FS3) la teneur en eau optimale passe de 25% (voir H sur la figure V-43) à 26,2% (voir I), soit 1,2% d'augmentation. Pour les mélanges traités avec 5% de sables (5-2-3C2-0FS3 et 5-2-3C2-1FS3) la teneur en eau optimale passe de 23,5% (voir B sur la figure V-43) à 24,4% (voir C) soit 0,9% d'augmentation. Les mélanges traités avec 15% de sable (15-2-3C2-0FS3 et 15-2-3C2-1FS3) montre aussi une augmentation de la teneur en eau optimale assez importante : elle passe de 16,8% (voir F sur la figure V-43) à 19,1% (voir G) soit 2,3% d'augmentation.

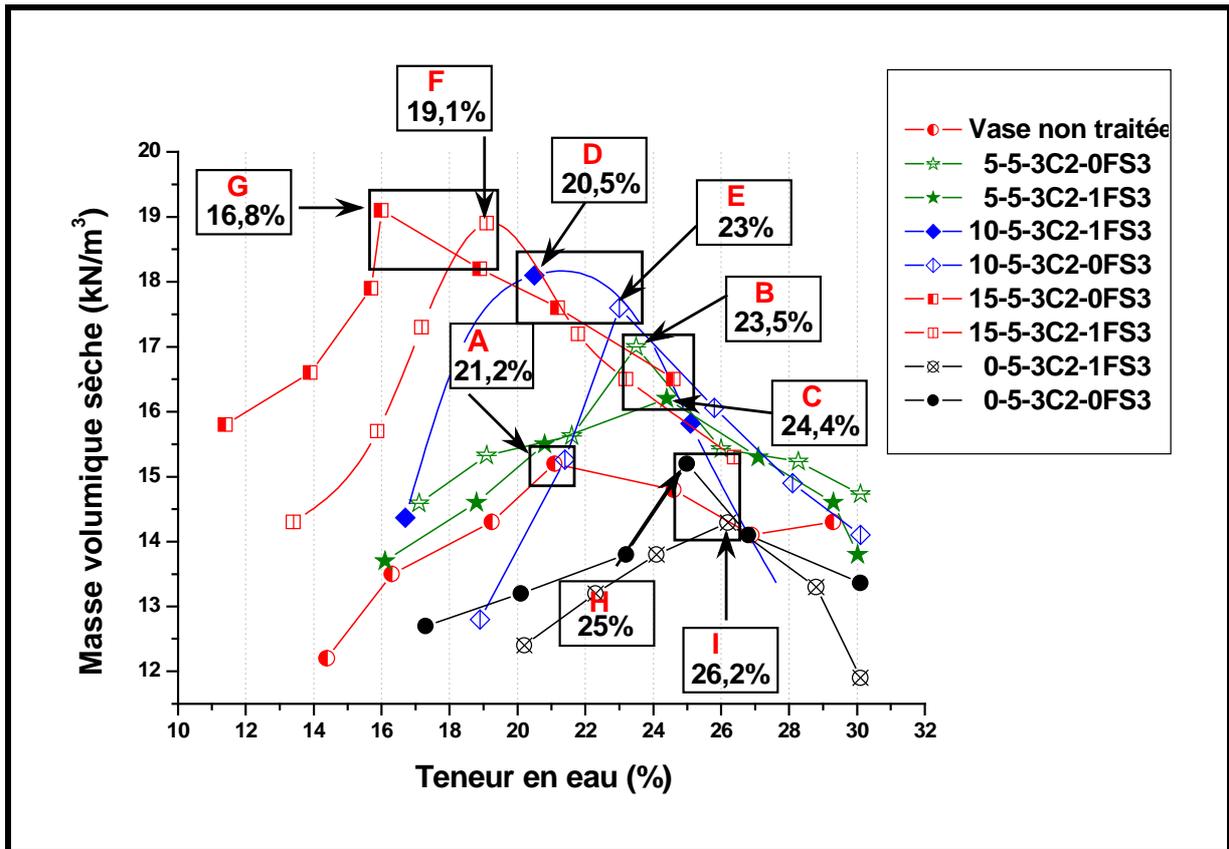


Figure V-43 : Courbes Proctor normal du sédiment non traité et des sédiments traités avec 5% de ciment et 3% de chaux

Cette augmentation est supérieure à celle obtenue pour les mélanges sans sable et un ajout de 5% de sable. Nous estimons la granulométrie du sable qui n'est pas tout à fait homogène (**voir chapitre matériaux**) provoque cette augmentation. L'effet de cette granulométrie du sable peut être vérifié en comparant les mélanges avec 10% de sable (et 10-2-3C2-1FS3). Pour ces mélanges à 10% de sable, la teneur en eau optimale va passer de 20,5% (10-2-3C2-0FS3, voir E) à 23% (10-2-3C2-1FS3, voir D). Ce résultat est contradictoire avec la théorie. En effet, un ajout de matériaux fins (fumée de silice) doit normalement augmenter la surface spécifique donc doit provoquer une augmentation de la teneur en eau, mais ce n'est pas le cas pour les mélanges avec 10% sable.

D'après ces résultats, nous pouvons constater que l'effet de fumée de silice a un effet positif sur l'évolution de la teneur en eau optimale avec les mélanges sans sable, 5%. Mais pour des pourcentages de sable importants (10 et 15%), l'effet de fumée de silice est atténué.

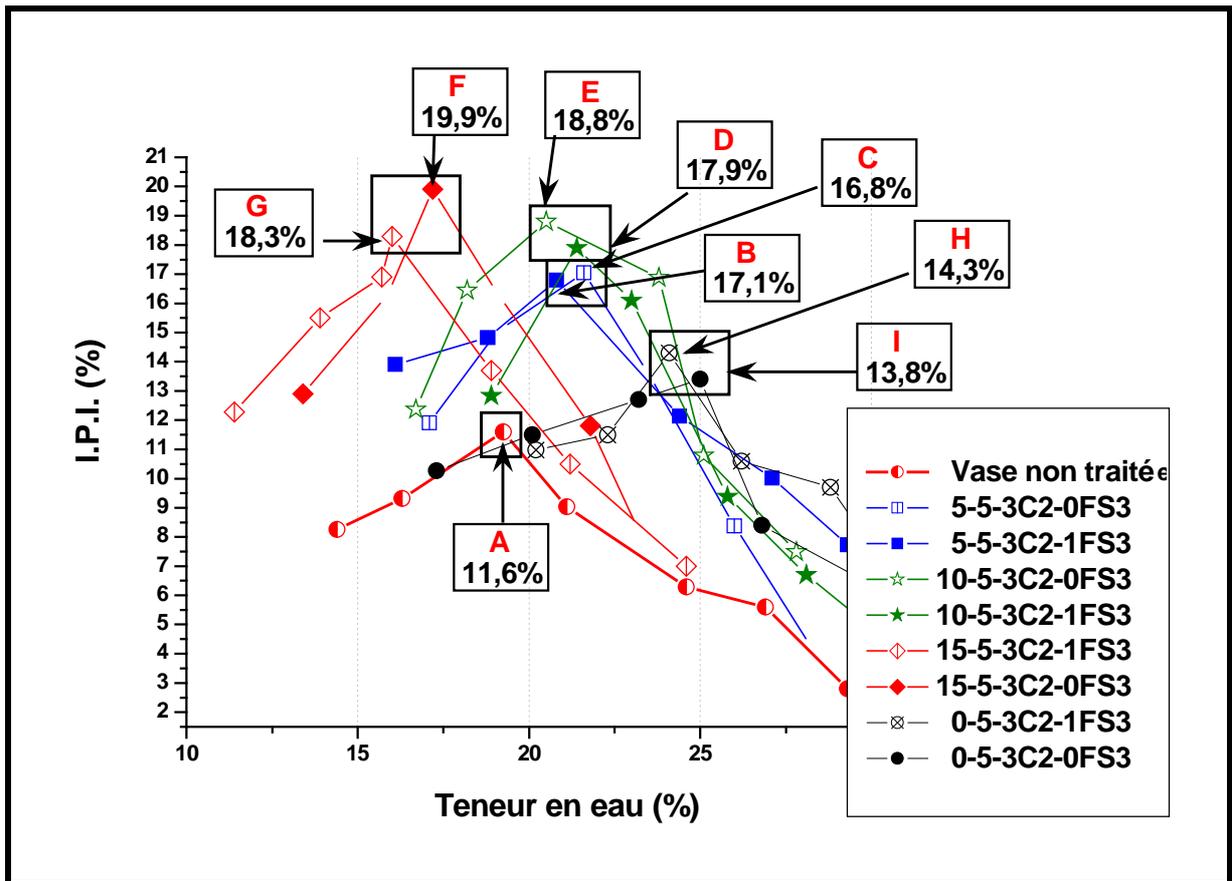


Figure V-44 : Courbes d'IPI de sédiment non traité et des sédiments traités avec 5% de ciment et 3% de chaux

La figure V-44 donne également les courbes de portances pour les sédiments traités avec 10% de sables, le mélange 15-5-3C2-0FS3 (voir F) a la meilleure valeur de portance : (19,9%).

L'effet d'ajout de 1% de fumée de silice peut être également identifié en regardant les mélanges traités avec différents pourcentages de sable. Pour les mélanges traités sans sable, la valeur de la portance passe de 13,8% (0-5-3C2-0FS3, voir I) à 14,3% (0-5-3C2-1FS3), soit 0,7% d'augmentation. Pour les mélanges traités avec 5% de sables, la valeur de la portance passe de 16,8% (5-5-3C2-0FS3, voir B) à 17,1% (5-5-3C2-1FS3, voir C) soit 0,7% d'augmentation. Pour les mélanges traités avec 10% de sable, la valeur de la portance croît de 17,9% (10-5-3C2-0FS3, voir E) à 18,8% (10-5-3C2-1FS3, voir D) soit 0,9% d'augmentation. Par contre pour les mélanges traités avec 15% de sable, la valeur de la portance diminue de 19,9% (15-5-3C2-0FS3, voir F) à 18,3% (15-5-3C2-1FS3, voir G) soit 1,6% de réduction. Ce dernier résultat confirme le défaut de granulométrie du sable utilisé. Nous pouvons confirmer ce résultat avec la comparaison de la valeur de portance du mélange (10-5-3C2-1FS3 (voir D) et celui référencé 15-5-3C2-1FS3 (voir G). La valeur de portance du mélange avec 10% de sable est plus élevée que celle du mélange avec 15% de sable. Théoriquement l'ajout de sable comme correcteur de granulométrie doit fournir une augmentation de la valeur de portance.

5.2.2. Traitement sans ajout de sable

D'après les résultats précédents, la fumée de silice de type 3 (FS 3) a été choisie les mélanges suivant, et le pourcentage de ciment a été augmenté à 5%, pour avoir une résistance suffisante aux cycles de mouillage-séchage.

Les résultats obtenus sont présentés sur la figure V-45 montrent que les résistances en compression simple pour tous les mélanges traités après 28 jours sont supérieures à 1 MPa, ce qui signifie que, le mélange est satisfaisant pour être appliqué en travaux routiers.

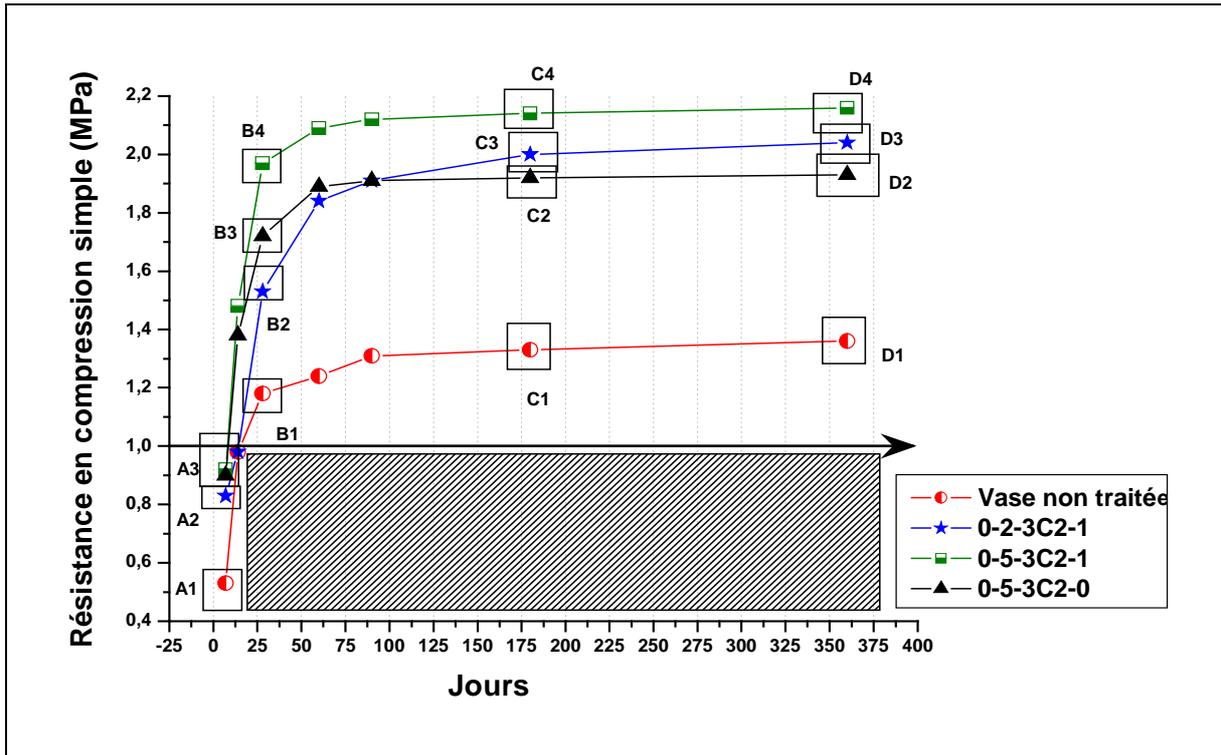


Figure V-45 : Performance mécanique obtenues sur le sédiment traité à 5% de ciment et sans l'ajout de sable

Les résultats montrent également que l'augmentation du pourcentage de ciment à 5% donne une amélioration des performances mécaniques des mélanges. Cette augmentation peut être vérifiée sur l'évolution des performances mécaniques aux jeunes âges (à 7 jours) de la figure V-45. Sur cette figure, nous pouvons constater que les résistances obtenues peuvent être classées dans 3 classes. Le sédiment non traité (voir A1 sur la figure V-45) enfin par les mélanges traités avec 2% (0-2-3C2-1FS3) de ciment (voir A2 sur la figure V-45), et ensuite suivi par la classe avec des résistances supérieures que aux autres. Cette dernière classe contient les mélanges traités avec 5% de ciment (voir A3 sur la figure V-45). L'explication de ces résultats est déjà discutée dans le paragraphe précédent, (voir paragraphe 4.1.1). L'augmentation des résistances aux jeunes âges est attribuée à la rapide hydratation du ciment, donc, théoriquement en augmentant le pourcentage du ciment, nous augmentons la performance mécanique des mélanges aux jeunes âges. L'écart entre la résistance du mélange traité avec 5% de ciment (0-5-3C3-1FS3) et avec celle de mélange traité avec 2% (0-2-3C2-1FS3) de ciment s'accroît avec l'âge de conservation.

Dans cette période de conservation, on voit que l'hydratation du ciment contribue énormément sur la résistance mécanique obtenue. Sur la figure V-45 on peut vérifier l'augmentation de la résistance grâce à l'ajout de 5% de ciment (voir B2 et B3). Le tableau V-11 nous donne la valeur exacte où la résistance du mélange traité avec 5% et 1% de fumée de silice (0-5-3C2-1FS3) donne une valeur de 1,97 MPa (à 28 jours). Par contre pour celle du mélange traité avec 2% de ciment et 1% de fumée de silice (0-2-3C2-1FS3) cette résistance est de 1,53 MPa (à 28 jours) soit 22,3% d'augmentation de la résistance grâce à l'ajout de 3% de plus de ciment. L'écart entre le mélange traité avec 2% et 5% de ciment diminue avec l'âge d'échantillon.

Tableau V-11 : Performances mécaniques obtenues sur le sédiment traité à 5% de ciment sans ajout de sable

Formulation	Jours						
	7	14	28	60	90	180	360
Sédiment non traité	0.53	0.98	1.18	1.24	1.31	1.33	1.36
0%Sab-2%Cim-3%chx(C2)-1%FS	0.83	0.98	1.53	1.84	1.91	2	2.04
0%Sab-5%Cim-3%chx(C2)-0%FS	0.9	1.38	1.72	1.89	1.91	1.92	1.93
0%Sab-5%Cim-3%chx(C2)-1%FS	0.92	1.48	1.97	2.09	2.12	2.14	2.16

L'augmentation de la résistance à 28 jours obtenue en ajoutant 3% de plus de ciment est 0,25 MPa soit 11,9% d'augmentation (voir tableau V-11). Cette valeur se réduit à 360 jours (voir D3 et D4 sur la figure V-45). Précisément, le tableau V-11 montre que la valeur exacte de l'écart de résistance entre le mélange traité par 3% et 5% de ciment est de 0,12 MPa qui représente 5,5% d'augmentation de la résistance avec un ajout de 3% de plus de ciment. Sur la figure V-45 l'évolution de la résistance après 90 jours du mélange traité avec 5% du ciment n'est plus importante par rapport au mélange traité avec 2% du ciment. L'augmentation de la résistance à cette période, est attribuée à la réaction pouzzolanique du liant utilisé. Il est possible que, l'ajout de ciment perturbe la réaction pouzzolanique de fumée de silice. Théoriquement, un ajout de ciment fournit une résistance aux jeunes âges grâce à la rapidité de hydratation de ciment. Ensuite, la réaction pouzzolanique de la fumée de silice fournit une résistance additionnelle.

L'effet de l'ajout de fumée de silice sur les performances mécaniques montre une augmentation de la résistance à partir de 28 jours (voir B4 sur la figure V-45) avec un écart important par rapport au mélange sans l'ajout de fumée de silice (voir B2 sur la figure V-45). Nous constatons que cet écart de résistance est bien conservé jusqu'à 360 jours (à long terme) voir D2 et D4 sur la figure V-45. Les valeurs de l'écart de la résistance entre le mélange sans et avec ajout de sable sont montrées sur le tableau V-11. L'écart de la résistance est 2,1% (à 7 jours), 6,7% (14 jours), 12,6%(à 28 jours), 9,5% (à 60 jours), 10,2% (à 180 jours) et 10,6% (à 360 jours).

5.2.2.1.a. Résultats et analyse des essais de gel-dégel

La première série d'essai de gel-dégel permet de comparer les résistances mécaniques en compression simple d'échantillons témoins âgés de 7 jours et ayant subi 21 cycles de gel-dégel avec des échantillons témoins de même âge et conservés à la température ambiante.

La figure V-46 montre une réduction des résistances en compression simple obtenues pour les essais de gel-dégel (1^{ère} série). Les résultats montrent que tous mélanges traités dépassent la valeur seuil pour une application dans les travaux routiers. L'ajout de 5% du ciment donne un effet positif sur l'augmentation de la résistance aux cycles de gel-dégel.

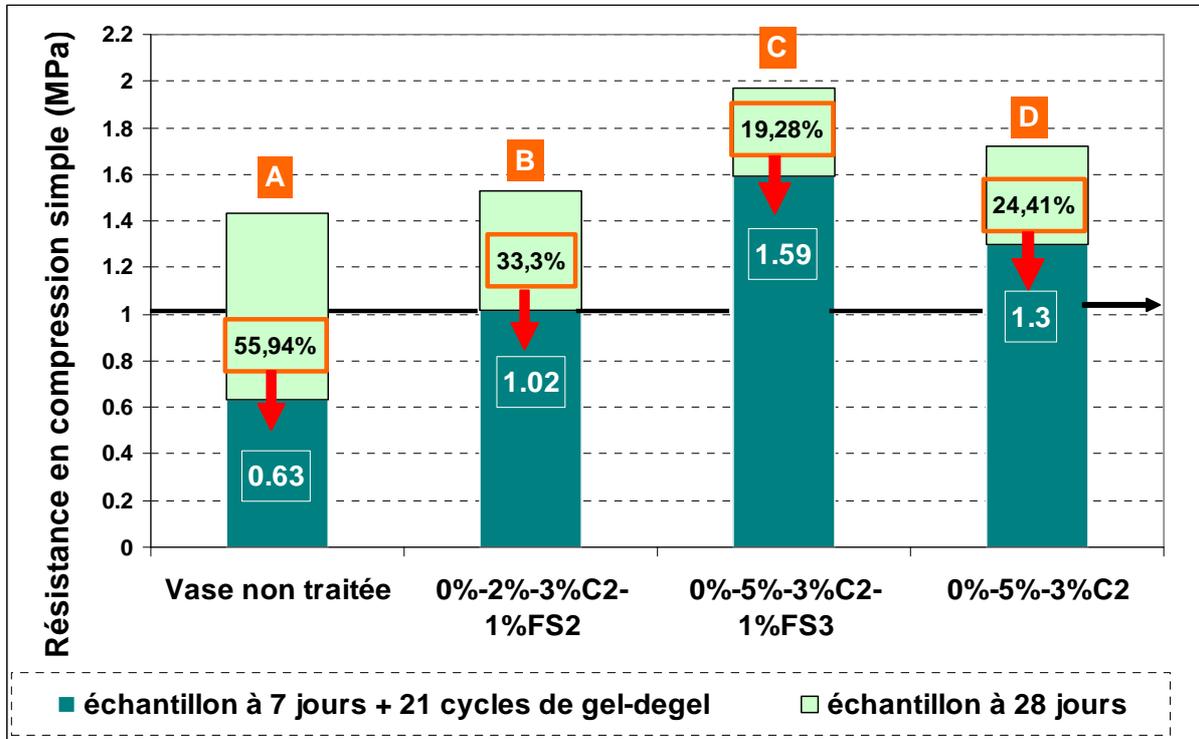


Figure V-46 : Evolution de la résistance en compression simple d'éprouvettes soumises à des cycles de mouillage-séchage sans l'ajout de sable (1^{ère} série)

La résistance du mélange avec 5% du ciment (voir C sur la figure V-46) montre une réduction assez faible (19,29%) par rapport au mélange traité avec 2% du ciment (voir B sur la figure V-46). L'augmentation de la valeur de résistance aux cycles de gel-dégel attribué à l'ajout de 5% du ciment atteint 35,84% (voir B et C sur la figure V-46). L'effet d'un ajout de 1% de fumée de silice est également observé sur la figure V-46 (voir C et D sur la figure V-46). La résistance aux cycles de gel-dégel augmente en ajoutant de la fumée de silice, elle passe de 1,3 MPa à 1,59 MPa, soit 18,23% d'augmentation de résistance après être soumis les cycles de gel-dégel. L'augmentation de cette résistance est due aux fines particules de la fumée de silice, qui réduit la porosité en occupant les espaces vides entre les particules du sédiment et du ciment. La réaction pouzzolanique de la fumée de silice ne donne pas un effet immédiat sur cette augmentation de résistance. Nous estimons qu'après la phase de gel-dégel (après 7 jours) la réaction pouzzolanique ne se déroule pas normalement, la température a un effet très important dans la réussite de la réaction de pouzzolanique : plus la température augmente plus la réaction pouzzolanique s'opère. Nous pouvons conclure que les fines particules de la fumée de silice sont responsables de cette augmentation.

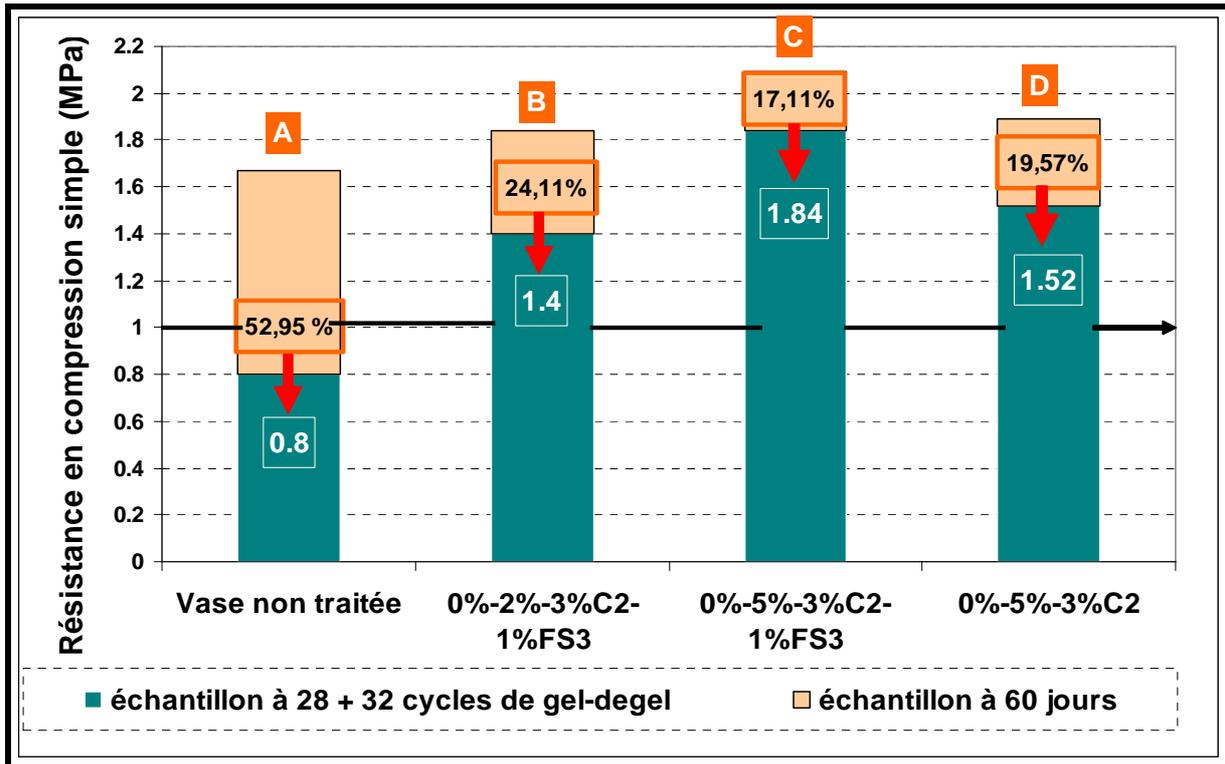


Figure V-47 : Evolution de la résistance en compression simple d'éprouvettes soumises à des cycles de mouillage-séchage sans l'ajout de sable (2^{ème} série)

La deuxième série permet une comparaison des résistances mécaniques en compression simple avec des échantillons témoins âgés de 28 jours ayant subi 32 cycles de gel-dégel avec des échantillons témoins du même âge (60 jours) conservés à la température ambiante. La tendance d'évolution de la résistance est presque identique à celle de la 1^{ère} série, mais avec des valeurs de résistance plus élevées. L'ajout de 5% de ciment apporte une augmentation en résistance d'environ 23,91% par rapport au mélange avec 2% de ciment (voir B et C sur la figue V-47). L'âge de conservation des éprouvettes à l'air libre également fournit une augmentation de résistance. Le mélange avec 5% de ciment atteint 23,58% d'augmentation de résistance par rapport la 1^{ère} série. Pour le mélange à 2% de ciment celle-ci est de 27,14%. Pour le mélange sans fumée de silice, un faible pourcentage augmentation de la résistance (14,4%) est observé. L'augmentation des résistances est assez importante pour les mélanges traités avec la fumée de silice grâce à la réaction de pouzzolanique qui fournit une résistance additionnelle.

5.2.2.1.b. Résultats et analyse des essais de mouillage-séchage

Les résultats de la première série ne peuvent pas être présentés car les éprouvettes ont été détériorées durant l'essai de mouillage-séchage. Nous pouvons conclure que malgré l'augmentation des pourcentages de ciment, à l'âge de 7 jours, la sensibilité des éprouvettes aux cycles de mouillage-séchage est très importante. L'éprouvette nécessite plus de temps pour se solidifier avant être soumise aux cycles de mouillage-séchage.

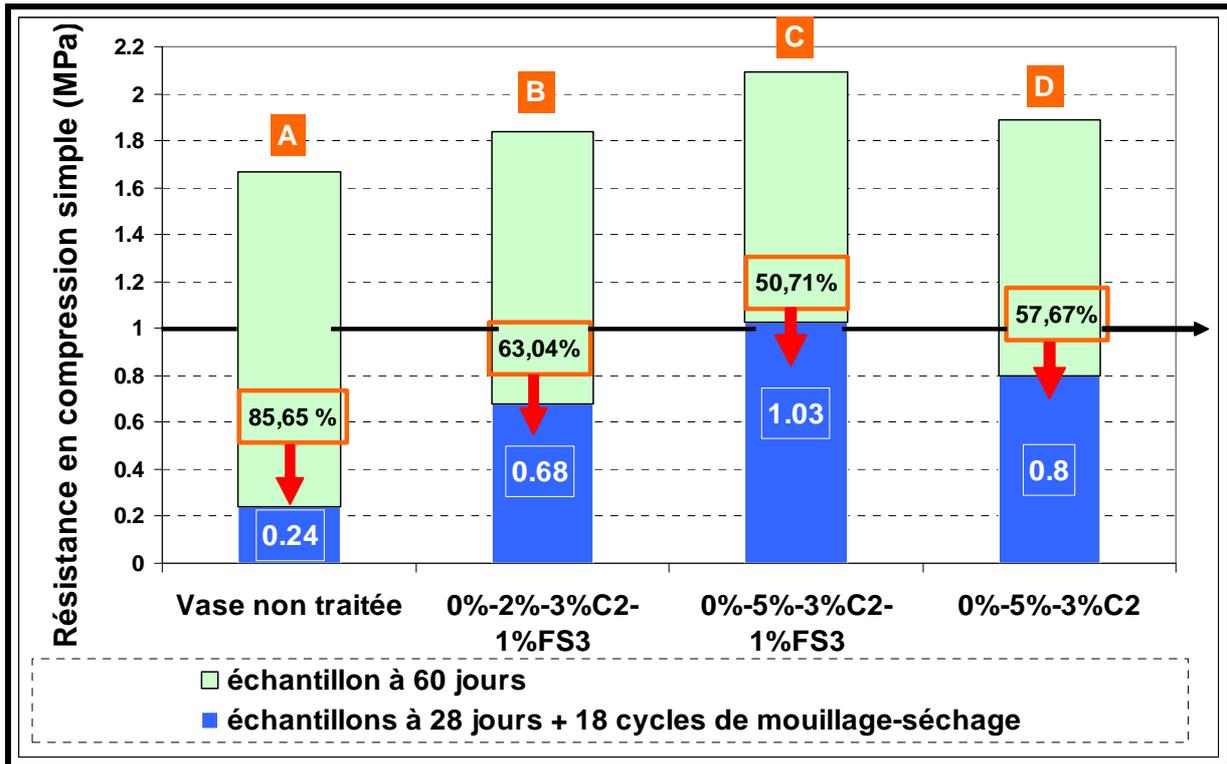


Figure V-48 : Evolution de la résistance en compression simple d'éprouvettes soumises à des cycles de mouillage-séchage sans l'ajout de sable (2^{ème} série)

La figure V-48 montre une réduction des résistances en compression simple obtenues pour les essais de mouillage-séchage pour la 2^{ème} série. Après 28 jours de conservation à l'air libre, les éprouvettes sont soumises aux cycles de mouillage-séchage. Tout d'abord, nous pouvons voir que des quatre mélanges appliqués, seul le mélange avec 5% du ciment a une valeur de résistance dépassant 1 MPa (voir C sur la figure V-48).

Nous pouvons également observer que la valeur de résistance aux cycles de mouillage-séchage pour le mélange sans fumée de silice (voir figure D sur la figure V-20) fournissent une valeur supérieure à celle du mélange avec de la fumée de silice mais avec 2% de ciment (voir B sur la figure V-48).

L'augmentation de la résistance aux cycles de mouillage-séchage grâce à l'ajout de 3% supplémentaire de ciment est vaut environ 33,98%. (voir B et C sur la figure V-48). L'augmentation de la résistance aux cycles de mouillage-séchage provoquée par un ajout de 1% de fumée de silice est d'environ 22,33%. Ces résultats montre qu'un ajout de 3% de plus de ciment a un effet plus important que l'ajout de 1% de fumée de silice sur la résistance aux cycles de mouillage-séchage.

Traitement avec un ajout de sable.

5.2.3. Traitement avec un ajout de 5% de sable.

La variation de résistance aux jeunes âges soit à 7 jours, montre que les mélanges présentant une résistance importante sont les mélanges avec 5% du ciment et 5% de sable (voir A4 sur la figure V-49). La figure V-49 présente le mélange traité avec 5% de ciment mais sans un ajout de sable (voir A3 sur la figure

V-49) celle du mélange avec 2% de ciment et le mélange sans traitement (voir A1 sur la figure V-49). Donc nous pouvons résumer qu'à cet âge (7 jours) l'ajout de 5% de ciment a un effet plus important pour avoir une meilleure résistance d'éprouvette.

Au terme de 28 jours, l'effet de la réaction pouzzolanique de la fumée de silice commence à se faire sentir sur l'augmentation des performances mécaniques. Sur la figure V-49 les mélanges dont la résistance est la plus importante sont les mélanges avec 1% de fumée de silice et 5% de ciment (voir B3 sur la figure V-21) le mélange sans l'ajout de sable a la meilleure résistance jusqu'à 90 jours (voir C4 sur la figure V-49), au-delà de ces 90 jours c'est la résistance des mélanges avec 5% de sable qui est meilleure avec un faible écart d'environ 3,18% (D3 sur la figure V-49, le tableau V-11). D'après ces résultats nous pouvons estimer que l'ajout de 5% de sable donne une augmentation de la résistance aux jeunes âges (7-14 jours) et à long terme (180-360 jours).

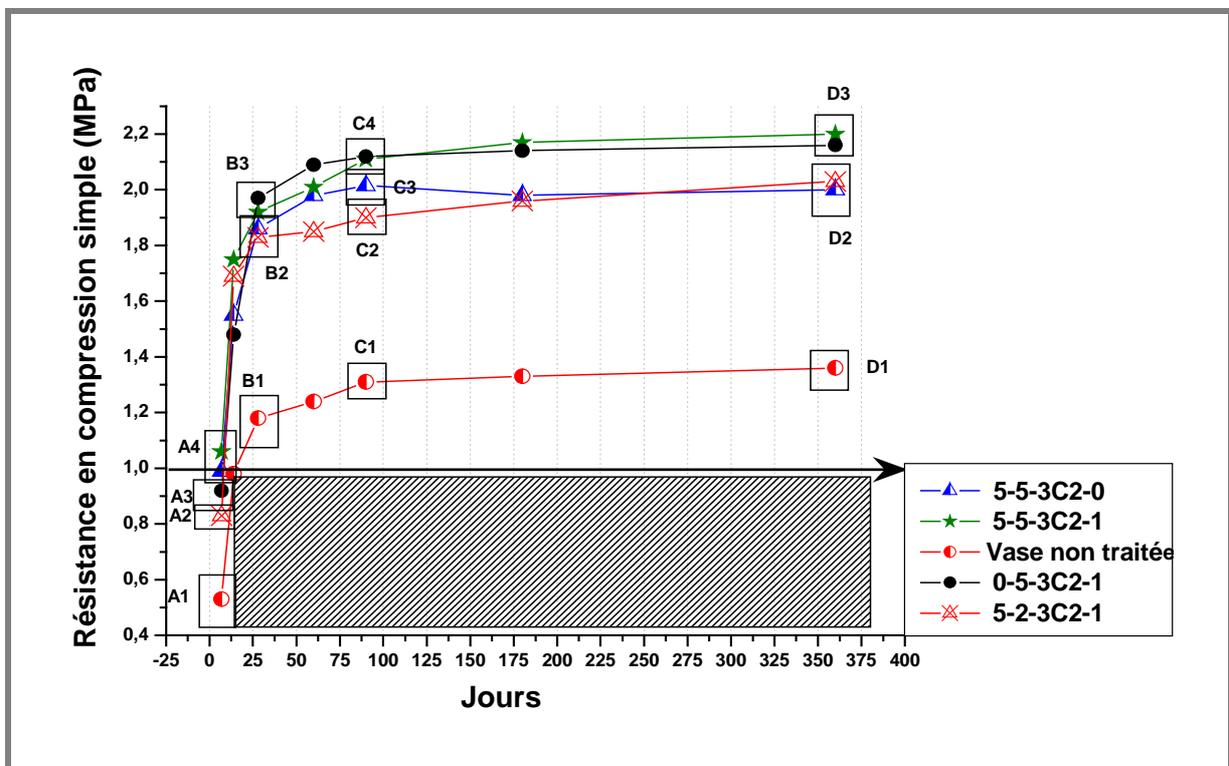


Figure V-49 : Performances mécaniques obtenues sur les sédiments traités aux 5% de ciment et un ajout de 5% de sables

La présence de 5% de sable dans les mélanges (figure V-49), apporte une augmentation significative de la performance mécanique par rapport aux résultats précédents (traitement sans sable). Par rapport au mélange sans un ajout de sable (0-5-3C2-1), le mélange avec 5% de sable montre une augmentation de la résistance d'environ 14% à 7 jours, 15,42% à 14 jours, 1,38% à 180 jours et 3,1% à 360 jours. Par contre, pour la période entre 28 jours à 90 jours, l'ajout de 5% de sable provoque une légère diminution de résistance (voir B3 et C4 sur la figure V-49).

L'effet de l'ajout de 1% de fumée de silice (entre les mélanges 5-5-3C2-0FS et 5-5-3C2-1FS3) ne donne pas assez d'augmentation de résistance à 7 jours (voir A4 sur la figure V-49) mais à partir de 14 jours, l'effet de ajout commence à se mettre en valeur. A 90 jours cet effet fournit une augmentation d'environ 4,79% (voir

C4 et C3) et celle ci devient plus importante avec l'âge des éprouvettes. A 360 jours, l'augmentation de la résistance est d'environ 9% (voir D2 et D3 sur la figure V-49).

Tableau V-12 : Performances mécaniques obtenues sur les sédiments traités à 5% de ciment et avec un ajout de 5% de sable

Formulation	Jours						
	7	14	28	60	90	180	360
Vase non traité	0.53	0.98	1.18	1.24	1.31	1.33	1.36
5%Sab-5%Cim-3%chx(C2)-0%FS	0.99	1.55	1.86	1.98	2.015	1.98	2
5%Sab-5%Cim-3%chx(C2)-1%FS	1.06	1.75	1.92	2.01	2.11	2.17	2.2
5%Sab-2%Cim-3%chx(C2)-1%FS	0.83	1.69	1.83	1.85	1.9	1.96	2.03
0%Sab-5%Cim-3%chx(C2)-1%FS	0.92	1.48	1.97	2.09	2.12	2.14	2.13

L'effet de l'ajout du ciment (entre les mélanges 5-2-3C2-0FS3 et 5-5-3C2-0FS3) a un effet major et plus important que celui de l'ajout de la fumée de silice. L'augmentation de la résistance à 7 jours est environ 21,69% (voir A2 et A4 sur la figure V-49) à 28 jours d'environ 4,68% (voir B2 et B3). A 90 jours il est d'environ 9,95% (voir C2 et C4) et à 360 jours l'effet de l'ajout de ciment a une augmentation de 7,72%. Les résultats montrent qu'avec une quantité de fumée de silice identique (1%) l'augmentation provoquée par l'ajout du ciment donne une forte augmentation à jeunes âges.

5.2.3.1. Résultats et analyse des essais de gel-dégel

La figure V-50 montre une réduction des résistances en compression simple obtenues aux l'essais de gel-dégel dans la 1^{ère} série. Les résultats concernant tous mélanges traités dépassent 1 MPa. Cette valeur est la valeur nécessaire pour une application en travaux routiers. La tendance d'évolution de la résistance aux cycles de gel-dégel est similaire avec celles des résultats qui précèdent (figure V-46).

Le mélange traité avec 5% de ciment et 5% de sable avec 1% de fumée de silice (5%-5%-3%C2-1%FS3) fournit une meilleure résistance aux cycles de gel-dégel (voir C sur la figure V-50). Ce mélange a une plus faible diminution de la résistance aux cycles de gel-dégel (16,14%) et la meilleure résistance (1,61 MPa). L'effet d'un ajout de fumée de silice peut être identifié en comparant ce mélange avec le mélange avec 5% de ciment, 5% de sable et sans l'ajout de fumée de silice (5%-5%-3%C2). En observant C et D sur la figure V-50 nous pouvons constater que l'ajout de 1% de fumée de silice donne une augmentation de la résistance d'environ 7,45%.

L'effet d'un ajout de 5% de ciment sur la résistance aux cycles de gel-dégel peut être identifier en comparant la résistance des mélanges 5%-2%-3%C2-%1FS3 (voir B sur la figure V-50) avec celle du mélange 5%-5%-3%-1%FS3 (voir C). L'ajout de 5% de ciment provoque une augmentation de la résistance de 14,28%. L'ajout de d'une quantité supplémentaire de ciment provoque plus de produits résultant d'hydratation qui réalise une liaison importante entre les particules du ciment ce qui diminue la porosité et rend l'éprouvette plus solide et plus résistante aux cycles de gel-dégel.

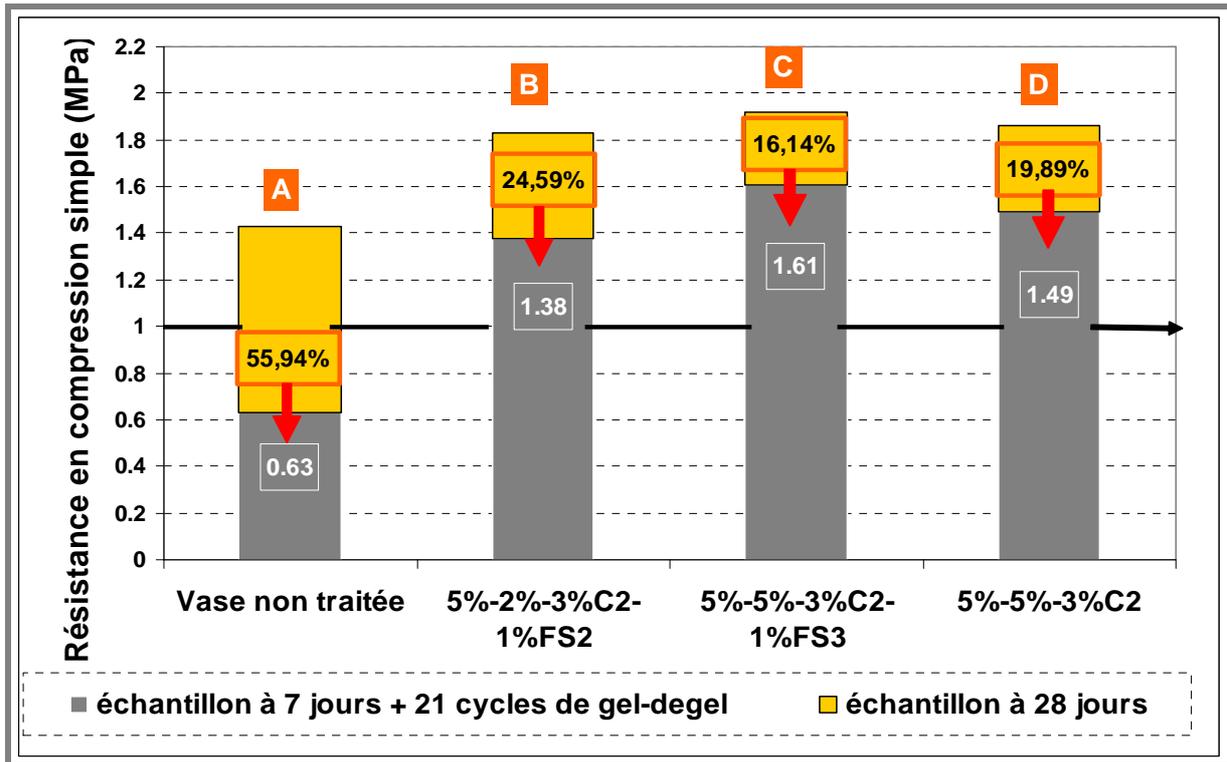


Figure V-50 : Evolution de la résistance en compression simple des éprouvettes soumises à des cycles de mouillage-séchage avec l'ajout de 5% de sable (1^{ère} série)

Les résultats d'essais gel-dégel de la 2^{ème} série sont présentés sur la figure V-51, ces résultats montrent que tous mélanges traités dépassent 1 MPa, la tendance d'évolution de la résistance aux cycles de gel-dégel est similaire à celles de la 1^{ère} série (voir figure V-50).

L'effet d'un ajout de fumée de silice sur l'évolution de la résistance peut être identifié en comparant le mélange 5%-5%-3%C2-1%FS3 (voir V sur la figure V-51) avec le mélange 5%-5%-3%C2 (voir D). Cet effet d'un ajout de 1% de fumée de silice fournit une augmentation de la résistance aux cycles de gel-dégel d'environ 8,7%. Cette valeur d'augmentation est la plus élevée que celle de la 1^{ère} série (7,45%). La réaction pouzzolanique de la fumée de silice est la raison de cette différence, dans la 2^{ème} série les éprouvettes sont laissées plus long temps en conservation à l'air libre 20 jours. Ceci permet de laisser du temps à la réaction pouzzolanique pour se mettre en œuvre.

Pour identifier l'effet de l'ajout de 5% de ciment sur la résistance aux cycles de gel-dégel, nous avons comparé la résistance des mélanges 5%-2%-3%C2-1%FS3 (voir B sur la figure V-51) avec celles des mélanges 5%-5%-3%-1%FS3 (voir C). L'ajout de 5% de ciment provoque une augmentation de la résistance de 11,41%. Cette valeur d'augmentation de la résistance est inférieure à celle des essais de la 1^{ère} série (14,28%). Nous estimons que cette différence est provoquée par l'hydratation du ciment qui fournit essentiellement la résistance aux jeunes âges et qui est presque achevée au bout de 14 jours.

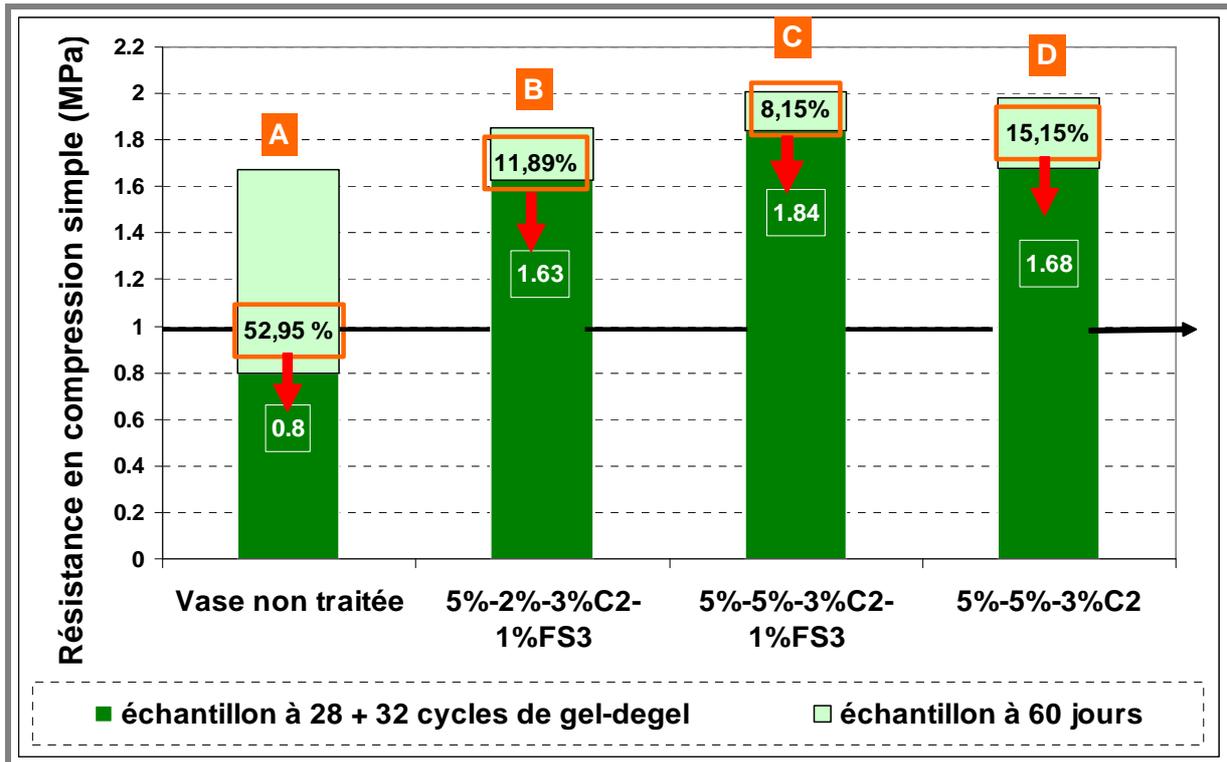


Figure V-51 : Evolution de la résistance en compression simple des éprouvettes soumises à des cycles de gel-dégel avec un ajout de 5% de sable (2^{ème} série)

5.2.3.1.b. Résultats et analyse des essais de mouillage-séchage

Les résultats de la première série d'essais ne peuvent pas être présentés car les éprouvettes se sont détériorées durant l'essai de mouillage-séchage. Nous pouvons seulement conclure que malgré l'augmentation du pourcentage du ciment, à l'âge de 7 jours, la sensibilité des éprouvettes aux cycles de mouillage-séchage est très importante. L'éprouvette nécessite plus de temps pour se solidifier avant être soumise aux cycles de mouillage-séchage.

La figure V-52 montre une réduction des résistances en compression simple obtenues pour les essais de mouillage-séchage de la 2^{ème} série. Après 28 jours de conservation à l'air libre, les éprouvettes sont soumises aux cycles de mouillage-séchage. Premièrement, nous pouvons voir que des 4 mélanges appliqués, les quatre mélanges avec 5% du ciment (5%-5%-3%C2-1%FS3 et 5%-5%-3%C2) ont des valeurs de résistance qui dépassent 1 MPa (voir C et D sur la figure V-52).

L'effet d'augmentation du pourcentage de ciment (5%) provoque une amélioration de la résistance à sa sensibilité à l'eau (aux cycles de mouillage-séchage). La valeur de cette augmentation de résistance est environ 35,29%. Cette augmentation assez importante aux cycles de mouillage-séchage justifie notre choix d'avoir augmenté le pourcentage de ciment. Grâce à la rapidité de l'hydratation du ciment, elle fournit une résistance immédiate et un durcissement de l'éprouvette. Avec la présence de produits résultants de l'hydratation du ciment, la liaison entre particules devient plus importante et plus stable ce qui empêche l'eau de pénétrer dans les espaces vides donc la résistance des éprouvettes à la sensibilité à l'eau s'améliore. C'est la raison pour laquelle nous pensons que l'ajout d'un pourcentage

de ciment est nécessaire pour avoir une valeur de résistance aux cycles de mouillage-séchage qui dépasse 1 MPa.

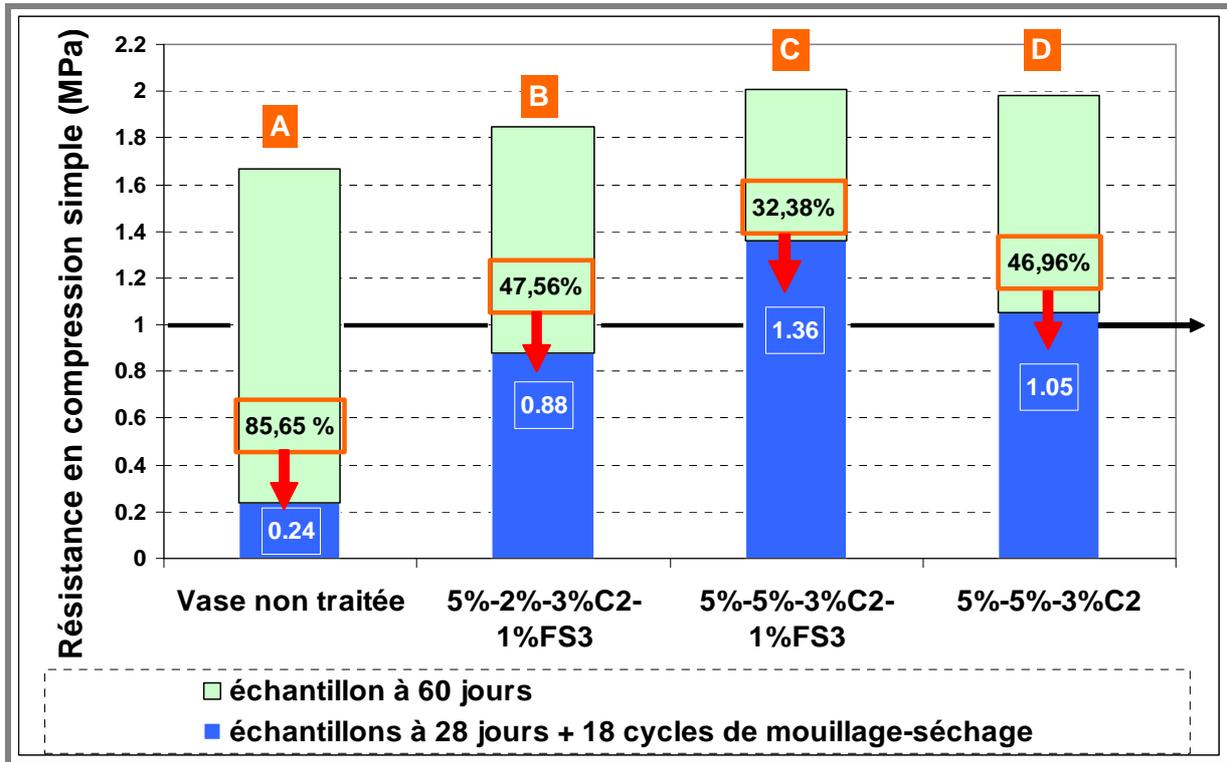


Figure V-52 : Evolution de la résistance en compression simple d'éprouvettes soumises à des cycles de mouillage-séchage avec l'ajout de 5% de sables (2^{ème} série)

De tous les résultats à l'essai de mouillage-séchage précédents, seuls les mélanges sans ajout de sable et avec 5% de ciment (0%5%-3%C2-1%FS3, voir figure C sur la figure V-52) possède une valeur de résistance de 1 MPa (1,03 MPa). Mais l'ajout de 5% de sable permet d'avoir une résistance plus sûre. Donc après avoir augmenté le pourcentage de ciment à 5%, nous pouvons confirmer que les résultats des mélanges avec 5% de sable et 5% de ciment (5%-5%-3%C2-1%FS) atteignent une valeur de résistance de 1,36 MPa (voir C sur la figure V-52. Cette valeur de résistance est suffisante pour une application en travaux routiers.

L'effet de l'ajout de 1% de fumée de silice peut également être identifié sur la figure V-24, en observant C et D. Nous pouvons constater que l'ajout de sable provoque une augmentation de la résistance aux cycles de mouillage-séchage d'environ 22,79%. L'ajout de fumée de silice dans le mélange renforce essentiellement les liaisons entre les particules de sédiment et les produits d'hydratation du ciment et donne une amélioration de performance vis-à-vis leur sensibilité à l'eau

5.2.4. Traitement avec un ajout de 10% de sable.

L'ajout de 10% de sable provoque une nette variation d'évolution des résistances aux jeunes âges (à 7 jours). Sur la figure V-53, nous pouvons voir que les mélanges avec 5% de ciment et 5% de sable (voir A3 sur la figure V-53) présente une résistance plus élevée. Ensuite les mélanges 10-5-3C2-1FS3 et 0-5-3C2-1FS3 (voir A2 sur la figure V-53) présentant des résistances plus faibles, suivies par

celles du mélange sans traitement (voir A1 sur la figure V-53). Donc nous pouvons résumer qu'à cet âge (7 jours) l'ajout de 10% de ciment provoque une diminution de la résistance aux jeunes âges (7 jours). L'effet de l'ajout de fumée de silice entre les mélanges avec 10% de sable peut également être identifié (voir 10-5-3C2-0 et 10-5-3C2-1 sur la figure V-53). L'ajout de 1% de fumée de silice sur les mélanges avec 10% de sable ne montre aucun effet significatif sur la résistance en compression simple.

A 28 jours, le mélange sans ajout de sable (0-5-3C2-1) a une valeur de résistance supérieure aux autres (voir V4 sur la figure V-53) et suivi par le mélange avec 5% de sable (5-5-3C2-1). Dans cette période nous pouvons remarquer que la diminution de la résistance diminue avec l'ajout de pourcentage de sable (voir B4, B3 et B2 sur la figure V-53). Donc, d'après ces résultats, nous pouvons résumer que dans cette période de conservation, l'ajout de sable diminue la réaction de pouzzolanique qui ne peut pas fournir une résistance additionnelle. Ceci peut être expliqué par les caractéristiques du sable qui sont chargés de matières organiques. A cette période de 28 jours, nous pouvons également constater l'effet de l'ajout de 1% de fumée de silice sur les mélanges avec 10% de sable en comparant le mélange 10-5-3C2-0 et 10-5-3C2-1 (voir B2 et B3).

La réactivité de la réaction pouzzolanique de la fumée de silice commence à donner un effet sur l'augmentation de la performance mécanique. L'augmentation de cette résistance est d'environ 5,52% (voir tableau 12).

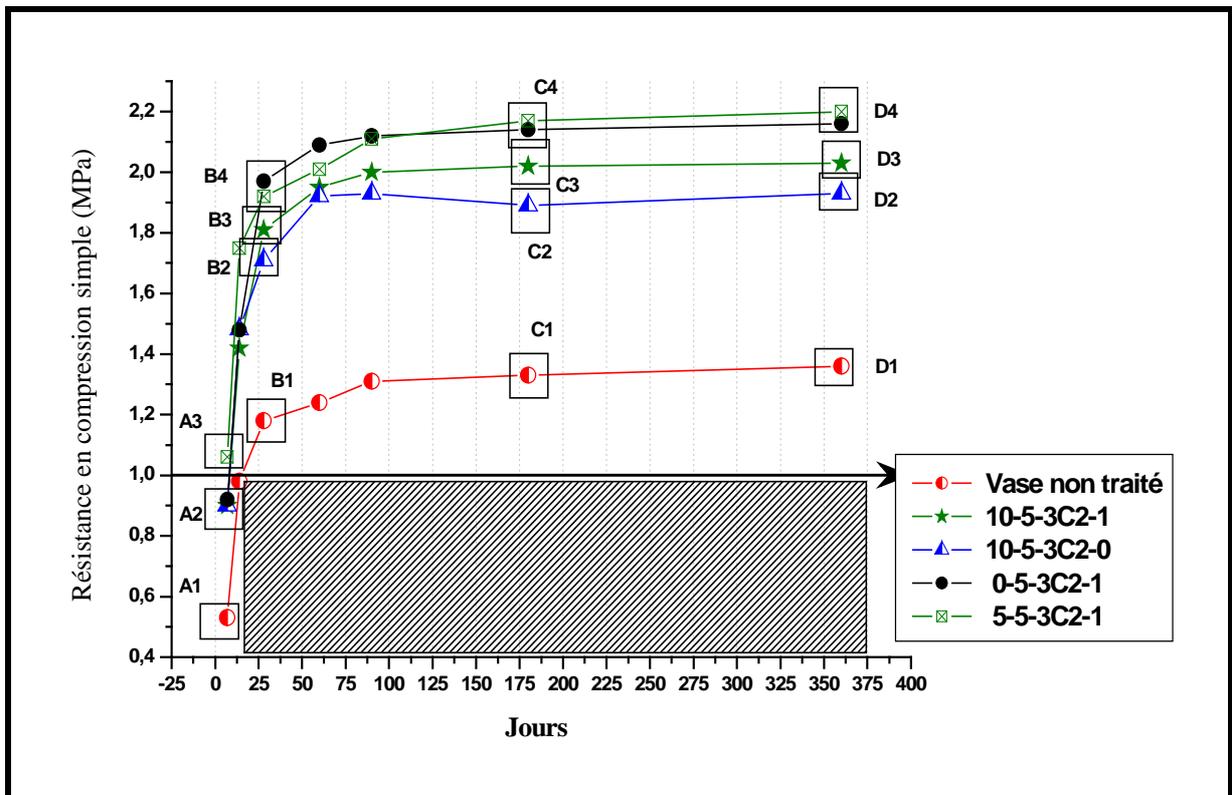


Figure V-53 : Performances mécaniques obtenues sur le sédiment traité aux à deux différents types de fumée de silice avec ajout de 10% de sable

L'évolution de la résistance à long terme (de 180 à 360 jours) montre que le mélange avec 5% de sable (5-5-3C2-1) est la meilleure composition (voir C4 et D4 sur la figure V-53, suivie avec une faible différence de valeur de résistance par le mélange sans ajout de sable (0-5-3C2-1).

Tableau V-13: Performance mécanique obtenues sur le sédiment traité à 5% de ciment et l'ajout de 10% de sables

Formulation	Jours						
	7	14	28	60	90	180	360
Vase non traité	0.53	0.98	1.18	1.24	1.31	1.33	1.36
10%Sab-2%Cim-3%chx(C2)-1%FS3	0.9	1.42	1.81	1.95	2	2.02	2.03
10%Sab-2%Cim-3%chx(C2)-0%FS3	0.9	1.482	1.71	1.921	1.93	1.89	1.93
5%Sab-5%Cim-3%chx(C2)-1%FS	1.06	1.75	1.92	2.01	2.11	2.17	2.2
0%Sab-5%Cim-3%chx(C2)-1%FS	0.92	1.48	1.97	2.09	2.12	2.14	2.13

Par contre, l'ajout de 10% de sable (10-5-3C2-1) provoque une diminution de la résistance à long terme (360 jours) d'environ 7,2% par rapport au mélange avec 5% de sable (5-5-3C2-1). L'effet de l'ajout de 1% de fumée de silice sur les mélanges avec 10% de sable donne une augmentation de la résistance à long terme (360 jours) environ 4,5% (voir tableau V-13).

5.2.2.1.a. Résultats et analyse des essais de gel-dégel

La figure V-54 montre une réduction de résistances en compression simple obtenues pour l'essai de gel-dégel de la 1^{ère} série. Les résultats montrent que tous les mélanges traités ont dépassé 1 MPa, valeur seuil retenue.

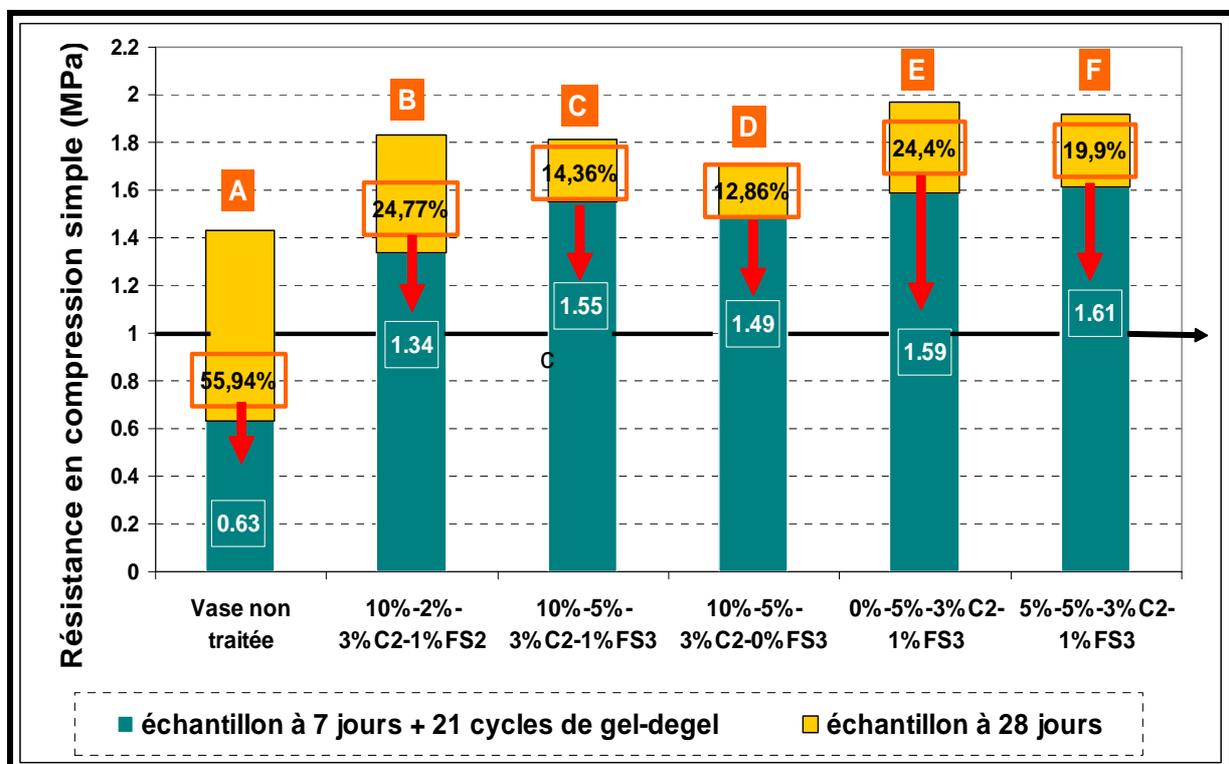


Figure V-54 : Evolution de la résistance en compression simple des éprouvettes soumises à des cycles de gel-dégel avec l'ajout de 10% de sable (1^{ère} série).

Le mélange traité avec 5% de ciment et 5% de sable avec 1% de fumée de silice (5%-5%-3%C2-1%FS3) donne toujours la meilleure résistance aux cycles de gel-dégel (voir F sur la figure V-54). Ce mélange a une plus faible diminution de la résistance aux cycles de gel-dégel (16,14%) et une meilleure résistance à la compression simple (1,61 MPa).

L'effet d'ajout de fumée de silice peut être identifié en comparant ce mélange le mélange avec 1% de fumée de silice, 10% de sable et sans ajout de fumée de silice (10%-5%-3%C2-1%FS3 et 10%-5%-3%C2-0%FS3). En regardant C et D sur la figure V-54 nous pouvons constater que l'ajout de 1% de fumée de silice leur donne une augmentation de la résistance à la compression simple d'environ 3,8%, par rapport à leur valeur de résistances ; 1,55 MPa et 1,49 MPa.

L'effet d'ajout de 5% de ciment sur la résistance aux cycles de gel-dégel peut s'identifier en comparant la résistance des mélanges 10%-2%-3%C2-1%FS3 (voir B sur la figure V-4) avec celle des mélanges 10%-5%-3%-1%FS3 (voir C). Ainsi l'ajout de 5% de ciment provoque une augmentation de la résistance de 13,54% (par rapport à leurs valeurs de 1,34 MPa et 1,55 MPa). En comparant le pourcentage d'augmentation de la résistance obtenue après les cycles de gel-dégel nous pouvons remarquer que l'ajout de 5% ciment provoque une augmentation plus importante que l'ajout de 1% de fumée de silice.

Sur la figure V-54 nous pouvons constater l'effet d'un ajout de sable sur la résistance aux cycles de gel-dégel en observant D, E et F sur la figure V-54. Si on compare avec le mélange sans ajout de sable (0%-5%-3%C2-1%FS3) et avec un ajout de 5% de sable (5%-5%-3%C2-1%FS3) ce dernière ne donne aucune augmentation de la résistance aux cycles de gel-dégel. Par contre un ajout de 10% de sable provoque une diminution de la résistance aux cycles de gel-dégel environ 6,5% (voir F et D sur la figure V-54)

Les résultats des essais de gel-dégel de la 2^{ème} série ont été présentés sur la figure V-55. Ces résultats montrent que tous les mélanges traités dépassent 1 MPa, valeur seuil. Le mélange avec 5% de sable et 5% de ciment fournit toujours une meilleure performance parmi les autres mélanges.

Dans cette deuxième série, l'effet de l'ajout de fumée de silice a été identifié en comparant ce mélange avec le mélange avec 1% de fumée de silice, 10% de sable et sans ajout de fumée de silice (10%-5%-3%C2-1%FS3 et 10%-5%-3%C2-0%FS3). Le pourcentage d'augmentation de la résistance provoqué par l'ajout de 5% de ciment est d'environ 4,76% (voir C et D sur la figure V-55). Le pourcentage d'augmentation de la résistance dans cette deuxième série est inférieur à celui de la 1^{ère} série (2,3%). Nous estimons que cette diminution de pourcentage de la résistance est due à l'âge des éprouvettes avant aux cycles de gel-dégel. La période de 28 jours ne suffit pas pour achever le maximum de réaction pouzzolanique de la fumée de silice. La raison de l'augmentation du pourcentage de la résistance dans la première série qui est plus élevée, est que l'ajout de fumée de silice joue un rôle de remplisseur d'espaces vides entre les particules. Ceci donne un résultat immédiat sur l'hydratation du ciment et fournit de la résistance aux éprouvettes.

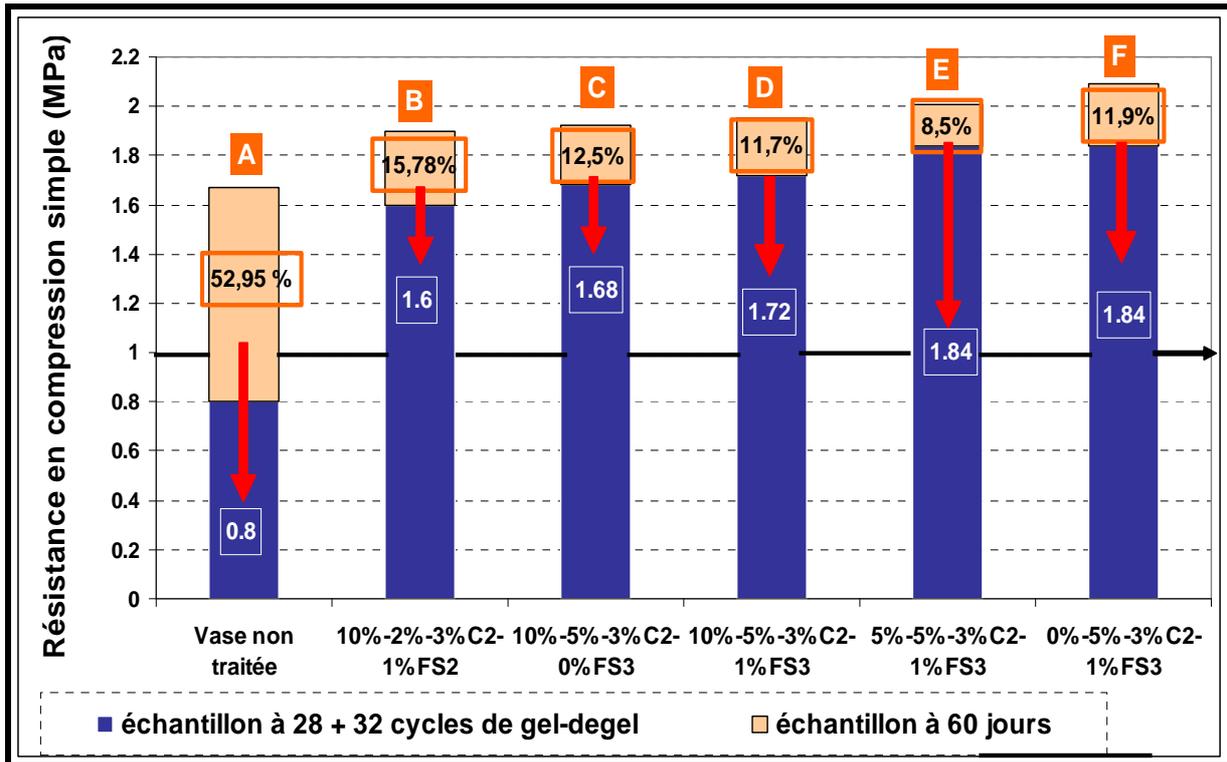


Figure V-55: Evolution de la résistance en compression simple des éprouvettes soumises à des cycles de mouillage-séchage avec un ajout de 10% de sable (2^{ème} série)

L'effet d'un ajout de 5% de ciment sur la résistance aux cycles de gel-dégel peut s'expliquer en comparant la résistance des mélanges 10%-2%-3%C2-1%FS3 (voir B sur la figure V-55) avec celle des mélanges 10%-5%-3%-1%FS3 (voir D). Ces résultats montrent qu'un ajout de 5% de ciment provoque une augmentation de résistance de 7%, par rapport aux valeurs de résistances obtenue ; 1,6 MPa et 1,72 MPa.

Sur la figure V-55 (voir D, E et F), l'effet de l'ajout de sable sur la résistance aux cycles de gel-dégel a été identifié en comparant les 3 mélanges; à savoir le mélange sans ajout de sable (0%-5%3%C2-1%FS3), avec 5% de sable (5%-5%3%C2-1%FS3) et 10% de sable (10%-5%3%C2-1%FS3). D'après ces résultats nous confirmons que l'ajout de 5% de sable provoque une augmentation de la résistance mais l'ajout de 10% de sable la diminue.

5.2.2.1.b. Résultats et analyse des essais de mouillage-séchage

La figure V-56 montre une réduction des résistances en compression simple obtenues pour les essais de mouillage-séchage de la 2^{ème} série. Après 28 jours de conservation à l'air libre, les éprouvettes sont soumises aux cycles de mouillage-séchage.

Nous pouvons voir que des quatre mélanges appliqués, les mélanges avec 10% de sable et 2% de ciment (10%-2%-3%C2-1%FS3) donnent la valeur de résistances inférieures à 1 MPa (voir B sur la figure V-56).

L'effet d'un ajout de 5% de ciment augmente la résistance d'environ 29,82%. Cette augmentation peut être identifiée en comparant les mélanges 10%-2%-3%C2-

1%FS3 et 10%-5%-3%C2-1%FS3 (voir B et C sur la figure V-56). Cette forte augmentation de pourcentage de la résistance s'est déjà produite dans l'essai précédent. Comme déjà dit, l'ajout de 5% de ciment fournit une assez importante augmentation de la résistance avec les mélanges sans ajout de sable, avec de 5% de sable ou 10% de sable.

L'effet de l'ajout de fumée de silice provoque également une assez importante augmentation de la résistance aux cycles de mouillage-séchage (mélange 10%-5%-3%C2-1%FS3 avec 10%-5%-3%C2-0%FS3, voir C et D sur la figure V-56)

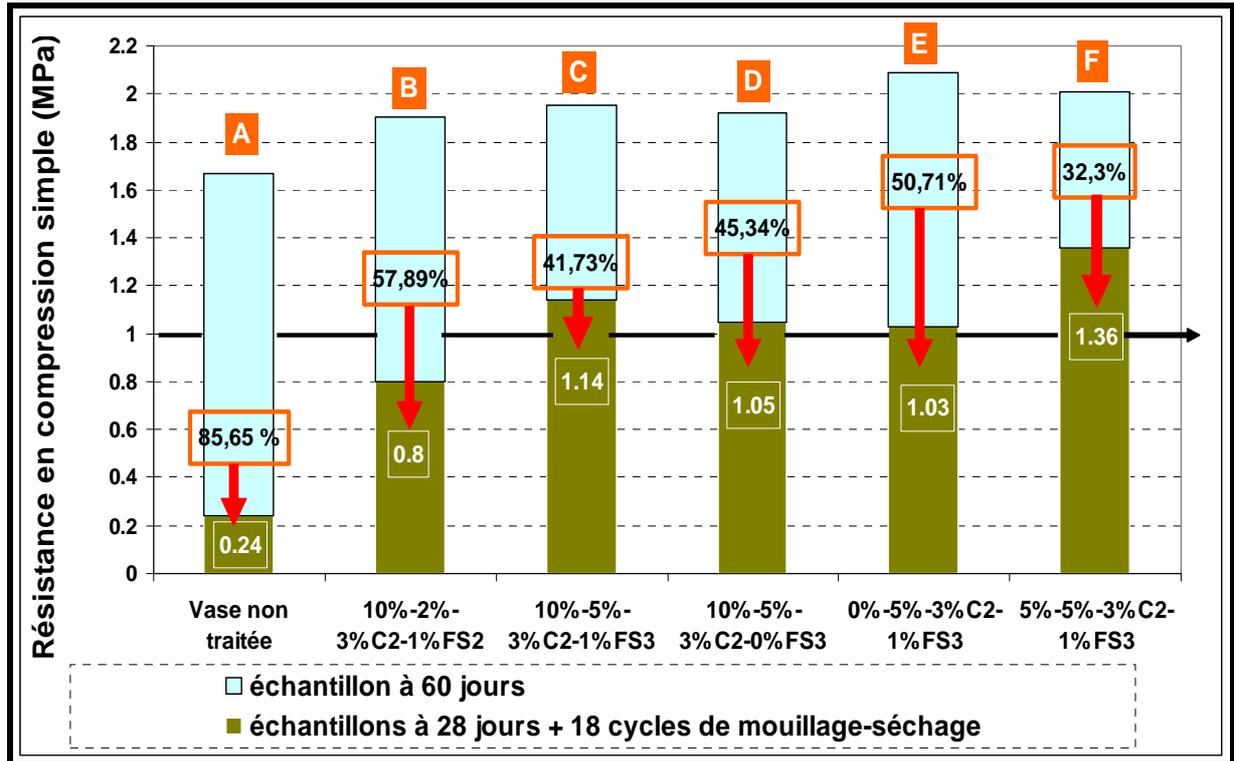


Figure V-56 : Evolution de la résistance en compression simple d'éprouvettes soumises à des cycles de mouillage-séchage avec l'ajout de 10% sables (2^{ème} série)

Le pourcentage de cette augmentation de résistance est d'environ 7,9%. La valeur de la résistance obtenue nous confirme également que l'ajout de 1% de fumée de silice apporte une meilleure résistance aux cycles de mouillage-séchage (1,36 MPa) avec le mélange avec 5% de sable et 5% de ciment (voir D, E et F sur la figure V-57)

5.2.5. Traitement avec un ajout de 5% de sables

L'ajout d'un pourcentage de sable jusqu'à 15% a été établi pour connaître la performance mécanique des éprouvettes. La présence de sable dans le mélange jusqu'au présent montre que l'ajout de 5% de sable donne une meilleure performance mécanique.

La variation de résistance aux jeunes âges (à 7 jours) montre que les mélanges qui donne une résistance la plus élevée sont les mélanges avec 5% du ciment et 5% de sable (voir A3 sur la figure V-57). Ensuite suivi par les autres mélanges (voir A2 sur la figure V-57) et en dernier est le mélange sans traitement

(voir A1 sur la figure V-57). Donc nous pouvons résumer qu'à cet âge (7 jours) l'ajout de 5% de ciment a un effet positif sur le relatif les résistances des éprouvettes.

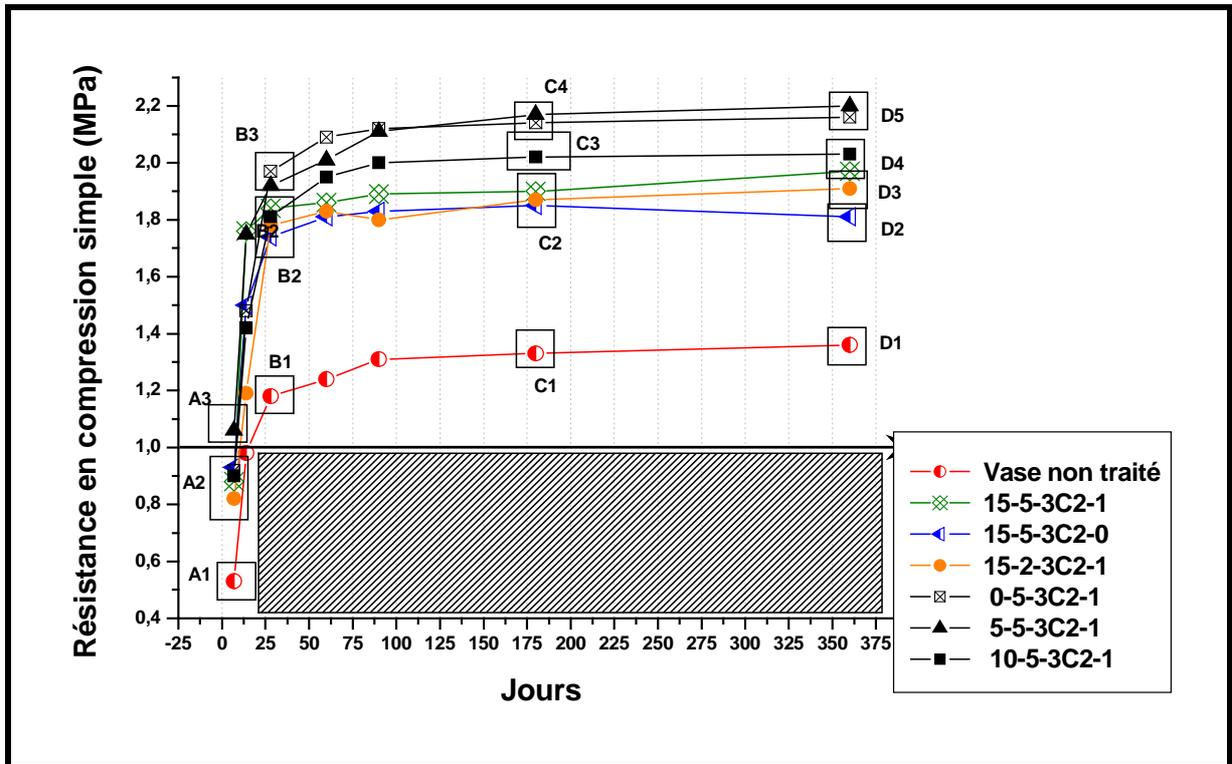


Figure V-58 : Performance mécanique obtenue sur le sédiment traité à deux différents types de fumées de silices avec l'ajout de 15% de sables

La réactivité de la réaction pouzzolanique de la fumée de silice pour la période de 28 jours commence à faire un effet sur l'augmentation des performances mécaniques. Les mélanges qui ont la résistance la plus élevée sont les mélanges 0-5-3C2-1FS3 et 5-5-3C2-1FS3 (voir B3 sur la figure V-57). Le mélange sans ajout de sable a la meilleure résistance avant de 90 jours, ensuite au-delà de 90 jours la résistance de mélange avec 5% de sable (C4 sur la figure V-57 le tableau V-13). D'après ces résultats nous estimons que l'ajout de 5% de sable donne une augmentation de résistance aux jeunes âges (7-14 jours) et à long terme (180-360 jours). La valeur de la résistance reste la plus élevée jusqu'à 360 jours (2,2 MPa) avec un faible écart de valeur environ 3,18% par rapport la résistance du mélange 0%-5%-3% C_2 -1% (voir D5 sur la figure V-58)

L'effet d'un ajout de fumée de silice de 1% dans les mélanges avec 15% de sable est montré sur la figure V-58. Cet effet peut être identifié en comparant le mélange 15-5-3C2-1FS3 et 15-5-3C2-0FS3 (voir D2 et D4 sur la figure V-58). L'effet de la fumée de silice provoque une augmentation de 5,5% à 7 jours, de 14,7% à 14 jours, de 5,5% à 28 jours, de 2,6% à 60 jours, de 3,2% à 90 jours, de 2,6% à 180 jours et de 8,12% à 360 jours (voir tableau V-14).

L'effet d'un ajout de sable peut être identifié également sur la figure V-57. Pour cela nous avons comparé l'évolution de la résistance de mélanges 0-5-3C2-1FS3, 5-5-3C2-1FS3, 5-5-3C2-1FS3 et 15-5-3C2-1FS3. D'après ces résultats, nous pouvons remarquer qu'un ajout supérieur 5% de sables entraîne une diminution de la résistance (voir D2, D4 et D5 sur la figure V-57).

Tableau V-14 : Performances mécaniques obtenues sur le sédiment traité à 5% de ciment et un ajout de 15% de sable

Formulation	Jours						
	7	14	28	60	90	180	360
Vase non traité	0.53	0.98	1.18	1.24	1.31	1.33	1.36
15%Sab-2%cim-3%chx(C2)-1%FS3	0.88	1.76	1.84	1.86	1.89	1.9	1.97
15%Sab-2%cim-3%chx(C2)-0%FS3	0.93	1.5	1.74	1.81	1.83	1.85	1.81
10%Sab-2%cim-3%chx(C2)-1%FS3	0.9	1.42	1.81	1.95	2	2.02	2.03
10%Sab-2%cim-3%chx(C2)-0%FS3	0.9	1.482	1.71	1.921	1.93	1.89	1.93
5%Sab-5%cim-3%chx(C2)-1%FS	1.06	1.75	1.92	2.01	2.11	2.17	2.2
0%Sab-5%cim-3%chx(C2)-1%FS	0.92	1.48	1.97	2.09	2.12	2.14	2.13

5.2.5.1. Résultats et analyse des essais de gel-dégel

La figure V-58 montre une réduction des résistances en compression simple obtenues après les essais de gel-dégel de la 1^{ère} série. Les résultats montrent que tous mélanges traités dépassent 1 MPa de résistance, seuil requis pour des travaux routier.

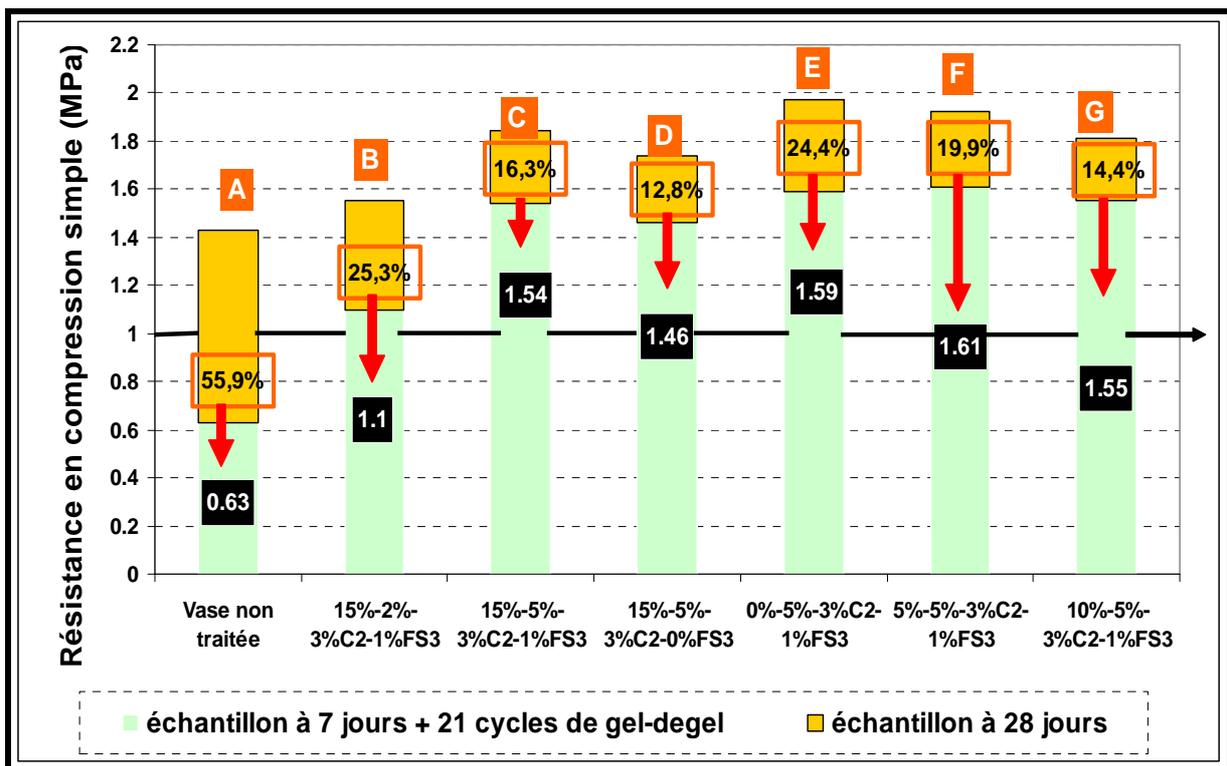


Figure V-58 : Evolution de la résistance en compression simple des éprouvettes soumises à des cycles de gel-dégel avec un ajout de 15% de sables (1^{ère} série)

Le mélange 5%-5%-3%C2-1%FS3 donne une meilleure résistance aux cycles de gel dégel (voir F sur la figure V-58). Il est suivi par le mélange sans d'un ajout de sable avec une résistance de 1,59 MPa (voir E). L'effet d'ajout de sable avec un pourcentage supérieur à 5% provoque une diminution de la résistance. Cette

tendance est similaire aux résultats des essais en compression simple (voir figure V-58)

L'effet d'un ajout de fumée de silice peut être identifié en comparant ce mélange avec le mélange avec 1% de fumée de silice, 15% de sable et sans ajout de fumée de silice (15%-5%-3%C2-1%FS3 et 15%-5%-3%C2-0%FS3). En observant C et D sur la figure V-58 nous pouvons constater que un ajout de 1% de fumée de silice donne une augmentation de la résistance d'environ 5,1% (par rapport aux valeurs résistances de mélanges 15-5-3C2-1FS3 et 15-5-3C2-0FS3: 1,54 MPa et 1,46 MPa)

L'effet d'un ajout de 5% de ciment sur la résistance aux cycles de gel-dégel peut être mis en évidence en comparant la résistance des mélanges 15%-2%-3%C2-1%FS3 (voir B sur la figure V-58) avec celle de mélange 15%-5%-3%-1%FS3 (voir C). Un ajout de 5% de ciment provoque une augmentation de la résistance de 28,5% par rapport aux résistances de 1,1 MPa et 1,54 MPa.

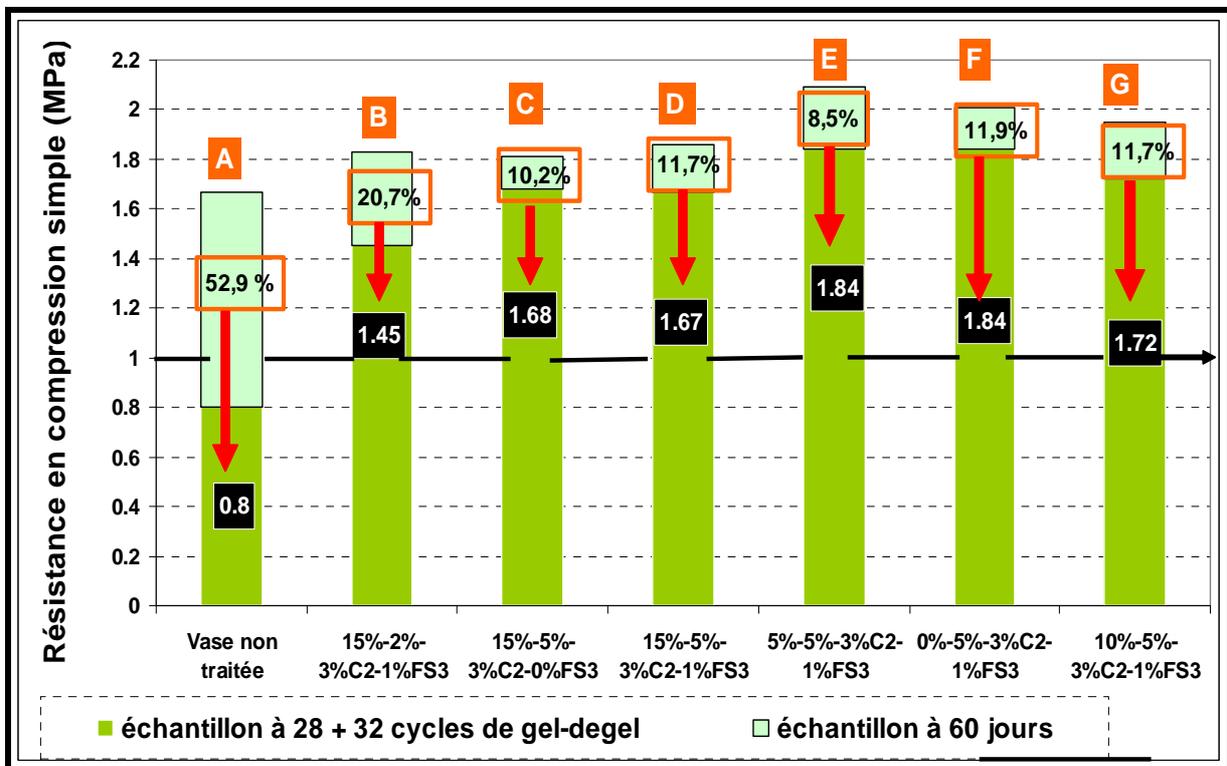


Figure V-59: Evolution de la résistance en compression simple des éprouvettes soumises à des cycles de gel-dégel avec un ajout de 10% de sables (2^{ème} série)

Les résultats des essais de gel-dégel de la 2^{ème} série sont présentés sur la figure V-59. On observe que tous les mélanges traités ont une résistance à la compression simple supérieure à 1 MPa. Le mélange avec 5% de sable et 5% de ciment possède toujours une meilleure performance.

Dans cette deuxième série, l'effet d'un ajout de la fumée de silice est déduite démonté en comparant ce mélange avec le mélange à 1% de fumée de silice, 10% de sable et sans ajout de fumée de silice (15%-5%-3%C2-1%FS3 et 15%-5%-3%C2-0%FS3). Le pourcentage d'augmentation de la résistance provoquée par l'ajout de 15% de ciment est environ 0,5% voir C et D sur la figure V-59). Nous estimons que

cette augmentation du pourcentage de la résistance est distribuée par la grande quantité de sables (15%) qui empêche la réaction pouzzolanique de la fumée de silice qui pourrait fournir une résistance additionnelle.

5.2.5.2. Résultats et analyse des essais de mouillage-séchage

La figure V-60 montre une réduction des résistances en compression simple obtenues après les essais de mouillage-séchage (2^{ème} série). Après 28 jours de conservation à l'air libre.

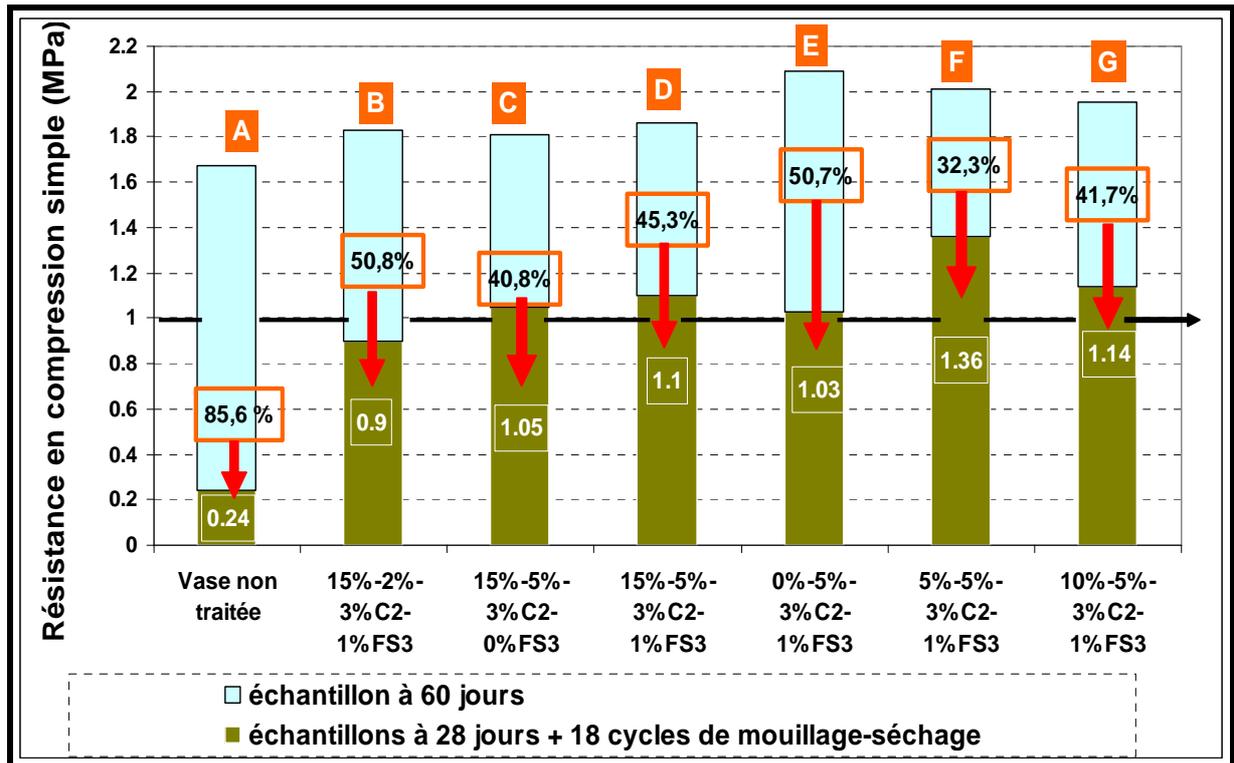


Figure V-60 : Evolution de la résistance en compression simple d'éprouvettes soumises à des cycles de mouillage-séchage avec l'ajout de 15% sables (2^{ème} série)

La figure V-60 montre une réduction de résistances en compression simple après les essais de mouillage-séchage (2^{ème} série). Nous pouvons voir que des quatre mélanges testés, les mélanges avec 10% de sable et 2% de ciment (10%-2%-3%C2-1%FS3) ont des valeurs de résistance inférieures à 1 MPa (voir B sur la figure V-60). Par contre le mélange de 5%5%-3%C2-1%FS3 possède toujours la meilleure résistance aux cycles de mouillage-séchage (1,36 MPa).

L'effet d'un ajout de ciment à 5% donne une augmentation de la résistance d'environ 14,82%. Cette augmentation peut être identifiée en comparant les mélanges 15%-2%-3%C2-1%FS3 et 15%-5%-3%C2-1%FS3 (voir B et D sur la figure V-60). Cette forte augmentation en pourcentage de la résistance s'est déjà produite dans les essais précédents (voir figure V-53, V-56 et V-60). Comme déjà dit, un ajout de 5% de ciment fournit une augmentation des résistances, supérieures par rapport aux sur des mélanges sans ajout de sable, ou avec 10% et 15% de sable.

L'effet d'un ajout de fumée de silice provoque également une augmentation assez importante de la résistance aux cycles de mouillage-séchage. En comparant

les mélanges 15%-5%-3%C2-1%FS3 et 15%-5%-3%C2-0%FS3 (voir C et D sur la figure V-60) nous pouvons constater que le pourcentage de cette augmentation est d'environ 4,5%.

5.3. DETERMINATION DE LA RESISTANCE EN TRACTION

Etant donnée que l'essai en traction direct est difficile à réaliser, la norme française permet d'estimer la résistance en traction à partir du résultat de l'essai en compression diamétrale (norme NF P 98 232 2). Le dispositif utilisé dans cette étude est montré sur la figure V-61. La valeur maximale de la force appliquée (F_r) est ensuite utilisée pour déterminer la résistance en traction d'après l'équation V-1

$$R_t = 0,8R_{tb} = 0,8 * 2 * 10^{-2} * \frac{F_r}{\pi \Phi h} \quad (V-1)$$

R_t : résistance à la traction estimée de R_{tb} (MPa)

R_{tb} : résistance en compression diamétrale (MPa)

F_r : Force appliqué sur l'éprouvette au moment de la rupture (N)

h : hauteur de l'éprouvette (cm)

Φ : diamètre de l'éprouvette (cm)

La performance mécanique des formulations est évaluée au travers du module d'élasticité et de la résistance en traction. Les résultats sont ensuite reportés sur l'abaque de classification (norme NF P 98 114 3) pour vérifier la possibilité d'utilisation en couche d'assise de chaussé des mélanges proposés. Il est important de rappeler que les valeurs de référence pour la classification des matériaux sont définies après 360 jours de cure. Selon la norme française NF P 98 114 2, quand la période d'étude ne permet pas d'effectuer la mesure à 360 jours, on peut déterminer le module d'élasticité et la résistance en traction à 28 jours ou 90 jours en fonction du type de liants utilisés.



Figure V-61 : Illustration de l'essai de compression diamétral (essai Brésilien)

Les résultats obtenus sont ensuite estimés à 360 jours en utilisant de coefficients empiriques donnés par les équations suivants :

$$\frac{R_{t28 \text{ jours}}}{R_{t360 \text{ jours}}} = 0,60; \dots\dots\dots(V-2) \quad \frac{E_{28 \text{ jours}}}{E_{360 \text{ jours}}} = 0,65 \dots\dots\dots(V-4)$$

$$\frac{R_{t60 \text{ jours}}}{R_{t360 \text{ jours}}} = 0,70; \dots\dots\dots(V-3) \quad \frac{E_{60 \text{ jours}}}{E_{360 \text{ jours}}} = 0,75 \dots\dots\dots(V-5)$$

Une campagne d'essais préliminaires pour mettre au point les essais a été réalisée. La vitesse de chargement utilisée dans la suite de l'étude a été fixée à 0,01 MPa/s soit une réduction équivalente à 10 fois la vitesse suggérée dans la norme relative à ce type d'essai. Cette réduction a été imposée en raison des résistances mesurées sur les matériaux formulés (de l'ordre de 0,6 MPa) ce qui aurait induit des temps d'essais relativement courts (de l'ordre de 6 secondes). Pour chaque formulation étudiée, deux essais sont effectués. La figure V-62 présente les résultats de chaque essai ainsi que les valeurs moyennes calculés.

5.3.1. Résultats des mesures à 28 jours

Les résultats présentés dans l'abaque de classification ci-dessous sont les moyennes de deux mesures. Il est noté que les coefficients empiriques proposés dans la norme sont habituellement utilisés pour les sables traités aux liants hydrauliques. Rappelons que ces résultats sont les résultats de performance

mécanique estimés à 360 jours sur la base des résultats à 28 jours. On signale que pour les sédiments non traités les valeurs de résistance en traction obtenues ne sont pas assez représentatives pour être insérées dans l'abaque de classification de matériaux traités aux liants (NF P 98 113). Par conséquent, il n'y figurent pas dans les figures ci après.

5.3.1.1. Effet de sable

Les mesures sont effectuées à 28 jours pour des éprouvettes traitées à différents pourcentages de sable. La figure V-62 présente les résultats des valeurs moyennes calculées pour chaque essai. En terme de résistance en traction, le mélange à 2,5% de fumée de silice possède une résistance à la traction supérieure à celle des autres mélanges. Ce mélange (5-2-3C2-2,5FS3) situé dans la zone 2 de l'abaque de classification, montre que sa performance mécanique à 28 jours possède une performance mécanique adéquate pour une utilisation en couche d'assise de chaussé (classe du matériau supérieure ou égale à la classe S2). Cependant cette formulation reste du point de vue économique très onéreuse comme application en travaux routiers.

L'effet du sable sur la performance mécanique à 28 jours peut être identifié en examinant les points B, D et F pour des mélanges avec ajout de fumée de silice, et les point A, C et E pour des mélanges sans fumée de silice.

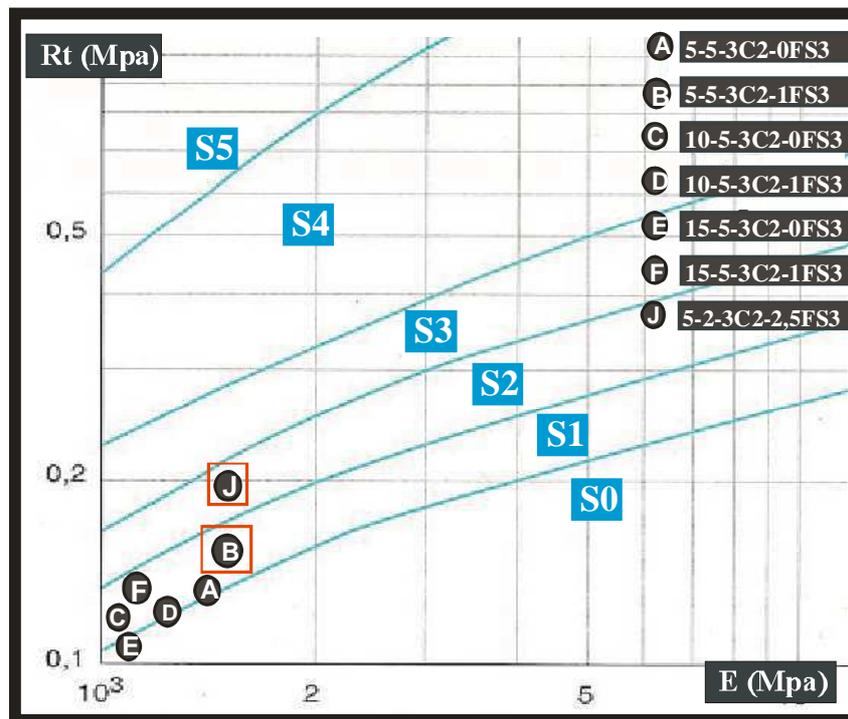


Figure V-62 : Performances mécaniques en traction mesurées à 28 jours des formulations avec ou sans fumée de silice.

L'effet de dosage en sable pour les mélanges sans un ajout de fumée de silice (voir A, C et E) montre une réduction de la résistance à la traction et la valeur du module d'élasticité avec l'augmentation du dosage en sable. L'effet du dosage en sable pour les mélanges avec différents pourcentages de sable peut être mis en

évidence en observant l'évolution des points B, D et F sur l'abaque de la figure V-62. On en déduit que le mélange dosé à 5% de sable présente la meilleure performance. Par conséquent on peut déduire que l'ajout de sable de plus de 5% provoque une réduction de la résistance en traction et le valeur de module d'élasticité des sédiments traités.

5.3.1.2. Effet de la fumée de silice

L'effet de fumée de silice se manifeste d'une façon plus importante sur la résistance à la traction pour les mélanges avec un dosage de sable de 5% (points A et B sur la figure V-62). Par contre, pour les mélange à 10% de sable (points C et D) l'augmentation des performances mécaniques en traction sont négligeable contrairement au module d'élasticité qui, lui, présente une augmentation assez importante. L'effet du dosage en sable pour les mélanges à 15% (points E et F) montre une tendance presque similaire à ceux des mélanges à 5% de sable. L'ajout de fumée de silice dans les mélanges montre toujours une amélioration des performances mécaniques en traction, visibles sur les valeurs de la résistance en traction et les modules d'élasticité. Ces résultats démontrent encore une fois l'effet positif de la fumée de silice sur l'amélioration des performances mécaniques des sédiments traités.

5.3.1.3. Effet des cendres volantes

Les résultats des mélanges traités aux cendres volantes sont présentés sur la figure V-63. Nous pouvons constater que toutes les formulations traitées avec Sodeline (points G et H) sont classés dans la zone S2 ce qui signifie que ces deux formulations sont applicables pour une utilisation en couche d'assise de chaussée. Ces deux mélanges montrent une résistance en traction légèrement supérieure à ceux des mélanges avec de la fumée de silice 5-5-3C2-1FS3. Ces résultats sont inverses aux résultats obtenus en compression simple où les mélanges traités avec Sodeline présentent une résistance supérieure à ceux traités avec de la fumée silice 5-5-3C2-1FS3.

Normalement, les mélanges traités avec les cendres volantes devraient montrer une importante amélioration des performances mécaniques après une période de 60 jours sous l'action des réactions pouzzolaniques. Les mélanges traités avec Soproline présentent de très faibles performances mécaniques qui les situent dans la zone S1 de l'abaque de classification. Par conséquent, cette formulation ne permet pas d'obtenir des performances mécaniques suffisantes pour une utilisation en couche d'assise. Par ailleurs, on peut noter également que l'augmentation du dosage en Sodeline n'entraîne aucune amélioration des performances mécaniques importantes (points G et H). Alors que théoriquement l'augmentation du pourcentage des cendres volantes devrait améliorer les performances mécaniques des éprouvettes. Contrairement, les résultats des essais en compression simple obtenus montrent effectivement, une amélioration de la résistance avec l'augmentation du dosage en cendres volantes.

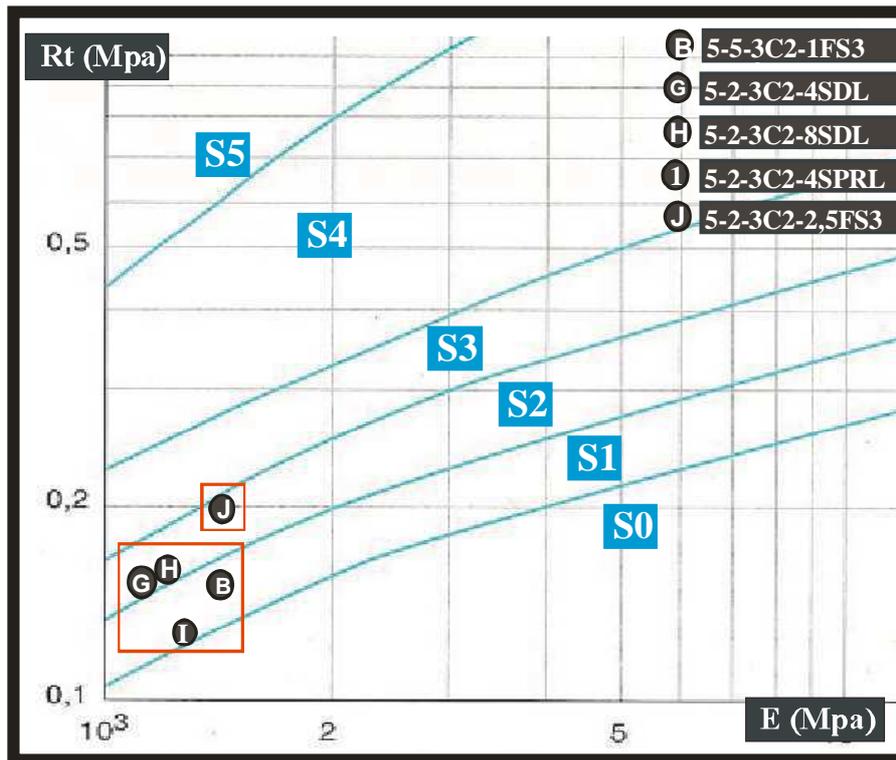


Figure V-63 : Performances mécaniques en traction mesurées à 28 jours des formulations avec deux différents types de cendres volantes.

Ces résultats peuvent être attribués au mode de conservation des éprouvettes. En effet, pour les essais en compression simple, les éprouvettes sont conservées à l'air libre, alors que ceux des essais de compression diamétrale, les éprouvettes sont conservées dans des moules fermés. Par conséquent, le processus d'évaporation d'eau dans les échantillons est plus lent pour les essais en compression diamétrale, ce qui retarde l'établissement de la réaction pouzzolanique des cendres volantes.

5.3.2. Résultats des mesures à 90 jours

Les résultats présentés sur la figure V-16 sont ceux des performances mécaniques estimés à 360 jours à la base des résultats obtenus à 90 jours. On constate une augmentation importante des performances mécaniques avec l'âge des éprouvettes. Ce phénomène bien connu est le signe précurseur de l'action des liants pouzzolaniques du traitement appliqué, qui ont pour effet une amélioration retardée des performances mécaniques. On signale que pour les sédiments non traités les valeurs de résistance en traction obtenues ne sont pas assez représentatives pour être insérées dans l'abaque de classification de matériaux traités aux liants (NF P 98 113). Par conséquent, il n'y figure pas dans les figures ci après.

5.3.2.1. Effet de sable

Les mesures sont effectuées à 90 jours pour des éprouvettes traitées avec différents pourcentages de sable. La figure V-64 montre les valeurs moyennes des résultats des essais de traction obtenus. Le mélange à 5% de sable (5-2-3C2-

2,5FS3) présente la meilleure résistance à la traction que les autres mélanges. La valeur de la résistance obtenue pour ces mélanges permet de les classer entre la zone 2 et 3.

Les résultats des performances mécaniques à 90 jours obtenus pour les mélanges 5-2-3C2-2,5FS3, avec de la fumée de silice sont plus élevés. Les performances mécaniques obtenues sont adéquates pour une utilisation en couche d'assise de chaussées (classe du matériau supérieure égale à la classe S2). Cependant, comme on l'a signalé précédemment, cette formulation (avec 2,5% de fumée de silice) reste du point de vue économique très onéreuse.

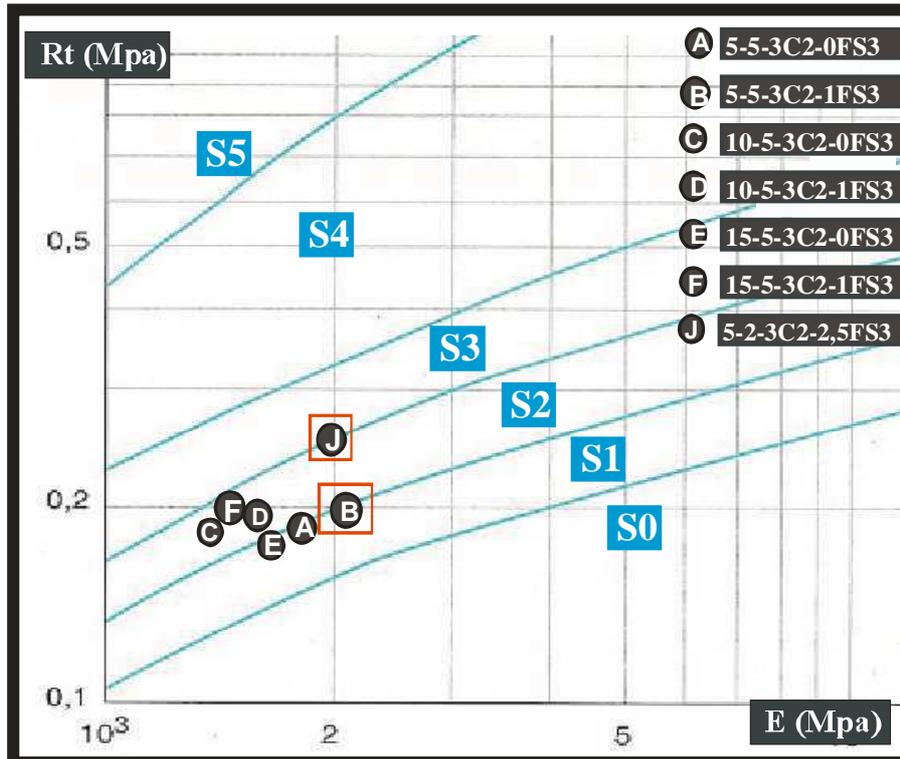


Figure V-64 : Performance mécanique mesurée à 90 jours des formulations avec ou sans fumée de silice

L'effet du sable sur les performances mécaniques à 90 jours peut être identifié en regardant point B, D et F, pour les mélanges avec de la fumée de silice, et les points A, C et E pour les mélanges sans fumée de silice.

Le mélange 5-5-3C2-1FS3 montre une augmentation assez faible de la résistance à la traction par rapport à celle obtenue à 28 jours. La résistance en traction de ce mélange permet de le situer entre S1 et S2, ce qui fait que, son utilisation en couche assise est redoutable. Par contre, les mélanges avec un dosage en sable supérieur à 5% (points C, D, et F) conduisent à une augmentation assez importante de la résistance à la traction. Rappelons qu'à 28 jours, ces mélanges ont été positionnés dans la zone S1, les résultats de la résistance à 90 jours de ces mêmes mélanges les situent dans la zone S2. Par conséquent, on peut conclure qu'à cette période de 90 jours, l'ajout d'une quantité de sable supérieure à 5% provoque une amélioration de la résistance en traction. Ces résultats sont inverses à ceux

obtenus en compression simple, ou le mélange de 5-5-3**C2-1FS3** a présenté une résistance à la compression supérieure à toutes les autres formulations.

5.3.2.2. Effet de la fumée de silice

L'effet de fumée de silice peut être mise en évidence sur la figure V-64, pour les mélanges avec un dosage de 5% de sable (points A et B). Pour ce dosage, l'effet de la fumée de silice se manifeste plus sur l'évolution du module d'élasticité que sur la résistance à la traction. Cette tendance est similaire pour les mélanges avec un dosage de 10% de sable (points C et D), ou l'ajout de fumée de silice provoque plus d'amélioration au niveau du module d'élasticité. Pour les mélanges avec 15% de sable (points E et F), l'effet de la fumée de silice montre une tendance tout à fait différente. L'effet de fumée de silice provoque une réduction de valeur du module d'élasticité, on peut constater cela sur le point E (15-5-3**C2-0FS3**) qui présente une valeur du module d'élasticité supérieure à celle obtenue avec les mélanges contenant de la fumée de silice (5-5-3**C2-1FS3**). Ceci peut être dû à la granulométrie non homogène du sable.

5.3.2.3. Effet des cendres volantes

Les résultats de mélanges traités aux cendres volantes sont présentés sur la figure V-65. Dans la période de 90 jours nous pouvons constater que toutes les formulations traitées avec les cendres volantes (Sodeline et Soproline, points G, H et I) sont classées dans la classe S2 ce qui signifie que ces trois formulations peuvent être applicables en couche d'assise de chaussée.

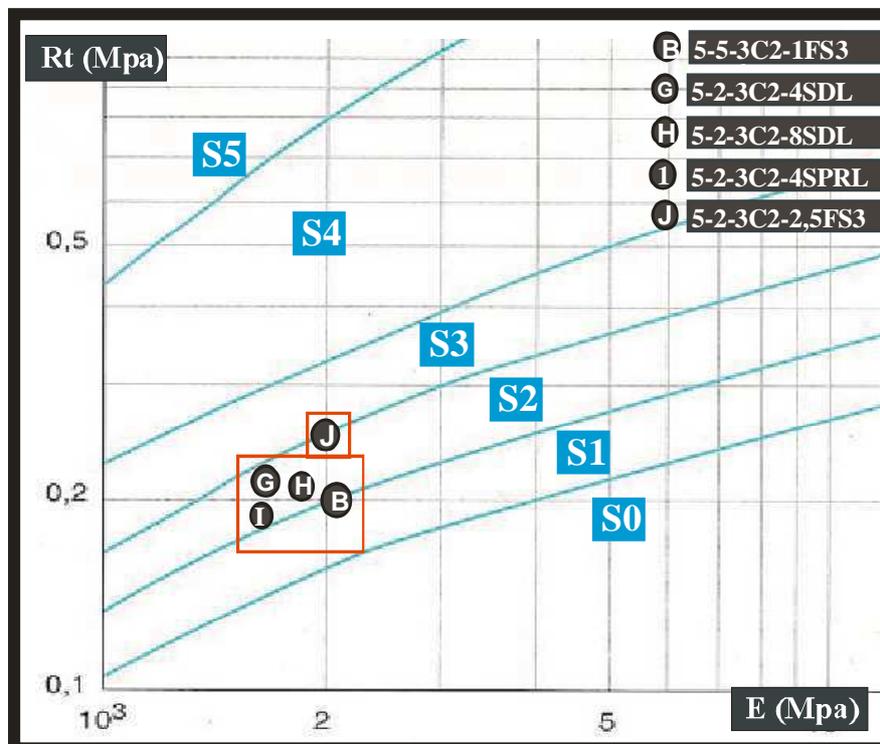


Figure V-65 : Performances mécaniques mesurées à 90 jours des formulations avec deux différents types de cendres volantes..

L'effet d'augmentation de dosage de Sodeline à cette période ne montre aucune amélioration importante de la résistance en traction. Cet effet montre uniquement une amélioration du module d'élasticité. Cette tendance est identique aux résultats obtenus à 28 jours. Par conséquent, on peut conclure que l'ajout de cendres volantes dans les mélanges étudiés n'entraînent aucune amélioration de résistance à la traction avec l'âge des éprouvettes.

On peut constater ici, également, que les mélanges traités avec de la Sodeline présentent une résistance à la traction supérieure que celle obtenue avec un traitement à la Soproline (points G et H). Rappelons que dans le cas des essais de compression simple, les mélanges traités avec de la Sodeline ont montré également une résistance plus importante. Ceci peut être attribué au Dioxyde de silice (SiO_2) plus important dans la Sodeline que dans la Soproline. En effet le pourcentage de SiO_2 fourni un effet positif sur l'évolution des performances mécaniques des sédiments traités. Ce dernier étant l'origine de la production du composé C-S-H, qui une fois hydratés entraîne des liaisons entre les particules des sédiments leur procurant ainsi une augmentation de la résistance.

5.4. PERMEABILITE DES SEDIMENTS

La perméabilité d'un milieu poreux correspond à son aptitude à se laisser traverser par un fluide (liquide ou gaz) sous l'effet d'un gradient de pression. La durabilité d'un sédiment traité par des liants hydrauliques est très souvent liée à la capacité du sédiment solidifié/stabilisé à empêcher la pénétration des agents agressifs dans son réseau poreux. L'aptitude des sédiments traités à résister à l'intrusion de ces agents est caractérisée par deux grandeurs physiques: la perméabilité et la diffusivité. Ces deux paramètres sont considérés comme des «indicateurs de la durabilité». La perméabilité et la diffusivité correspondent à deux mécanismes bien distincts de transport de matière: la perméabilité décrit un écoulement (d'eau ou du gaz par exemple) qui se produit sous gradient de pression, elle dépend de la taille des espaces poreux dans lesquels s'écoule le fluide ainsi que de leur interconnexion. En effet, la perméabilité dépend fortement du réseau poreux et de sa connectivité. La diffusivité est relative au déplacement d'une espèce chimique à l'échelle moléculaire sous l'effet d'un gradient de concentration. Plus la résistance du sédiment augmente contre les phénomènes de transport, plus la durabilité augmente. C'est la raison pour la quelle, la compréhension des mécanismes de transport dans un milieu poreux comme les sédiments traités est très importante.

En 1856, Darcy a formulé la loi de la vitesse d'écoulement de l'eau dans un corps poreux, à la suite de travaux sur l'écoulement de l'eau dans une couche filtrante de sable. D'après Darcy, cette loi se traduit par l'équation :

$$Q=KAi \quad (V-6)$$

Où :

Q : volume d'eau écoulé par unité de temps, (débit), [m^3/s],

A : surface de la couche filtrante [m^2],

K : coefficient de perméabilité lié à la nature des échantillons [m/s],

i : gradient hydraulique qui est défini par la relation suivante :

$$i = \frac{\Delta H}{L} \quad (\text{V-7})$$

Avec :

ΔH : différence de potentiel d'hydraulique [m],
 L : épaisseur de l'échantillon [m]

Considérons l'ensemble du matériau poreux de section apparente A , siège d'un écoulement établi en régime laminaire. Le débit volumique Q_x du fluide de viscosité μ dans la direction OX sous un gradient de pression est donné sous forme différentielle par la loi de darcy (figure V-66).

$$Q_x = \frac{K_x}{\mu} A \frac{dp}{dx} \quad (\text{V-8})$$

Avec :

K_x : perméabilité au fluide du matériau dans la direction OX considérée, [m^2],
 μ : viscosité du fluide, [$\text{Pa}\cdot\text{s}$],
 A : section, [m^2],
 P : pression, [Pa],
 x : longueur, [m],
 Q_x : débit volumique du fluide, [m^3/s].

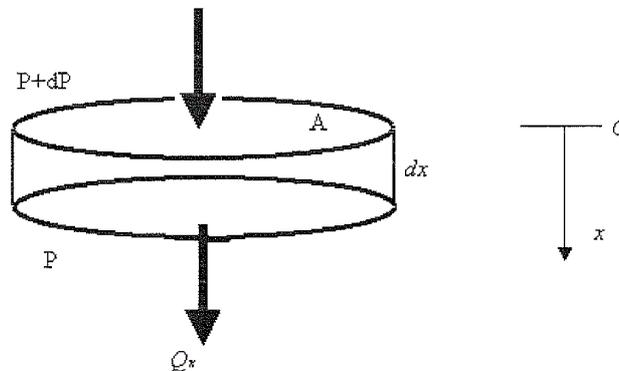


Figure V-66 : Loi de Darcy sur un élément de volume

Des écarts avec la loi de Darcy sont observés expérimentalement. En effet, pour une mesure de perméabilité sur un matériau donné, la nature du fluide s'écoulant à travers le matériau est la pression appliquée pendant la mesure influencent les résultats car il existe des interactions fluide-milieu poreux. Enfin, l'état hydrique du matériau influence sa perméabilité.

Dans ce qui suit, nous allons nous intéresser à l'étude de la perméabilité des sédiments traités saturés. L'objectif étant de montrer l'influence des liants utilisés sur l'amélioration de la perméabilité et la porosité des échantillons solidifiés/stabilisés :

paramètres importants du comportement des sédiments traités dans leur environnement d'utilisation.

5.4.1. Méthode de réalisation des essais

Les essais de perméabilité sur les différents échantillons ont été effectués à un âge supérieur à 60 jours.

Le dispositif expérimental est composé d'une cellule triaxiale équipée de 3 contrôleurs de pression volume et de capteur de pression, de précision ± 1 kPa et ± 1 mm³. L'ensemble est piloté par ordinateur via une centrale d'acquisition. La figure IV-67 montre la cellule triaxiale équipée des contrôleurs de pression volume.



Figure V-67 : Cellule triaxiale équipée de contrôleurs pression-volume

L'objectif de cet essai est de déterminer les caractéristiques hydrauliques et mécaniques à l'aide de l'essai triaxial en vue de déduire les paramètres de perméabilité, de module d'élasticité et de la résistance maximale, paramètres qui sont nécessaires pour envisager une modélisation aux limites d'un tronçon routier. L'essai de perméabilité a été effectué au laboratoire L.O.M.C (laboratoire d'ondes et milieux complexes) de l'Université du Havre sur des échantillons à 56 jours d'âge.

Le tableau ci-dessous représente les échantillons traités, les dosages en liants et sable.

Tableau V-15 : Echantillons avec les dosages en liants et sable et leur résistance à la compression simple R_c à 60 jours

Nom	N°	Sable	Ciment	Chaux	Fumée des silices	C.V. Sodeline
Non traité	1	0	0	0	0	0
0-5-3-1	2	0	5	3	1	0
5-5-3-1	3	5	5	3	1	0
15-5-3-1	4	15	5	3	1	0
5-5-3-0	5	5	5	3	0	0
5-2-3-8	6	5	2	3	0	4
5-2-5-1	7	5	2	5	1	0
10-5-3-1	8	10	5	3	1	0

Les échantillons sont installés dans la cellule triaxiale (figure V-65). Par application d'une contrainte de confinement totale de 100 kPa et en injectons de l'eau à une pression de 50 kPa par l'entrée et on laisse la sortie à l'air libre c'est-à-dire à la pression atmosphérique, on procède à la saturation de l'échantillon. L'opération dure environ 24h. Si le volume d'eau d'entrée égal au volume d'eau de sortie, les échantillons sont considérés comme saturés. Le coefficient de perméabilité est déterminé par application de la loi de Darcy. Pour un essai préliminaire, un échantillon de la série n°1 a été choisi et trois conditions aux limites ont été imposées :

- Gradient de charge $dp = \Delta u = 50$ kPa avec une contrainte totale de confinement de 100 kPa.
- Gradient de charge $dp = \Delta u = 50$ kPa avec une contrainte totale de confinement de 300 kPa.
- Gradient de charge $dp = \Delta u = 50$ kPa avec une contrainte totale de confinement de 500 kPa.

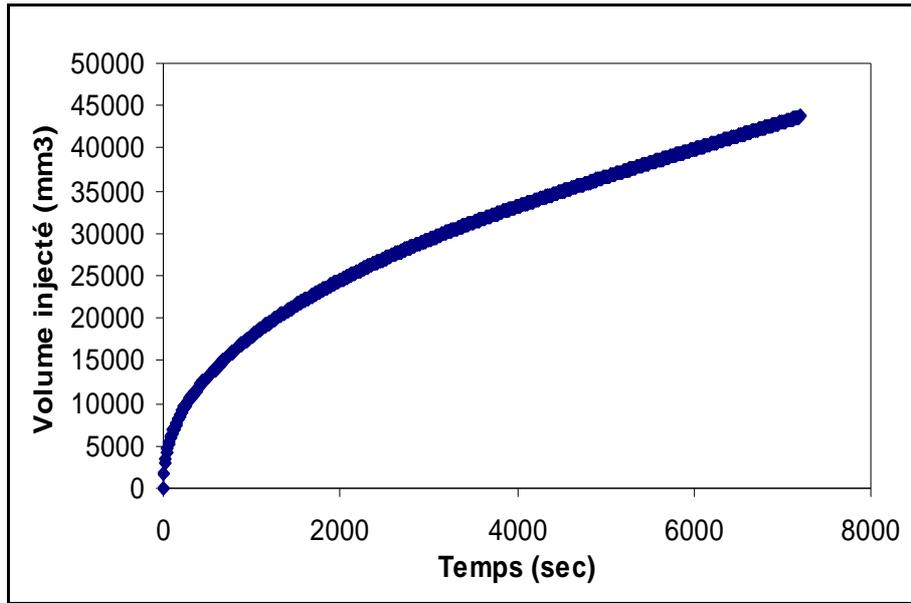


Figure V-68 : Volumes d'eau entrant et sortant en fonction du temps, Gradient de charge $\Delta u = 50$ kPa avec une contrainte totale de confinement de 100 kPa de la série n°1

Les figures V-68, V-69 et V-70 donnent les courbes des débits pour ces trois cas. Les résultats obtenus sont résumés dans le Tableau V-16 et V-1.

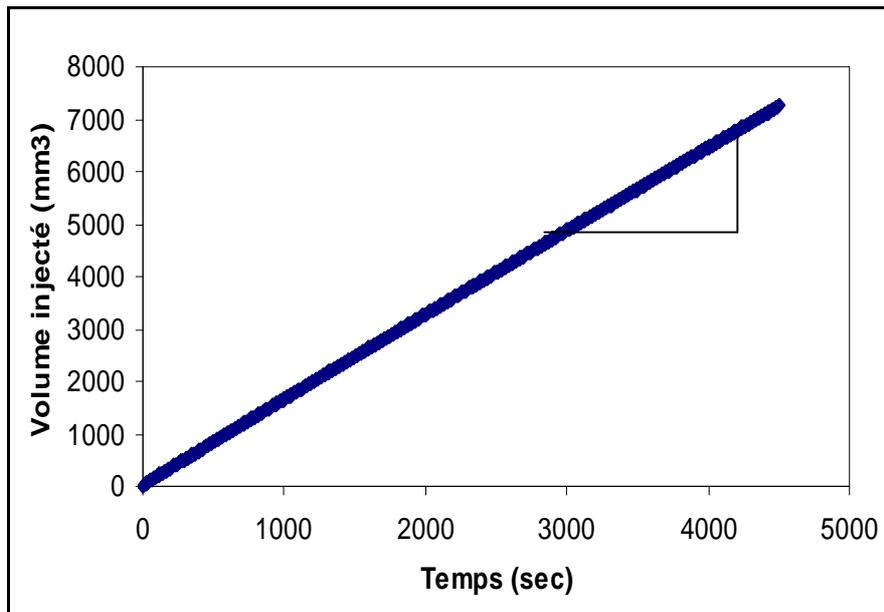


Figure V-69 : Volumes d'eau entrant et sortant en fonction du temps, Gradient de charge $\Delta u = 50$ kPa avec une contrainte totale de confinement de 300 kPa de la série n°1

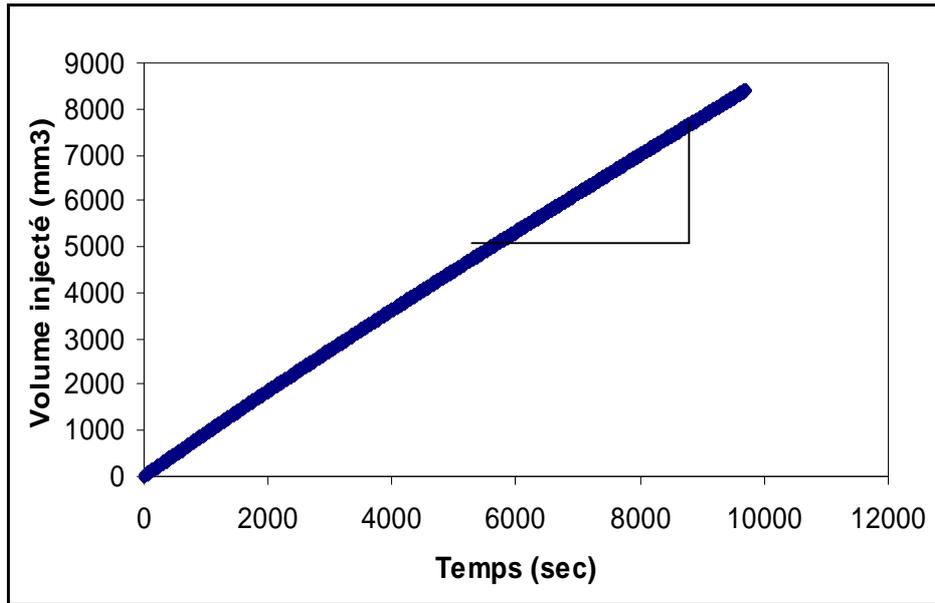


Figure V-70: Volumes d'eau entrant et sortant en fonction du temps, Gradient de charge $\Delta u = 50$ kPa avec une contrainte totale de confinement de 500 kPa de la série n°1

5.4.2. Résultats

Tableau V-16 : Récapitulatif des conditions d'essais et résultats des mesures de l'essai de perméabilité à charge constante de la série n°1

Contrainte de confinement totale σ_3 (kPa)	Gradient de charge (kPa)	Perméabilité K (m/s)
100	50	$4,2 \cdot 10^{-8}$
300	50	$2,1 \cdot 10^{-8}$
500	50	$1,0 \cdot 10^{-8}$

Nous pouvons remarquer déjà que l'échantillon non traité est très peu perméable. On peut remarquer aussi qu'une augmentation de la contrainte totale de confinement de 200 kPa diminue la perméabilité de l'ordre de moitié. Le tableau V-17 résume les résultats obtenus pour tous les échantillons.

Tableau V-17 : Perméabilités des échantillons mesurées par cellule triaxiale

Série	Echantillon	σ_3 (kPa)	Dosages en liants et autres ajouts (%)					K (m/s)
			Sable	Ciment	Chaux	Fumée de silice	C.V. Sodeline	
1	1	100	0	0	0	0	0	$4,2 \cdot 10^{-8}$
	2	300						$2,1 \cdot 10^{-8}$
	3	500						$1,0 \cdot 10^{-8}$
2	1	100	0	5	3	1	0	$1,3 \cdot 10^{-8}$
	2	300						$1,0 \cdot 10^{-8}$
	3	500						$0,7 \cdot 10^{-8}$
3	1	100	5	5	3	1	0	$7,3 \cdot 10^{-8}$
	2	300						$1,2 \cdot 10^{-8}$
	3	500						$0,9 \cdot 10^{-8}$
4	1	100	15	5	3	1	0	$16,7 \cdot 10^{-8}$
	2	300						$6,3 \cdot 10^{-8}$
	3	500						$3,4 \cdot 10^{-8}$
5	1	100	5	5	3	0	0	$4,4 \cdot 10^{-8}$
	2	300						$3,9 \cdot 10^{-8}$
	3	500						$2,2 \cdot 10^{-8}$
6	1	100	5	2	3	0	4	$2,7 \cdot 10^{-8}$
	2	300						$1,6 \cdot 10^{-8}$
	3	500						$0,7 \cdot 10^{-8}$
7	1	100	5	2	5	1	0	$18,4 \cdot 10^{-8}$
	2	300						$13,5 \cdot 10^{-8}$
	3	500						$11,9 \cdot 10^{-8}$
8	1	100	10	5	3	1	0	$14,8 \cdot 10^{-8}$
	2	300						$4,7 \cdot 10^{-8}$
	3	500						$4,8 \cdot 10^{-8}$

L'effet de la fumée de silice peut être identifié en analysant les mélanges avec 5% de sables de la série 3 (5-5-**3C2-1FS3**) et la série 5 (5-5-**3C2-0FS3**). Nous pouvons remarquer que l'effet de l'ajout fumée de silice montre un effet positif sur l'augmentation de coefficient de perméabilité d'échantillon. Ceci est provoqué par la taille très fine des grains de la fumée de silice qui permet ainsi de remplir les espaces vides entre les grains dans les matériaux solidifiés. En effet, grâce à la fine structure de la fumée de silice, la cristallisation obtenue par la réaction permet de remplir les vides et par conséquent une réduction de la perméabilité des échantillons.

L'effet de sable peut être également identifié en comparant les mélanges de la série 2 (0-5-**3C2-1FS3**), série 3 (5-5-**3C2-1FS3**), série 4 (10-5-**3C2-1FS3**) et série 8 (15-5-**3C2-1FS3**). Le rôle du sable comme correcteur de granulométrie provoque un effet négatif sur la perméabilité d'échantillon. En effet, la perméabilité augmente avec le dosage en sable. Cette augmentation de porosité facilite les largages des polluants.

La série 7 avec un pourcentage de chaux élevée (5 %) montre une valeur de coefficient de perméabilité assez importante. Il apparaît que ce mélange possède un coefficient de perméabilité supérieur aux autres. D'après le résultat obtenu pour

notre sédiment nous estimons que le pourcentage de 5% de chaux ne permet pas leur utilisation dans le techniques routière.

5.5. Essai de Lixiviation

La terme lixiviat, selon la norme française NF X-31-210 (1998), désigne la solution contenant les éléments solubilisés au cours de l'essai, sur laquelle sont effectuées les caractérisation analytiques. Le lixiviant constitue le milieu chimique agressif de l'essai de lixiviation.

L'essai de lixiviation est divisé en trois types d'essai suivant le milieu chimique appliqué dans l'essai :

- a) L'essai de lixiviation statique, dans cet essai nous mesurons les éléments relargués dans le lixiviat après la mise en contact du solide étudié avec la solution aqueuse, sans renouvellement de celle-ci.
- b) L'essai de lixiviation semi dynamique appliqué avec un renouvellement régulier de la solution lixiviant.
- c) L'essai de lixiviation dynamique, dans lequel la solution lixiviant est renouvelé en permanence

L'eau déminéralisée a été utilisée avec un pH de 5 en tant que solution lixiviant. La figure ci-dessous présente le déroulement de l'essai de lixiviation. Dans une première phase, le dispositif a été rincé avec de l'acide nitrique dilué pour éviter toute contamination. L'échantillon cylindrique à 56 jours (4*8cm) repose sur un trépied en P.V.C. à 3,5 cm du fond. Les échantillons sont mis en contact avec de l'eau déminéralisée pendant 24 heures sous agitation permanente. Le pH du lixiviat est d'environ 5.

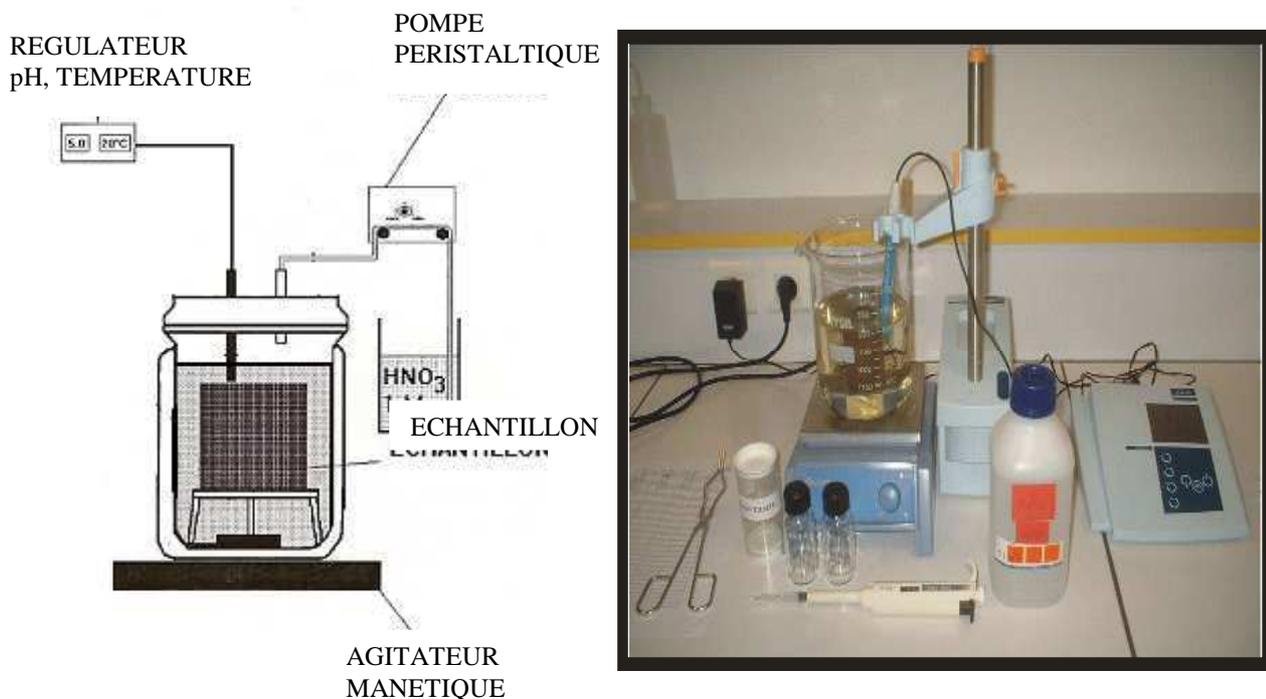


Figure V-71 : Principe du montage expérimental de l'essai de lixiviation statique

Dans cette étude, nous avons appliqué deux types de lixiviations, l'essai de lixiviation statique et l'essai de lixiviation dynamique. Cet essai de lixiviation est une simulation du comportement du sédiment traité soumis à des attaques par des agents extérieurs environnementaux à long terme. Cet essai nous permet donc de valider les mélanges de valorisation des sédiments.

Tableau V-18 : Caractéristique géochimique des sédiments de bassin n°2 (prélèvements ont été effectués en 2004 et 2005)

Paramètres	Port de Port en Bessin				Référentiel de Qualité immersion (arrêté 14 Juin 2000)	
	Octobre 2004		Juillet 2005		N1	N2
Micropolluants	2BS	2BN	2BS	2BN	N1	N2
As (mg/kg)	11,1	10,7	9	8,2	25	50
Cd (mg/kg)	0,5	0,5	2	2	1,2	2,4
Cr (mg/kg)	112	71	60	110	90	180
Cu (mg/kg)	179	111	475	97,8	45	90
Hg (mg/kg)	0,14	0,12	0,135	0,11	0,4	0,8
Pb (mg/kg)	44	50	215	154	100	200
Ni (mg/kg)	55	29	30	58,2	37	74
Zn (mg/kg)	350	347	440	306	276	552

Rappelons que cette étude a été commencée à la base des analyses résultant de la lixiviation effectuée en 2004 et 2005 par une Campagne d'échantillonnage du Conseil Général. (Tableau V-18). Les résultats nous montrent que les sédiments présentent des teneurs en cuivre importantes sur l'ensemble des analyses réalisées depuis 2001, Ces teneurs sont supérieures au niveau N2. D'après ces résultats nous considérons que les sédiments du Port en Bessin classés comme un présentant un risque écotoxicologique.

Tableau V-19 : Extrait des valeurs limites (test de lixiviation sur la base d'un ratio liquide solide de 10 l/kg)

Élément Traces (en mg/kg)	Déchets inertes	Déchets non dangereux	Déchets dangereux
As	0,5	2	25
Ba	20	100	300
Cd	0,04	1	5
Cr	0,5	10	70
Cu	2	50	100
Hg	0,01	0,2	2
Mo	0,5	10	30
Ni	0,4	10	40
Pb	0,5	10	50
Sb	0,06	0,7	5
Se	0,1	0,5	7
Zn	4	50	200
Chlorures	800	15000	25000
Fluorures	10	150	500
Sulfates		20000	50000
Indices Phénols	1	-	-
COT	500	800	1000
Fraction soluble	4000	60000	100000

La décision du Conseil Européen n°2003/33/CE a établi des valeurs de référence concernant les critères d'acceptation dans les décharges de déchet inertes, non-dangereux et dangereux. Ces valeurs concernent des éléments contenus dans les lixiviats et non dans le matériau brut.

Si les valeurs analysées dans le lixiviat sont inférieures aux valeurs d'entrée en décharge pour déchets dangereux, nous pourrions considérer que les boues de dragage n'entrent pas dans la catégorie des déchets dangereux.

Dans cette étude nous avons utilisé ces valeurs de référence pour identifier la quantité des polluants dans les sédiments du Port en Bessin. (Tableau V-19)

5.5.1. L'essai de lixiviation dynamique (l'essai de lixiviation à pH variable)

Cet essai de lixiviation est une simulation du comportement du sédiment traité soumis à des attaques par des agents extérieurs environnementaux. Cet essai permet donc de valider les mélanges de valorisation des sédiments. Le choix de monolithe permet de se rapprocher le plus possible des conditions réelles des sédiments en chaussée routière.

Ce type d'essai s'est réalisé sur l'identification de cinq métaux lourds constitués de Zinc, Sulfate, Nickel, Cadmium, Chlorures, Plomb, et Cuivre. Toutes les valeurs des résultats figurent avec des valeurs limites seuils (voir tableau V-19).

5.5.1.1. ZINC

Généralement les origines de ce contaminant proviennent de combustion de charbon, d'émission atmosphérique industrielle, traitement des eaux usées issues des procédés de galvanisation. Le ZnO arrête grandement l'hydratation du ciment et le Zn^{2+} retarde la formation de la Portlandite pendant le premier jour de l'hydratation de ciment.

La figure V-72 montre la teneur en Zinc mesurée pour tous les mélanges. Nous pouvons constater que la valeur de zinc pour le mélange sédiment non traité (voir A sur la figure V-10) est située dans la zone de déchet inerte, avec une teneur de Zinc 1,59 mg/kg de matière sèche. L'effet du traitement avec différentes compositions de liants provoque une diminution de la teneur en Zinc.

Sur la figure V-72 nous pouvons constater que le mélange 15-2-3-0FS3 possède une teneur en Zinc supérieure aux autres (voir M sur la figure V-72). Si nous comparons avec la même composition avec l'ajout de fumée de silice (15-2-3C2-1FS3, voir L), nous pouvons remarquer que l'ajout de fumée de silice diminue la teneur en Zinc en fixant les métaux lourds grâce à ses fines particules. Cet effet peut être également vérifié en comparant le mélange 0-5-3C2-0FS3 (voir B) et 0-5-3C2-1FS3 (voir C).

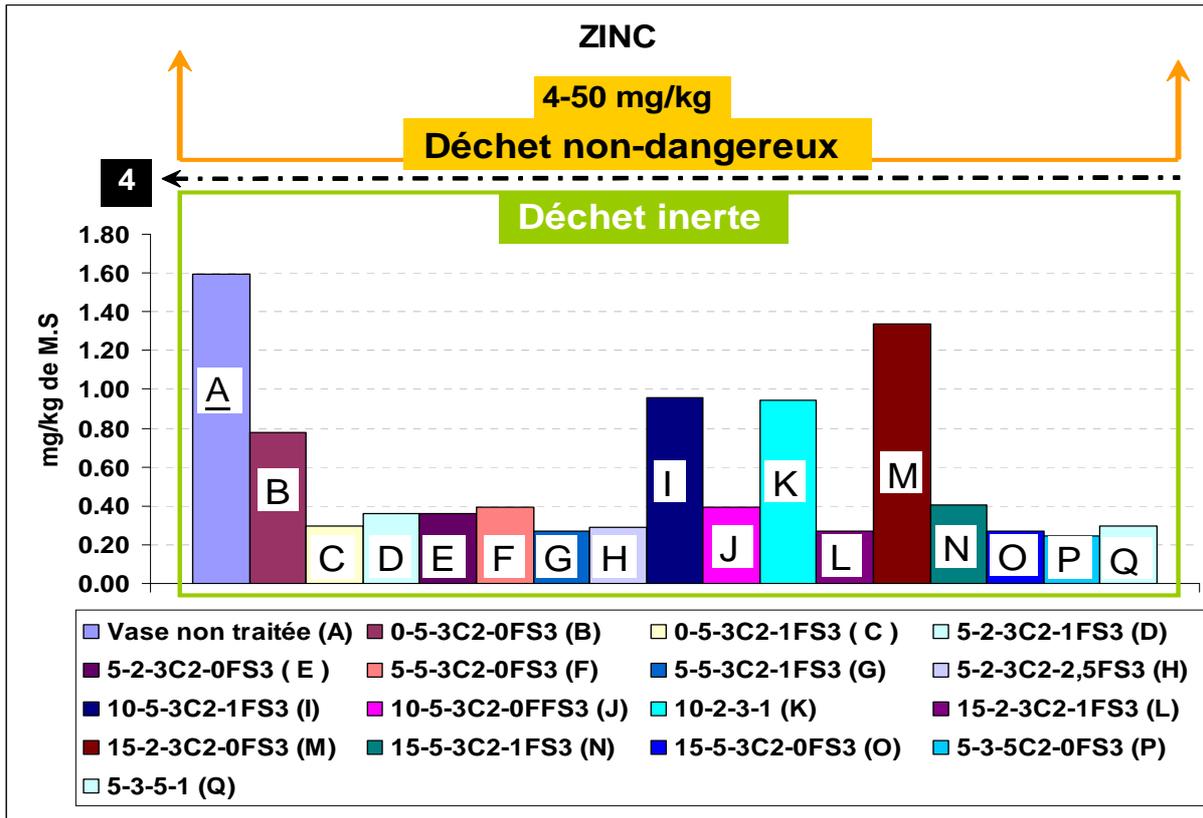


Figure V- 72 : Concentration en Zinc relevée après l'essai de lixiviation dynamique à pH variable

Le mélange avec un pourcentage de fumée de silice de 2,5 (5-2-3-2,5FS3, voir H) montre également une réduction de Zinc par rapport les mélanges 5-2-3-0FS3 (voir E) et 5-2-3-1FS3 (voir D). Donc, nous pouvons confirmer que l'effet de d'un ajout de fumée de silice donne un effet positif (une réduction du taux de Zinc) pour presque tous les mélanges. Une exception se produit pour entre les mélange 10-5-3C2-0FS3 (voir J) et 10-5-3C2-1FS3 (voir I), où l'effet de fumée de silice augmente la taux de Zinc.

5.5.1.2. SULFATES

La figure V-73 nous montre le taux de Sulfates obtenue après l'essai de lixiviation. Nous pouvons voir que tous les mélanges ont un taux de Sulfate dans le catégorie de déchet inerte.

Plusieurs mélanges (voir B, F I, J, K et M sur la figure V-73) ont une valeur supérieure que le mélange non traitement (voir A).

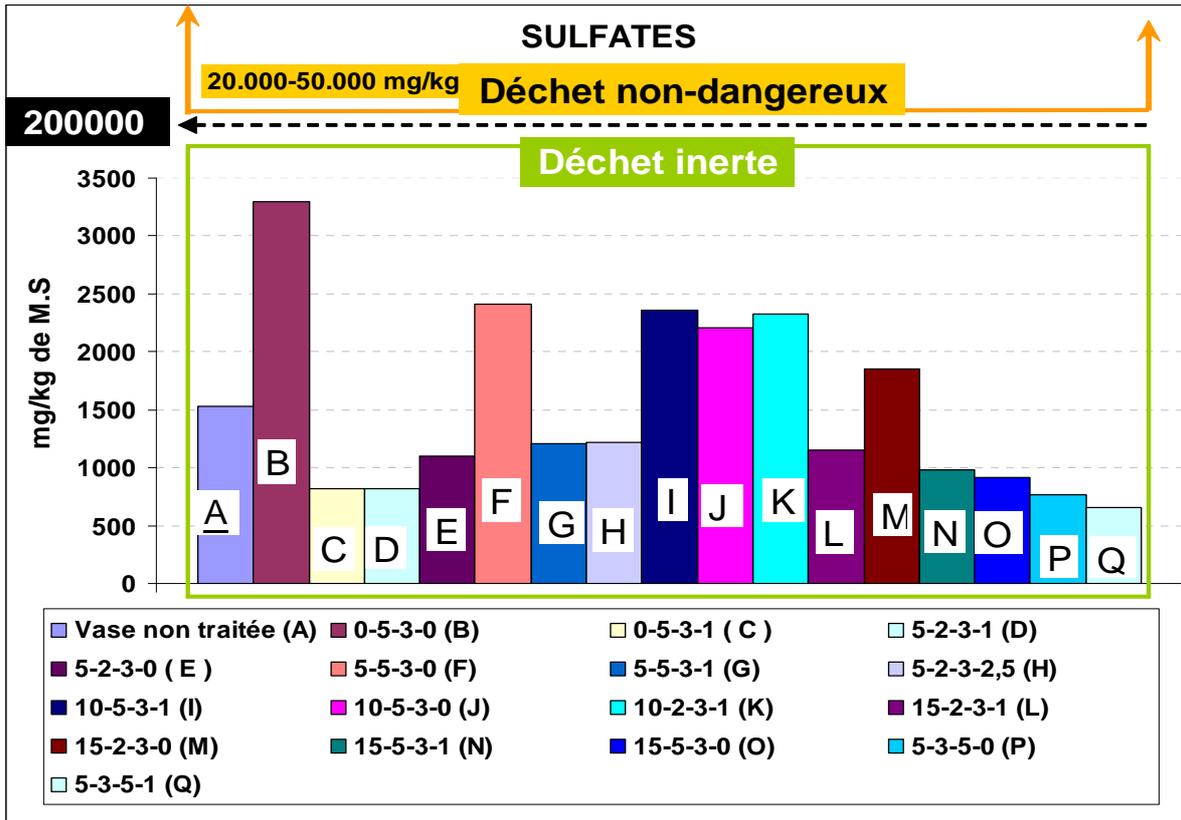


Figure V- 73 : Concentration en Sulfates après l'essai de lixiviation dynamique à pH variable

Nous pouvons remarquer que tous ces mélanges sont des mélanges avec pourcentage de 5% de ciment sauf pour le mélange 15-2-3C2-0FS3 (voir M). L'hydratation du ciment peut être modélisée comme suivant :



Les deux réactions forment des produits composés de sulfates, l'ettringite de formule $(CaO)_6Al_2O_3(SO_3)_3(H_2O)_{32}$ pour l'équation (1) et pour l'équation (2), du monosulfate de formule $(CaO)_4Al_2O_3SO_3(H_2O)_{12}$. Donc nous pouvons considérer que cet excessif taux de sulfate relevée, résulte de la l'hydratation du ciment. Mais cet taux excessif de Sulfate diminue avec l'ajout de 1% de fumée de silice. En comparant chaque mélange avec le mélange de même composition mais avec l'ajoute de 1% de fumée de silice (B avec C, F avec G, M avec N) nous pouvons constater que l'ajout de fumée de silice tend à diminuer le taux de sulfates.

5.5.1.3. CADMIUM

Le Cadmium est présent au seul degré d'oxydation +2. il se trouve souvent dans le résidus de l'industrie de dépôt des métaux sous forme de boues de cynure de cadmium, d'hydroxydes et sous forme de solide CdO. Au cours de l'hydratation du ciment, la formation de $Cd(OH)_2$ est possible. Cd peut se déposer également à la surface des grains du ciment sous forme d'hydroxydes mélangés $CaCd(OH)_4$

Sur la figure V-74 nous pouvons constater que le mélange 0-2-3-0FS3 possède une teneur en Cadmium supérieure que les autres (voir B sur la figure V-74) suivi par 5-2-3-0FS3 (voir F)

Si nous comparons avec la même composition avec l'ajout de fumée de silice (15-2-3C2-1FS3, voir L), nous pouvons remarquer que l'ajout de fumée de silice diminue la teneur en Cadmium en fixant les métaux lourds grâce à ses fines particules. Cet effet peut être également vérifié en comparant le mélange 0-5-3C2-0FS3 (voir B) et 0-5-3C2-1FS3 (voir C).

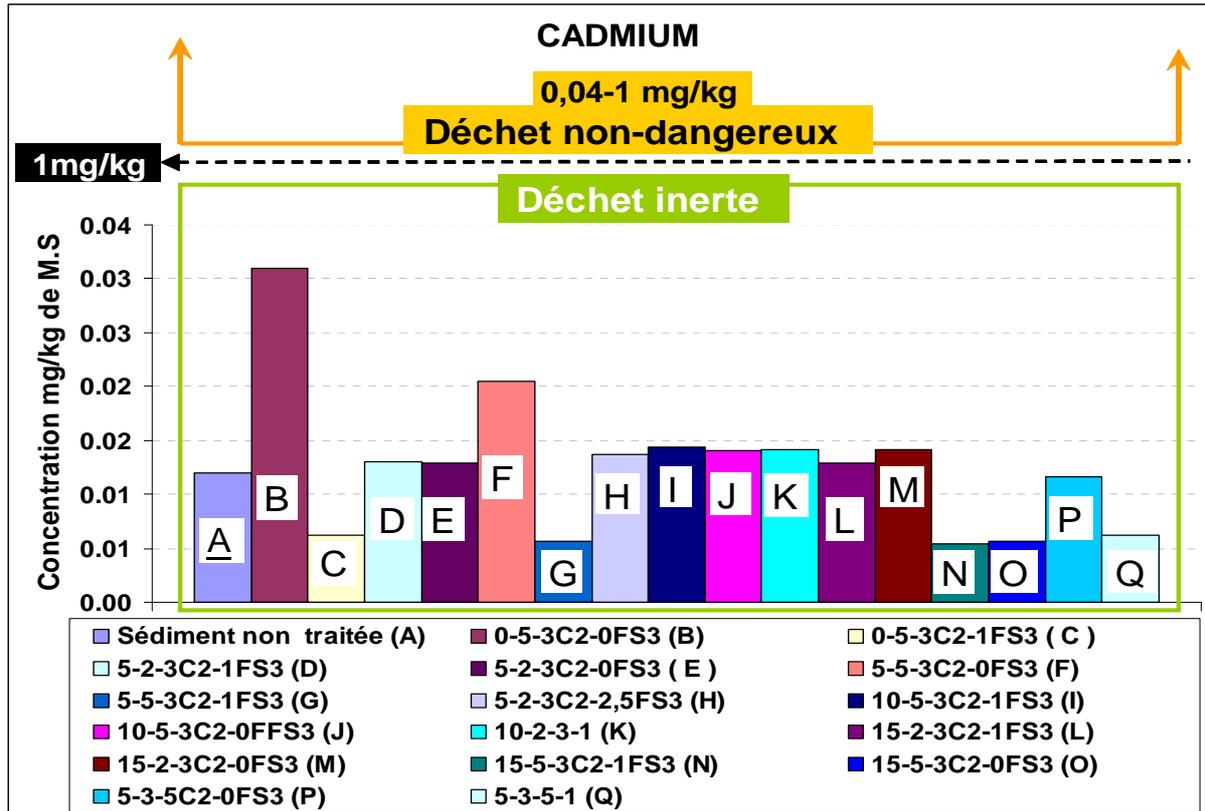


Figure V-74 : Concentration en Cadmium après l'essai de lixiviation dynamique à pH variable

5.5.1.4. Nickel

Généralement les origines de ce contaminant proviennent de combustion d'énergie fossile, de production de métaux non ferreux.

La figure V-75 montre les taux de Nickel pour tous les mélanges et qui sont catégorisés comme un déchet inerte. Par contre, nous pouvons remarquer que les taux de tous mélanges traités sont légèrement supérieures que celui du mélange sans traitement (vase non traitée).

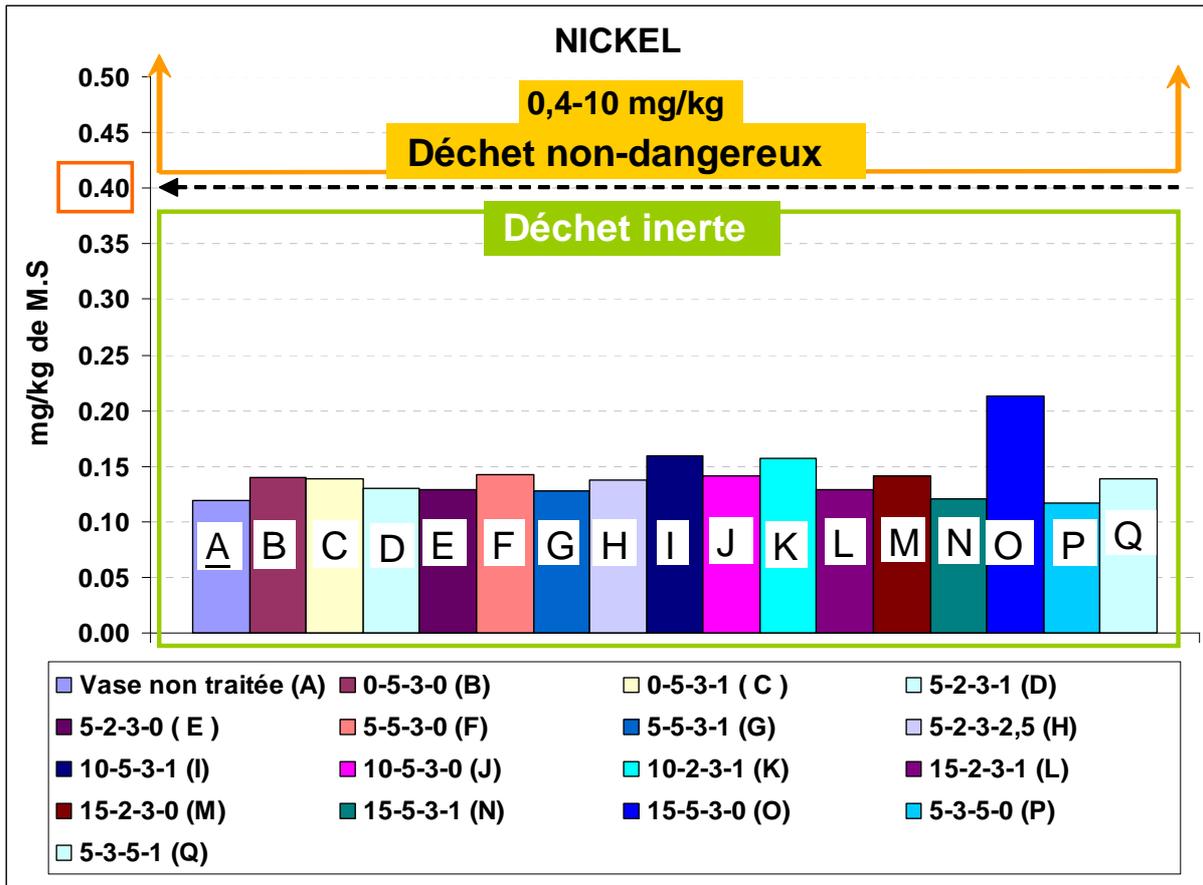


Figure V- 75 : Concentration en Nickel après l'essai de lixiviation dynamique (à pH variable)

Nous estimons que cette légère différence est provoquée par la diversité de composition du sédiment utilisé. Nous avons expliqué précédemment que le sédiment subit une pré étape de séchage en étuve. Et la période de séchage dépend de l'évolution de la teneur en eau du sédiment. Donc la période peut varier suivant leur teneur en eau originale. Nous estimons lors de cet étape nous avons modifié les caractéristiques du sédiment et le taux des métaux lourds.

5.5.1.5. Chlorures

Le mélange sans traitement montre un taux de Chlorures qui le classe dans la catégorie de déchet non dangereux (voir A sur la figure V-76). Par contre avec le traitement au liant, le taux en Chlorures de mélanges traités diminue et situe le produit traité dans la catégorie déchet inerte.

Pour mieux connaître l'effet de la fumée de silice, nous pouvons comparer les mélanges sans et avec de la fumée de silice. Le mélange sans sable 0-5-3C2-0FS3 (B) montre une réduction du taux de chlorure d'environ 30% (par rapport le mélange 0-5-3C2-1FS3, voir C).

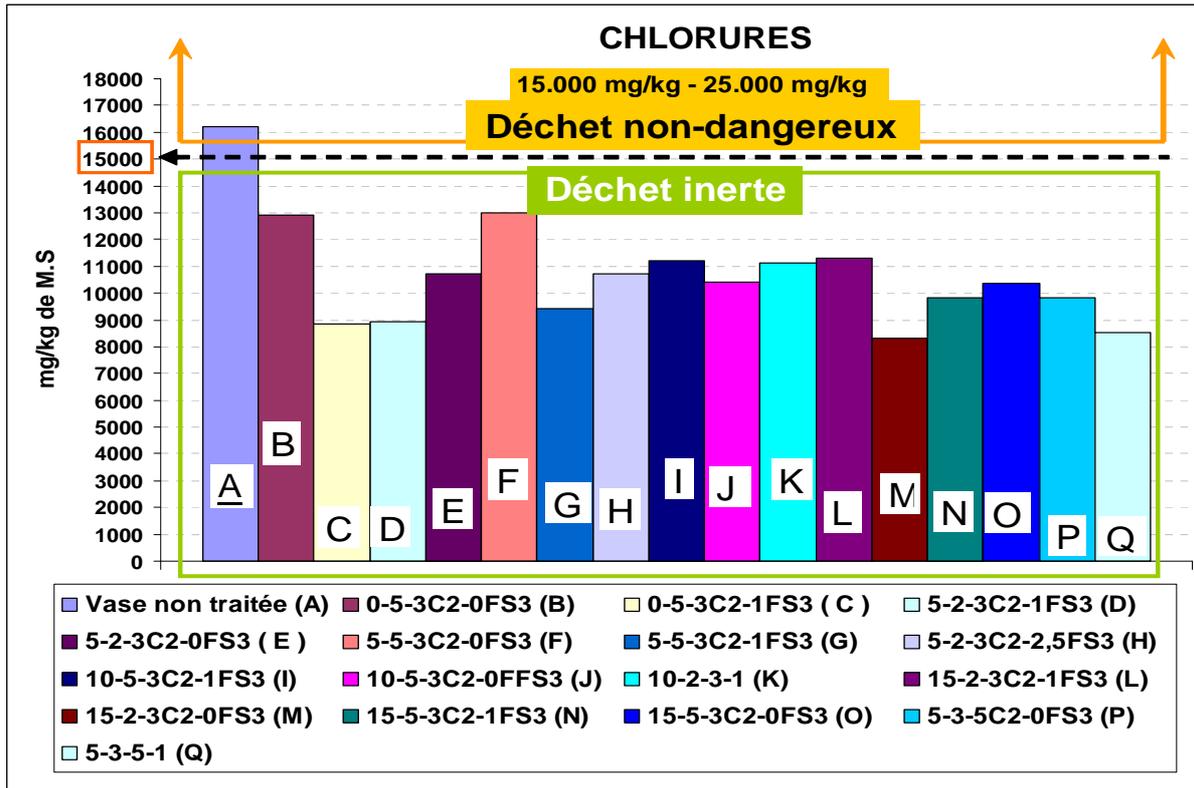


Figure V-76 : Concentration des Chlorures après l'essai de lixiviation dynamique à pH variable

L'effet de fumée de la silice sur les mélanges avec 5% de sable montre une réduction du taux de chlorures d'environ 26%, ce résultat a été obtenu en comparant le mélange 5-5-3C2-0FS3 (F) avec 5-5-3C2-1FS3 (G). Par contre, pour les mélanges avec 15% de sable (15-5-3C2-0FS3) et 15-5-3C2-1FS3, voir M et N) montrent une augmentation du taux de Chlorures d'environ 15%. Pour les mélanges avec 10% de sables (10-5-3C2-0FS3) et 10-5-3C2-1FS3, voir J et I) on voit également une augmentation d'environ 7,4%. Nous estimons que cette augmentation est provoquée par la présence du sable. Nous avons précisé précédemment que les sables ne sont pas homogènes et contiennent de la matière organique. Donc, il y a une possibilité qu'avec un ajout de quantité importante de sable on provoque une dispersion assez importante des résultats obtenus

5.5.1.6. Plomb

Les origines de ce contaminant proviennent de carburants, de combustion de déchets. Le plomb se trouve généralement dans les gateaux de filtration, le boues de traitement des eaux industrielles et les résidus solides d'incinération des déchets et de la métallurgie. L'addition de plomb provoque le retard de la prise pendant l'hydratation du ciment. Grâce à la solution basique présente pendant l'hydratation du ciment, le plomb précipite sous forme de sulfates, PbO, Pb(OH)₂ et un mélange pbO—Pb(OH)₂. Il est possible aussi que le Pb(II) forme des ions complexes contenant jusqu'à des atomes de Pb à haute valeur de pH. Dans l'environnement cimentier, ce cation peut s'adsorber à la surface des silicates et/ou précipiter sous forme de sulfates.

L'effet des liants sur la réduction du taux en Plomb est clairement observé, la figure V-77 montre que les taux en Plomb de tous mélanges traités sont d'environ 0,06 mg/kg soit environ 65% de réduction du taux de plomb par rapport au mélange sans traitement (voir A sur la figure V-77)

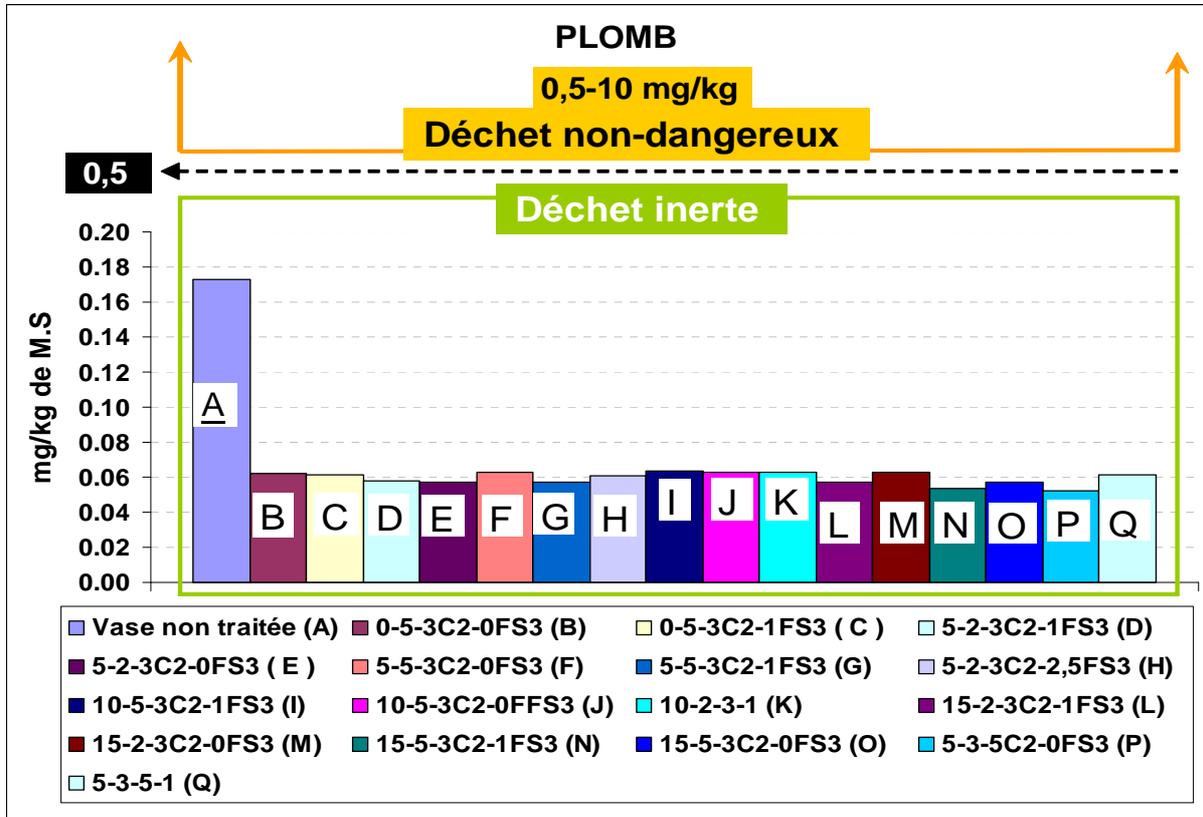


Figure V-77 : Concentration de Plomb après l'essai de lixiviation dynamique (à pH variable)

L'effet de la fumée de silice sur la réduction du largage des métaux lourds, spécialement pour le Plomb est observé. L'effet d'un ajout de sable a un effet négligeable. Les résultats sur tous les mélanges, ne montrent aucune différence importante sur le taux en Plomb observé.

5.5.1.7. Cuivre

Les origines de ce contaminant proviennent des industries électriques, il est transporté par les fleuves, matières actives de véhicules marines antisalissures (Cu₂O).

Le taux de Cuivre pour le mélange sans traitement (sédiment non traité, voir figure V-78) se situe dans la zone de déchet inerte avec une valeur de l'ordre 1,6 mg/kg. Le traitement des liants provoque une réduction assez important de la teneur en Cuivre obtenue.

Le mélange de 5-2-3C2-0FS3 (voir E sur la figure V-78) montre une valeur de taux de Cuivre assez importante par rapport aux autres mélanges. Ceci peut avoir un lien avec le pourcentage de ciment qui n'est pas assez suffisant. Par contre dès que la fumée de silice est ajouté dans les mélanges (5-2-3C2-1FS3, voir D sur la figure V-78), le taux en Cuivre diminue de manière importante.

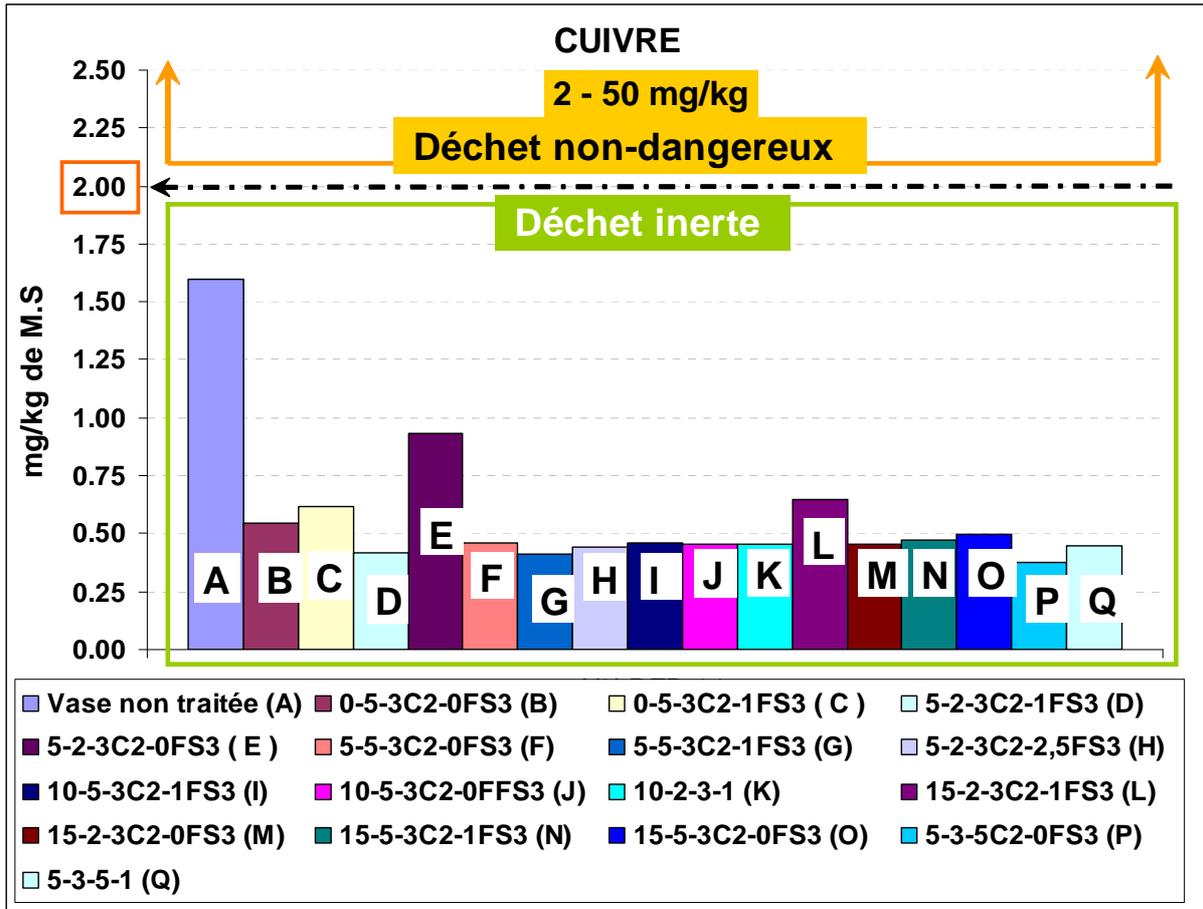


Figure V-78 : Concentration de Cuivre après l'essai de lixiviation dynamique (à pH variable)

5.5.2. L'essai de lixiviation dynamique (l'essai de lixiviation à pH stable).

L'analyse des essais de lixiviation à pH stable, ont révélé que des valeurs de HPA et PCB sont largement en deçà des seuils tolérés par les références fixées par la décision du Conseil n°2003/33/CE. Ces résultats de ces analyses sont présentés en annexe B.

Conclusion

Une valorisation d'un sédiment par ajout de liant hydraulique (ciment) et liant pouzzolanique (cendre volante et fumée de silice) en prenant en compte l'aspect économique a été réalisé. Ce travail s'est orienté vers la technique de formulations de matériaux à base de sédiments fins par ajout de correcteurs granulaires. Pour atteindre la résistance nécessaire à la construction routière, des liants sont indispensables, Ce chapitre a permis de mettre en évidence les points suivants :

- a. Les résultats montrent que la réactivité de la chaux a un rôle très important dans l'évolution des performances mécaniques des mélanges traités à la fumée de silice. En effet, la fumée de silice est considérée comme un liant pouzzolane qui nécessite dans certaines conditions une réactivité de la chaux adéquate pour arriver à une bonne performance mécanique. D'après les résultats obtenus dans cette étude, on démontre que, grâce à sa forte réactivité, la chaux C2 est le meilleur choix pour obtenir les performances mécaniques requises pour les techniques routières.
- b) Parmi les trois types de fumées de silice étudiés, la fumée de silice type 3 a conduit à des performances mécaniques légèrement supérieures aux autres. L'effet d'ajout de sable comme correcteur granulométrique provoque une diminution des performances mécaniques en compression simple. Par contre, pour les essais de durabilité, l'effet d'ajout de sable a montré une amélioration de résistance dans le cas des essais gel-dégel mais une forte sensibilité à l'eau dans le cas des essais mouillage-séchage. Les résultats des essais de durabilité montrent que les dosages des mélanges réalisés fournissent, après les cycles de gel-dégel, des performances mécaniques suffisantes pour une utilisation dans les travaux routiers. En revanche, pour les essais de mouillage-séchage, aucun des mélanges traités ne fournissent la résistance requise (supérieure à 1Mpa). D'après l'analyse des résultats expérimentaux obtenus, on pense qu'une augmentation du dosage de ciment est nécessaire pour réduire cette influence.
- c) Les résultats de l'ensemble des essais montrent que la Sodeline entraîne des performances mécaniques supérieures à celles de la Soproline. Ceci peut être lié aux caractéristiques minéralogiques où la Sodeline contient un pourcentage en SiO_2 et Al_2O_3 plus important que la Soproline, alors que la Soproline possède des particules plus fines que la Sodeline. Par conséquent avec ces résultats on peut conclure que les caractéristiques minéralogiques des cendres volantes ont un rôle plus important que leur granulométrie.
- d) Les résultats montrent que l'ajout de la fumée de silice dans les mélanges ont toujours conduit à une meilleure résistance par rapport aux mélanges sans fumée de silice. Le choix d'augmenter le dosage en ciment jusqu'à 5 % permet d'améliorer les performances mécaniques requises pour la résistance aux cycles de mouillage-séchage afin

d'obtenir des valeurs dépassant 1 Mpa pour l'ensemble des mélanges. Les mélanges avec un pourcentage de 5% de sable donnent les meilleures performances mécaniques pour l'ensemble des essais effectués.

- e) L'analyse des essais de lixiviation, ont révélé que des valeurs de métaux lourds, en deçà des seuils toléré par les références fixée par la décision du Conseil n°2003/33/CE.

**CONCLUSION GENERALE
ET
PERSPECTIVES**

Conclusion Générale

L'objectif de ce travail consistait à améliorer les propriétés mécaniques et environnementale des sédiments fins dragués du Port en Bessin pour une utilisation en couche de forme ou de fondation en technique routier.

Les caractéristiques physiques des sédiments utilisés a été identifiés en classe A₄. La valeur de l'indice de portance immédiat obtenue, à la teneur en eau optimale, a mis en évidence la difficulté de circulation des engins sur le chantier et qu' un mauvais compactage de ces matériaux est à craindre.

Une valorisation d'un sédiment par ajout de liant hydraulique (ciment) et liant pouzzolanique (cendre volante et fumée de silice) en prenant en compte l'aspect économique a été réalisé. Ce travail s'est orienté vers la technique de formulations de matériaux à base de sédiments fins par ajout de correcteurs granulaires. Le but de l'ajout de sable comme correcteurs granulaires est d'améliorer la distribution granulométrique et la diminution de la proportion de fraction fines. Par ailleurs, la présence du sable dans la chambre de ressuyage nous ont conduit à sélectionner ce derniers pour la suite de l'étude.

Dans ce traitement, différentes formulations en liants ont été effectuées. Le dosage en liant est principalement constitué de 3 à 5% de ciment, de 3% de chaux, et de 4 à 8% de cendre volante et de 1% de fumée de silice. Une attention particulière a été portée pour ne pas dépasser un pourcentage maximum de 9% de liant, taux généralement utilisé dans les travaux routiers et acceptable du point de vue économique. De même, l'utilisation d'un fort pourcentage (4-8%) de cendre volante prend en compte également cet aspect économique.

L'étude du comportement mécanique des mélanges proposés, sur la base de trois différences mesures d'éprouvettes cylindriques (4*8 cm et 5*5cm) est appliquée.

Les éprouvettes de 4*8cm ont été utilisées dans les essais de résistance en compression simple et les essais de durabilité (gel-dégel et mouillage-séchage, lixiviation). Les résultats des essais en compression simple ont montré que les différentes formulations pressentent des performances mécaniques satisfaisantes au regard des critères requis pour une utilisation en couche de forme de chaussé (Rc à 28 jours >1MPa).

Le choix de la chaux a été utilisée dans ces essais. Les résultats obtenus montrent que l'utilisation de la chaux avec une forte réactivité provoque une amélioration de la résistance en compression simple.

L'effet de l'augmentation du dosage en ciment provoque une amélioration assez importante de résistance, spécialement aux jeunes âges.

La présence de liant pouzzolanique (fumée de silice et cendre volante) montre également une amélioration des performances mécaniques spécialement en résistance à la compression simple.

La présence de la fumée de silice montre une amélioration de la résistance en compression simple aux jeunes âges et à long terme. Cependant, les mélanges traités avec de la cendre volante montrent également une augmentation de la résistance à la compression simple mais sur une période plus longue.

Pour la période allant jusqu'à 90 jours, les mélanges traités avec les cendres volantes de type Sodeline se situent dans la zone 2, ce qui signifie qu'une son utilisation dans une couche d'assise est possible.

Pour identifier l'effet des liants sur les performances mécaniques des mélanges en traction, des éprouvettes 5*5 cm ont été confectionnées. Les résultats de résistances à la traction à 28 jours ont révélé que, seule le mélange avec un pourcentage de fumée de silice élevé (2,5%) pourrait être utilisé en couche d'assise de chaussé. L'effet de fumée de silice dans cet essai, se manifeste plus sur l'évolution du module d'élasticité que sur la résistance à la traction.

L'essai de durabilité en condition extrême, est étudié au travers trois types d'essais: essai gel-dégel, mouillage séchage et essai de lixiviation.

L'effet du gel-dégel ne montre pas une influence considérable sur les éprouvettes traitées surtout ceux confectionnées avec des liants qui ont montré une amélioration nette de la résistance à la compression.

En revanche, l'essai de mouillage-séchage qui détermine la sensibilité à l'eau a présenté une forte influence. Les résultats de cet essai ont révélé que les mélanges traités à 3% de ciment n'ont pas résistés aux cycles mouillage-séchage à 28 jours. Alors qu'avec un dosage de 5% de ciment, la résistance aux cycles de mouillage-séchage s'est amélioré et les échantillons résistent à cet essai de durabilité.

L'effet de sable comme correcteur de granulométrie a montré un effet irrégulier sur les performances mécaniques des mélanges. Ceci peut être du à l'incohérence de la granulométrie du sable utilisé. On rappelle que le choix de ce sable était purement un choix économique.

Les impacts environnementaux des matériaux étudiés ont été évalués à travers l'essai de lixiviation. Cette étude a démarré avec la base des analyses des résultats effectués par IN VIVO en 2002 qui ont révélé une forte teneur en cuivre qui dépasse largement la valeur de seuil N2 (GEODE). Ce qui signifie que les sédiments présentaient un risque écotoxicologique élevé.

Les résultats obtenus dernièrement en 2008 et 2009 sur les sédiments bruts, montrent une forte atténuation de la concentration de la teneur en cuivres des sédiments marins bruts et qui avec le temps sont passés à un classement en déchets non dangereux.

Cependant, les résultats des sédiments traités au ciment et liants hydrauliques conduisent à une valorisation des sédiments en diminuant d'avantage la teneur des polluants, spécialement le cuivre. Par conséquent, selon le niveau de référence

(Décision du Conseil 2003) ont peut considérer que les sédiments marins du Port en Bessin après traitement est à présent sans risque écotoxicologique.

Une importante campagne d'essais sur chantier menée par le Conseil Général du Calvados a accompagné les essais en laboratoire, allant de la réalisation d'une chambre de ressuyage, au suivi de l'évolution de la teneur en eau, des analyses des caractéristiques géochimiques des sédiments pendant plus d'une année, à la réalisation d'une plate forme expérimentale sur chantier pour valider les résultats des essais en laboratoire.

Au vue des résultats obtenus sur chantier par Dynaplaque et des résultats de lixiviations, le projet de valorisation des sédiments de dragage du Port en Bessin est un succès et valident les résultats obtenus au laboratoire M2C.

Perspectives

1. Pour Optimiser cette étude et permettre une réduction du coût de réalisation de la plate forme d'assise de la chaussée, une nouvelle proposition de dosage en fumée de silice et en ciment a été proposée. Ce dosage consiste à baisser le taux de la fumée de silice à 0,5% et du ciment à 3%, la chaux, par contre, est maintenue à 3% et le sable à 5%. Sur la base de cette nouvelle formulation, une planche expérimentale est en cours de réalisation sur le même site. Cette planche expérimentale sera accompagnée également d'essais en laboratoire.
2. Le succès des résultats des travaux obtenus dans cette étude, nous ouvre les portes pour une étude semblable qui sera menée sur des sédiments de dragage en provenance du port d'Honfleur en collaboration avec Conseil Général du Calvados.
3. Cette étude complète de caractérisation physico-chimique et géotechnique d'un sédiment de dragage contaminé, en laboratoire et validé par des essais sur site réel en vue d'une valorisation des sédiments, peut servir de modèle pour les futures études à mener dans ce domaine.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Abdulkader Khattab S. A., (2002) : Etude multi-échelle d'un sol argileux plastique traité à la chaux.
- [2] Akhter, H., Butler, L.G., Branz, S., Cartledge, F.K., Tittlebaum, M.E., (1990) Immobilization of As, Cd, Cr, and Pb- containing soils by using cement or pozzolanic fixing agents. *Journal of hazardous materials*, 24, 596-614.
- [3] Asavapisit, S., Nantamontry W. et Polprasert, C., (2001). «Influence of condensed silica fume on the properties of cement-based solidified wasted» *Cement and Concrete Research*, Vol.31, pp.1147-1152.
- [4] Agostini F., (2006) « Inertage et valorisation des sédiments de dragage marins » Thèse de l'Ecole Centrale de Lille 207 p
- [5] Alzieu C., :(1999) « Gestion des sédiment portuaires » Dans : Dragage et environnement is en ; Sol in : Etat des connaissances. Editions Ifremer , 223p.,
- [6] Asavapisit, S., Nantamontry W. et Polprasert, C., (2001). «Influence of condensed silica fume on the properties of cement-based solidified wasted» *Cement and Concrete Research*, Vol.31, pp.1147-1152
- [7] Bagherpour, I. et Chobbasti A.J., (2003). « Stabilization of fine-grained soils by adding microsilica and lime or microsilica and cement», *The electronic journal of geotechnical engineering*, Volume 8B, 8p
- [8] Behmanesh J. (2008) ; « Etude de la durabilité d'un sédiment, traité au ciment et additifs » Thèse de doctorat de l'Université de Caen. 214p
- [9] Boutonnet M; et Livet J. (1984) ; Sols traités en assises de chaussée. Influence du traitement des, Thèse de doctorat Université d'Orleans. 224p
- [10] Bagherpour, I. et Chobbasti A.J., (2003). « Stabilization of fine-grained soils by adding microsilica and lime or microsilica and cement», *The electronic journal of geotechnical engineering*, Volume 8B, 8p.
- [11] Busnot, I., (1991). «Les substances humiques : complexants naturels», Thèse de doctorat, Université de Caen, 177 p.
- [12] Bulletin du ciment 1982 « Action de diverses substances sur les béton » Bulletin du ciment (Suisse) n°2. pp 1-9.
- [13] Baryla J.-M., Chenais V., Gavois L. Havard H. (2000) « Effet de sulfate et sulfure sur des marnes traités à la chaux et au liant routier sur un chantier autoroutier » Bulletin des laboratoires des Pont et Chaussées n°224.pp39-48

- [14] Cartledge, F.K., Butler, L.G., (1990) Immobilisation mechanisms in solidification/stabilization of Cd and Pb salts using Portland cement fixing agents. *Environmental science and technology*, 24, 867-873
- [15] Cocke, D.L., Ortego, J.D., McWhinney, H.G., Lee, K., Shulka, S., (1989) A model for lead retardation of cement setting. *Cement and concrete research*, 19, 156-159.
- [16] Colombier, Hermann 1971 « Etude des liants hydrauliques à prise lente » Compte rendu de recherche interne du Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées d'Autun – CETE Lyon. 8p
- [17] Colin D. 2003 « Valorisation des sédiments fins de dragage en technique routière » Thèse de doctorat de l'Université de Caen.
- [18] Cocke, D.L., Mollah, M.Y.A., (1992) The chemistry and microstructure of solidified waste forms. In: R.D. Spence (Ed.), *Chemistry and microstructure of solidified waste forms* (Ed. by R.D. Spence), pp. 1-39. Lewis.
- [19] Cocke, D.L., Mollah, M.Y.A., (1993) The chemistry and leaching mechanisms of hazardous substances in cementitious solidification/stabilization systems. In: R.D. Spence (Ed.), *Chemistry and microstructure of solidified waste forms* (Ed. by R.D. Spence), pp. 187-242. Lewis.
- [20] Cimpelli C., Kergoet M., (1974) : Utilisation en couche de forme des argiles vertes de Romainville traités à la chaux et au ciment. Bulletin des Laboratoire des Pont et Chaussées n°73. pp9-15.
- [21] Clozel B., Leloup and Ph.Freyssinet (2003) « Valeurs guides intervenant dans la gestion des sédiment et méthodologie d'élaboration de ces valeur », synthèse bibliographique, Paris
- [22] Diet, J.N., (1996) Stabilisation/solidification des déchets: perturbation de l'hydratation du ciment Portland par les substances ontenues dans les boues d'hydroxydes métalliques, *Thèse de doctorat*, INSA Lyon. France, 170p.
- [23] Fowler, G.D., Asavapisit, S., (1995) A study of the chemical effect of metal hydroxides upon cement hydratation reaction. In: International congress on wastes solidification-stabilization processes, Nancy, France.
- [24] Foucher J. (2005) « Valorisation des débelais sableux de dragage portuaire en France métropolitaine » ENTPE.
- [25] Gosselin A., Blackburn D., Bergeron M., (1999) "Protocole d'évaluation de latraitabilité des sédiments, des sols et de boues à l'aide des technologies minéralurgiques » Direction de la protection de l'environemental Canada. Mars 1999

- [26] Gleize P.J.P., Müller A., et Roman H.R., (2003). « Microstructural investigation of a silica fume – cement –lime mortar», *Cement and Concrete composites*, Vol.25, pp.171-175.
- [27] Fantozzi-Merle C. 2003 « Etude de matériaux à base de liant hydraulique contenant des polluants organiques modèles : propriétés structurales et de transfert » Thèse de doctorat de l'INSA de Lyon. 30 septembre 2003. 270p.
- [28] García-Sánchez, A., Alastuey, A., Querol, X., (1999) : Heavy metal adsorption by different minerals: application to the remediation of polluted soils. *Science of the total environment*, 242, 179-188.
- [29] García, M.A., Chimenos, J.M., Fernández, A.I., Miralles, L., Segarra, M., Espeill, F., (2004) : Low-grade MgO used stabilize heavy metals in highly contaminated soils. *Chemosphere*, 56, 481-491.
- [30] Gleize P.J.P., Müller A., et Roman H.R., (2003). « Microstructural investigation of a silica fume – cement –lime mortar», *Cement and Concrete composites*, Vol.25, pp.171-175.
- [31] GTS, Guide Technique : Traitement des sols à la chaux et aux liants hydrauliques. Application à la réalisation des remblais et des couches forme. LCPC-SETRA (Paris-Bagneux) Jan2000. 240p
- [32] GTS, Guide technique « Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques. Application à la réalisation des remblais et des couches de forme », LCPC-SETRA (Paris-Bagneux) jan 2000. 240p.
- [33] Heimann, R.B., Conrad, D., Florence, L.Z., Neuwirth, M., Ivey, D.G., Mikula, R.J., Lam, W.W., (1992) Leaching of simulated heavy metal waste stabilized/solidified in different cement matrices. *Journal of hazardous materials*, 31, 39-57.
- [34] Hossain, K.M.A., Lachemi M. et Easa S. (2007). « Stabilized soils for construction applications incorporating natural resources of Papua new Guinea», *Resources Conservation & Recycling*, Vol. 51, pp. 711-731.
- [35] Imyim A. 2000 : Méthodologie d'évaluation environnementale des déchets stabilisés par liants hydrauliques. Thèse de doctorat de l'Université de Lyon, 181 pages
- [36] Kindness, A., Marcias, A., Glasser, F.P., (1994) Immobilization of chromium in cement matrices. *Waste management*, 14, 3-11
- [37] Kalkan, E. et Akbulut S., (2004). «The positive effects of silica fume on the permeability, swelling pressure and compressive strength of natural clay liners», *Engineering geology*, Vol.73, pp.145-156.

- [38] Kribi S. 2005 « Décomposition des matières organiques et stabilisation des métaux lourds dans les sédiments de dragage ». Thèse de doctorat de l'Institut des Sciences Appliquées de Lyon, 220 pages.
- [39] Lamathe J. Brouwet J. 1977 « Action des acides humiques sur la prise d'une grave-laitier » Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées n° 91. pp 43-48.
- [40] M. Sadrin (2003). Projet de fin d'étude .E.S.I.T.(Ecole Supérieure d'ingénieurs des travaux de la construction) de Caen
- [41] Macphee, D.E., Glasser, F.P., (1993) Immobilization science of cement systems. *MRS bulletin*, March 1993, 66-71.
- [42] McWhinney, H.G., Cocke, D.L., Balke, K., Ortego, J.D., (1990) An investigation of mercury solidification and stabilization in Portland cement using xray photoelectron spectroscopy and energy dispersive spectroscopy. *Cement and concrete research*, 20, 79-91.
- [43] Marchand M., Abarnou A., Marcaillou-Lebaut C. 1990 «les polychlorobiphényles (PCB) en milieu marins» Rapport scientifique et techniques de l'IFREMER, n°18, pp 49-51
- [44] Meij R. and H. te Winkel (2001). International Ash Utilization Symposium "Health aspect of Coal Fly Ash
- [45] OSPAR 2000 « Bilan de santé 2000. commission OSPAR » Londres 108 + vii pp.ISBN ou <http://www.ospar.org/fe/html/qsr2000/qfe0.htm>
- [46] OSPAR (1998) D »cision 98/249/CE du conseil. JO L 104 du 03/04/198.
- [47] Orsetti S. 1997 "Influence des sulfates sur l'apparition et le développement de pathologies dans les matériaux de génie civil traités ou non aux liants hydrauliques. Cas du plâtre dans les granulats issus de produit de démolition» Thèse de Doctorat Paris VI 472p
- [48] Malhotra, V.M. et Berry E., (1989). «Utilisation des cendres volantes dans la préparation du béton», Ottawa, Canada, CANMET Energies mines et ressources, pp.41-185
- [49] Mehta K. P. et Montyero P.J.M., (2001). «Concrete: Microstructures, properties and materials», Edité électroniquement par l'auteur, 239 p.
- [50] Miller, E., W., (1993). «Blended cements-application and implication», cement and concrete composition, vol.15, pp.237-245..
- [51] Perrin 1992 : Expansion of lime treated clays containing sulfates. Proc.7 conf on expansive soil New York vol.1 pp 409-414.

- [52] Pettry T.M. 1994 : Studies of factors causing and influencing heave of lime treated clay soil. Contract Rep. US Army Engineers.
- [53] PREDIS Nord –Pas –de Calais (2002). Guides Techniques régionaux relatifs à la valorisation des déchets et des co-produits industriels
- [54] Potgieter, J.H., Potgier-Vermaak, S.S., Kalibantonga, P.D., (2006) : Heavy metals removal from solution by palygorskite clay. *Minerals engineering*, 19, 463-470.
- [55] Poon, C.S., Peters, C.J., Perry, R., Barnes, P., Barker, A.P., (1985) Mechanisms of metal stabilization by cement based fixation processes. *Science of the total environment*, 41, 55-71.
- [56] Rao, S.M., Reddy B.V.V. et Muttharam M., (2001). «The impact of cyclic wetting and drying on the swelling behaviour of stabilized expansive soils», *Engineering Geology*, Vol.60, pp.23-233.
- [57] Ray Francis : Etude physico-mécanique et environnementale du composite vase-chaux et additifs
- [58] Rekik B 2007 « Propriétés géotechniques des sédiments de dragage traités au ciment » Thèse de doctorat de l'Université de Caen
- [59] Rekik B., Boutouil M. 2008 « Organic matter and cement contents effect on geotechnical properties of cement treated sediments » Proceeding International Symposium Sediment Management, 9-11 July 2008, Lille, France, 2^{ème}cole des mines de Douai/12SM, Lille, pp 225-233.
- [60] Rey F., Levacher D. Quenec'h J.-L. (2000) : Composites cimentiers à base de mélanges vase-chaux ; étude globale de la micro-structure minéralo-organique et des comportements physico-mécaniques. *Revue française de génie civil* vol 6, n°4 pp 663-681
- [61] R. L. Parsons and E. Kneebone 2005 «Field performance of fly ash stabilised subgrades» *Ground Improvement* N°1, pp33-38.
- [62] Senol A., Edil B., Sazad M., Shafique-Bin., Acoste H., Benson C., 2006 : Soft subgrade, stabilization by using various fly ash Resources, Conservation and Recycling, Volume 46, Issue 4 April 2006, Pages 365-37.
- [63] Schneider G. 2001 : Boues de curage des cours d'eau. *CE*, 43, 146-147. Source : <http://www.inra.fr/dpenv/curage.htm>
- [64] Silitonga E., Shrivastava A., Levacher D., 2008 : Influence of fly ash addition on the mechanical properties of treated dredged material. International symposium on sediment management, Lille 9-11 July 2008. p 243-252

- [65] Silitonga E., Levacher D., Mezazigh S., Shirvastava A.: Investigating the influence of dredged material stabilized by pozzolanic binders on geotechnical properties. Xème journées nationales Génie Côtier- Génie Civil, Sophia AntiPolis 14-16 octobre 2008.
- [66] Stegemann, J.A. et Cote P.L., (1992). «Protocole d'évaluation proposé pour les déchets solidifiés à base de ciment», Série de la protection de l'environnement SPE3/HA/9, Environnement Canada, 49 p.
- [67] Teboul Stéphane (2004). Formulation d'un liant pouzzolanique pour le traitement des sols en techniques routières. Projet de fin d'étude. E.S.I.T. (Ecole Supérieure d'ingénieurs des travaux de la construction) de Caen
- [68] Toubeau P. 1987 : « Optimisation des caractéristiques géotechniques et minéralogiques dans le traitement des sols ; Application aux betons de terre » Thèse de doctorat de l'Université Paris VI 183p
- [69] Than N.T. (2009) « Valorisation de sédiments marins et fluviaux en technique routière » Thèse de doctorat, l'Ecole des Mines de Douai, 187p
- [70] Thomas M.D.A, Kettke J.R. et Morton. A.J., 1989 :Expansion of cement-stabilized Minestoned due to oxidation of pyrite, Transportation Research Record. Pp 113-120
- [71] Tremblay, H., Duchesne J., Locat J. et Leroueil S., (2002). De chaussée. «Influence of the nature of organic compounds on fine soil stabilization with cement», Canadian Geotechnical Journal, Vol.39, pp.535-546.
- [72] Venuat M. (1990) : Le traitement des sols à la chaux et au ciment. L'auteur éditeur ; CERILH. 430p.
- [73] Young J. F. (1976) « Reaction mechanisms of organic admixtures with hydrating cement compounds» Transport research record. n°564. pp 1-9
- [74] Yin, J.H. et C.K. Lai, (1998) : Strength and stiffness of Hong Kong marine deposits mixed with cement, Geotech. Eng., 29 (1), pp.29-44.
- [75] Verhasselt A. (1978) : n°1, II et III, CRR, communication personnelle.
- [76] Zhibo D.2008 Caractérisation, stabilisation et solidification de sédiment marin. Thèse de doctorat, Université de Caen, 145p.
- [77] Zamorani, E., Sheikh, I.A., Serrini, G., (1988) Physical property measurements and leaching behaviour of chromium compounds solidified in a cement matrix. *Waste management*, 8, 239-245.

LISTE DES FIGURES

Liste des figures

Figures	Page
Figure II-1 : Données relatives aux matériaux dragués dans les ports français en 1994, 1995 et 1996. www.ifremer.fr (cité dans la thèse de Agostini 2006).....	5
Figure II-2 : L'évolution de limite d'Atterberg avec différents pourcentages de matières organiques.....	10
Figure II-3 : Evolution de la pression de pré consolidation σ'_{pc} en fonction du dosage en ciment et de la teneur en MO.....	11
Figure II-4 : Evolution des caractéristiques de l'optimum Proctor suite au chaulage du sol (gts 2000).....	23
Figure II-5 : Courbes Proctor Normal pour le sédiment non traité et avec traité avec différents pourcentages de cendre volante (Silitonga et al 2008).....	25
Figure II-6 : relation entre pourcentage de cendres volantes et la résistance en compression simple (Senol, 2006).....	26
Figure II-7 : Evolution des résistances à la compression	27
Figure II-8 : Effet de la quantité de la fumée de silice sur l'évolution de la teneur en eau optimale (Kalkan et Akbulut, 2004).....	28
Figure II-9 : Performance mécanique obtenues avec la quartite pour l'ensemble des formulations testés (Colin 2003).....	30
Figure II-10 : Plate-forme support de chaussée.....	31
Figure II-11 : Zones de classement du matériau en fonction de sa résistance en traction R_t et de son module élastique E (GTR, 1992).....	32
Figure II-12 : critère de l'IPI pour la différente couche de la chaussé (NF P 98 115)	33
Figure III-1 : Vue aérienne du port en Bessin	36
Figure III-2 : Dragage mécanique sur ponton au bassin n°2.....	36
Figure III-3 : Déversement des sédiments dans la chambre de dépôt par camion.....	37
Figure III-4 : Plan du trajet du Port à la chambre de ressuyage.....	37
Figure III-5 : Constitution de la chambre de ressuyage effectuée.....	38
Figure III-6: Evolution de l'état superficiel des sédiments.....	38
Figure III-7 : Distribution granulométrique des sédiments du Port-en-Bessin.....	39
Figure III-8 : Classification triangulaire des sol fins.....	40
Figure III-9: La teneur en eau en fonction du nombre de chocs de la coupelle.....	44
Figure III-10 : Diagramme de plasticité de Casagrande pour les sédiments du Port en Bessin.....	44
Figure III-11: Matériel et méthode de réalisation des essais Proctor.....	45
Figure III-12: Courbe Proctor Modifié des sédiments dragués du port Port en Bessin.....	46
Figure III-13: Indice de Portance immédiat des sédiments dragués du Port en Bessin.....	46
Figure III-14: Définition de la loi de Bragg (Hammond, 2001).....	47
Figure III-15 : Diagramme de caractéristiques minéralogique de sédiment du Port en Bessin.....	49

Figure IV-1 : Distributions granulométriques de la fumée de silice, de la chaux et du ciment utilisés.....	57
Figure IV-2 : Distributions granulométriques des fumées de silice, de la chaux et du ciment utilisés.....	58
Figure IV-3 : Distribution granulométrique des cendres volantes.....	61
Figure IV-4 : Distribution granulométrique des fumées de silice, de la chaux, du ciment et des cendres volantes utilisés.....	62
Figure IV-5 Pourcentage de CaO libre pour la Sodeline.....	64
Figure IV-6. Pourcentage de CaO libre pour la Sopreline.....	65
Figure IV-7. Résultats des essais Chapelle pour la Sodeline au four et agitateur..	66
Figure IV-8 : Courbe de la réactivité des différents chaux utilisées.....	67
Figure IV-9 : Distribution granulométrique du sable utilisé.....	69
Figure IV-10 : Protocole de malaxage.....	70
Figure IV-11 : Aspect visuel des différents états des sédiments avant traitement.	
Figure IV-12 : Moule 50*50mm.....	72
Figure IV-13 : Illustrations de la confection des éprouvettes.....	72
Figure IV-14 : Illustration de la conservation des éprouvettes.....	73
Figure IV-15 : Moule 4*8 cm.....	73
Figure IV-16 : Compactage et confection des éprouvettes.....	75
Figure IV-17 : Dispositif expérimental d'essai en compression simple.....	76
Figure IV-18 : Schéma synoptique des essais de G/D et M/S.....	77
Figure IV-19 : Cycle de gel-dégel subis par le sédiment traité.....	78
Figure V-1 : Courbes Proctor Normal de sédiment non traité et traité avec 2% de ciment.....	82
Figure V-2 : Courbes IPI pour le sédiment non traité et traités avec 2% de ciment.....	83
.Figure V-3 : Evolution des résistances à la compression pour le sédiment traité avec deux types de chaux sans ajout de sable.....	84
Figure V-4 : Courbes Proctor Normal pour le sédiment non traité et traité avec 2% de ciment.....	87
Figure V-5 : Courbes IPI pour le sédiment non traité et des traité avec 2% de ciment.....	87
Figure V-6 : Evolution des résistances à la compression pour le sédiment traité avec deux types de chaux et 5% de sable.....	89
.Figure V-7 : Courbes Proctor Normal pour sédiment non traité et traité avec 2% de ciment.....	91
Figure V-8 : Courbes IPI pour le sédiment non traité et traité avec 2% de ciment	
Figure V-9 : Evolution des résistances à la compression pour le sédiment traité avec deux types de chaux et 10% de sables.....	92
Figure V-10 : Courbes de Proctor Normal des sédiments non traités et traités avec 2% de ciment.....	95
Figure V-11 : Evolution de la portance d'un sédiment non traité et traité avec 2% de ciment.....	96
Figure V-12 : Résistance mécaniques obtenues sur le sédiment traités avec deux types de chaux et 15% de sable.....	97
Figure V-13. Evolution de Rc mécaniques obtenues sur le sédiment traité avec deux types de fumée de silices sans ajout de sable.....	100
Figure 14 : Evolutions de la perte de masse des échantillons sans sable soumis à des cycles gel-dégel.....	101

Figure V-15 : Evolution de la résistance en compression simple d'éprouvettes sans sable soumises à des cycles de gel-dégel (1 ^{ère} série).....	102
Figure V-16 : Evolution de la résistance en compression simple d'éprouvettes sans sable soumises à des cycles de gel-dégel (2 ^{ème} série).....	103
Figure V-17 : Evolution de la résistance en compression simple d'éprouvettes sans sable soumises à des cycles de mouillage-séchage (2 ^{ème} série)...	104
Figure V-18 : Evolution de Rc pour le sédiment traité avec différents types de fumée de silice avec un ajout de 5% de sable.....	106
Figure 19 : Evolution de la perte de masse des échantillons soumis à des cycles gel-dégel avec 5% de sable.....	108
Figure V-20 : Evolutions des résistances en compression simple d'éprouvettes soumises à des cycles de mouillage-séchage avec ajout de 5% de sable (1 ^{ère} série).....	109
Figure V-21: Evolution de la résistance en compression simple des éprouvettes soumises à des cycles de mouillage-séchage avec ajout de 5% de sable (2 ^{ème} série).....	110
Figure V-22 : Evolution de la résistance en compression simple d'éprouvettes soumises à des cycles de mouillage-séchage sans l'ajout de sable (2 ^{ème} série).....	111
Figure V-23 : Evolution des résistances pour le sédiment traité aux différents types de fumée de silice avec un ajout de 15% de sable.....	113
Figure 24 : Courbes d'évolution de la perte de masse des échantillons soumis à des cycles gel-dégel avec 15% de sables.....	114
Figure V-25 : Evolution de la résistance en compression simple d'éprouvettes soumises à des cycles de gel-dégel avec un ajout de 15% de sable (1 ^{ère} série).....	115
Figure V-26 : Evolution de la résistance en compression simple d'éprouvettes soumises à des cycles de gel-dégel avec l'ajout de 15% de sable (2 ^{ème} série).....	119
Figure V-27 : Evolution de la résistance en compression simple d'éprouvettes soumises à des cycles de mouillage-séchage sans l'ajout de sable (2 ^{ème} série).....	122
Figure v-30 : Evolution de la résistance en compression simple des éprouvettes soumises a des cycles de gel-dégel sans ajout de sable a 7 jours.....	120
Figure v-31 : Evolution de la résistance en compression simple des Eprouvettes soumises a des cycles de gel-dégel sans ajout de sable a 28Jours.....	121
Figure v-33 :Résistance en compression simple des sédiments traites avec 5% de sable.....	123
Figure V-34 : Evolution des pertes de masse des échantillons soumis à des cycles gel-dégel pour différents pourcentages de cendres volantes avec un ajout de 5% de sable.....	124
Figure V-35 : Evolution de la résistance en compression simple des éprouvettes soumises à des cycles de gel dégel avec 5% de sable à 7 jours.....	125
Figure V-36 : Evolution de la résistance en compression simple des éprouvettes soumises à des cycles de gel-dégel avec un ajout de 5% de sable à près 28 jours.....	126
Figure V-37 : Evolution de la résistance en compression simple des éprouvettes soumises à des cycles de mouillage-séchage à 28 jours avec un ajout de 5% de sable.....	127

Figure V-38 : Résistance en compression simple des sédiments traités avec un ajout de 15% de sable.....	128
Figure V-39 : Evolution des pertes de masse des échantillons soumis à des cycles gel-dégel pour différents pourcentages de cendres volantes avec un ajout de 15% de sable.....	129
Figure V-40 : Evolution de la résistance en compression simple des éprouvettes soumises à des cycles de gel dégel à 7 jours avec un ajout de 15% de sable.....	130
Figure 41 : Evolution de la résistance en compression simple des éprouvettes soumises à des cycles de gel dégel à 28 jours avec un ajout de 15% de sable.....	131
Figure V-42 : Evolution de la résistance en compression simple des éprouvettes soumises à des cycles de mouillage-séchage à 28 jours avec un ajout de 15% de sable.....	132
Figure V-43 : Courbes Proctor normal du sédiment non traité et des sédiments traités avec 5% de ciment et 3% de chaux.....	132
Figure V-45 : Performance mécaniques obtenues sur le sédiment traités à 5% de ciment et sans l'ajout de sables.....	135
Figure V-46 : Evolution de la résistance en compression simple d'éprouvettes soumises à des cycles de mouillage-séchage sans l'ajout de sable (1 ^{ère} série).....	137
Figure V-47 : Evolution de la résistance en compression simple d'éprouvettes soumises à des cycles de mouillage-séchage sans l'ajout de sable (2 ^{ème} série).....	138
Figure V-48 : Evolution de la résistance en compression simple d'éprouvettes soumises à des cycles de mouillage-séchage sans l'ajout de sable (2 ^{ème} série).....	139
Figure V-49 : Performances mécaniques obtenues sur les sédiments traités aux 5% de ciment et un ajout de 5% de sables.....	140
Figure V-50 : Evolution de la résistance en compression simple des éprouvettes soumises à des cycles de mouillage-séchage avec l'ajout de 5% de sable (1 ^{ère} série).....	142
Figure V-51 : Evolution de la résistance en compression simple des éprouvettes soumises à des cycles de gel-dégel avec un ajout de 5% de sable (2 ^{ème} série).....	143
Figure V-52 : Evolution de la résistance en compression simple d'éprouvettes soumises à des cycles de mouillage-séchage avec l'ajout de 5% de sables (2 ^{ème} série).....	144
Figure V-54 : Evolution de la résistance en compression simple des éprouvettes soumises à des cycles de gel-dégel avec l'ajout de 10% de sable (1 ^{ère} série).....	148
Figure V-57 : Evolution de la résistance en compression simple d'éprouvettes soumises à des cycles de mouillage-séchage avec l'ajout de 10% sables (2 ^{ème} série).....	150
Figure V-58 : Performance mécaniques obtenues sur le sédiment traités à deux différents types de fumées de silices avec l'ajout de 15% de sables....	151
Figure V-59 : Evolution de la résistances en compression simple des éprouvettes soumises à des cycles de gel-dégel avec un ajout de 15% de..... sables (1 ^{ère} série).....	151
Figure V-60: Evolution de la résistance en compression simple des éprouvettes	

soumises à des cycles de gel-dégel avec un ajout de 10% de sables (2 ^{ème} série).....	153
Figure V-61 : Evolution de la résistance en compression simple d'éprouvettes soumises à des cycles de mouillage-séchage avec l'ajout de 15% sables (2 ^{ème} série).....	155
Figure V-62 : Illustration de l'essai de compression diamétral (essai Brésilien)....	156
Figure V-63 : Performances mécaniques en traction mesurées à 28 jours des formulations avec ou sans fumée de silice.....	158
Figure V-64 : Performances mécaniques en traction mesurés à 28 jours des formulations avec deux différents types de cendres volantes.....	159
Figure V-65 : Performance mécaniques mesurés à 90 jours des formulations avec ou sans fumée de silice.....	161
Figure V-66 : Loi de Darcy sur un élément de volume.....	162
Figure V-67 : Cellule triaxiale équipée de contrôleurs pression-volume.....	163
Figure V-68 : Volumes d'eau entrant et sortant en fonction du temps, Gradient de charge $\Delta u = 50$ kPa avec une contrainte totale de confinement de 100 kPa de la série n°1.....	165
Figure V-69 : Volumes d'eau entrant et sortant en fonction du temps, Gradient de charge $\Delta u = 50$ kPa avec une contrainte totale de confinement de 300 kPa de la série n°1.....	165
Figure V-70: Volumes d'eau entrant et sortant en fonction du temps, Gradient de charge $\Delta u = 50$ kPa avec une contrainte totale de confinement de 500 kPa de la série n°1.....	166
Figure V-72 : Concentration en Zinc relevées après l'essai de lixiviation dynamique à pH variable.....	171
Figure V-73 : Concentration en Sulfates après l'essai de lixiviation dynamique à pH variable.....	173
Figure V-74 : Concentration en Cadmium après l'essai de lixiviation dynamique .à pH variable.....	173
Figure V-75 : Concentration en Nickel après l'essai de lixiviation dynamique (à pH variable).....	174
Figure V-76 : Concentration des Chlorures après l'essai de lixiviation dynamique à pH variable.....	175
Figure V-77 : Concentration de Plomb après l'essai de lixiviation dynamique (à pH variable).....	176
Figure V-78 : Concentration de Cuivre après l'essai de lixiviation dynamique (à pH variable).....	177
Figure VI-1: (a) partie de la chambre de dépôt où les sédiments ont été récupérés, (b) et (c) zone de préparation des mélanges.....	181
Figure VI-2 : Cadres pour le dosage en (a) pour le ciment et le sable, (b) pour la chaux (c) pour la fumée de silice.....	181
Figure VI-3 : Mensurations de cadres mensuration.....	182
Figure VI-4 : Procède de mise en place de la chaux.....	183
Figure VI-5 : Malaxage en place.....	183
Figure VI-6 : Etat des sédiments après le passage d'engin de mélangage.....	184
Figure VI-7 : Mise en place du sable et du ciment.....	185
Figure VI-8 : Mise en place de fumée de silice.....	186
Figure VI-9 : Procès d'une mise en place de fumée de silice.....	186

Figure VI-11 : Opération de compactage du matériau.....	187
Figure VI-12 : Opération extraction du matériau.....	188
Figure VI-13 : Opération de mise en du matériau sur la planche d'essai.....	188
Figure VI-14 : l'opération de compactage la 1 ^{ère} couche.....	189
Figure VI-15 : Opération de mise en matériau de la 2 ^{ème} couche.....	180
Figure VI-16 : Opération de compactage de la 2 ^{ème} couche.....	190
Figure VI-17: L'opération de mesure de portance par la Dynaplaque 2.....	192
Figure VI-18: zone de préparation des planches.....	191
Figure VI-19 : Portance de la planche avec un ajout de fumée de silice.....	193
Figure VI-20 : Les valeurs de portance de planche avec et sans un ajout de fumée de silice.....	194

LISTE DES TABLEAUX

Liste des tableaux

Tableaux	Page
Tableau II-1 : Quantité de matériau dragué dans quelques port français d'après Foucher (Foucher 2005) (valeur exprimé en mille tonnes du matériau sec).....	5
Tableau II-2 : Quantité de matériau de dragage déversé en mer dans quelques pays européens, source OSPAR 2004-2005 (cité dans la thèse de Thanh).....	5
Tableau II-3: Classification des sols en vue des dragages d'après l'AIPCN.....	8
Tableau III-4 : Sources de pollution des métaux lourds citée dans la guide méthodologique d'enlèvement des sédiments, (Baize et Janiec,1994)	12
Tableau II-5 : Niveaux de préférence selon L'arrête du 14 Juin 2000.....	16
Tableau II-6 Seuils de concentration en sulfate proposé par différents auteur (Imyim.2000, cité par Thanh).....	17
Tableau II-7 : Valeurs de référence du port autonome de Rouen.....	17
Tableau II-8 : Perméabilités des échantillons mesurées par cellule triaxiale (Behmanesh 2008).....	29
Tableau II-9 : Classe mécanique d'un matériau traité en fonction de ses caractéristiques à long terme et de son mode de fabrication (GTS, 2000).....	32
Tableau II-10 : Détermination de la classe de la plate-forme en fonction de la classe de l'arase, des performances mécaniques du matériau et de l'épaisseur de la couche de forme.....	32
Tableau II-11 : Coefficients empiriques en fonction de la nature de liant utilisés (N P 98 113).....	33
Tableau III-1 : Données granulométriques des sédiments de Port-en-Bessin.....	40
Tableau III-2: Masse volumique des particules solides des sédiments.....	41
Tableau III-3 : Pourcentage de matières organiques des sédiments de bassin ² du Port en Bessin.....	42
Tableau III-4: Limites d'Atterberg des sédiments du Port en Bessin.....	44
Tableau III-5: Valeurs au bleu de méthylène des sédiments du Port en Bessin...	45
Tableau III-6 : Caractéristique de certaines argiles (Le Roux, 1969).....	48
Tableau III-7 : Pourcentages relatifs des espèces argileuses présentes dans les sédiments.....	48
Tableau III-8 : Caractéristique géochimique des sédiments de bassin n ² (prélèvements effectués en 2001, 2002,2003 et 2004).....	50
Tableau III-9 : Caractéristique géochimique des sédiments du bassin n ² (prélèvements effectué en 2002 par INVIVO).....	51
Tableau III-10 : Caractéristique géochimique des sédiments du bassin n ² (prélèvements effectué en 2004 et 2005).....	53
Tableau III-11 : Caractéristique géochimique des sédiments du bassin n ² (prélèvements effectué en 2002, 2008 et 2009).....	54
Tableau III-12 : Caractéristique géochimiques des sédiments de bassin n ² (2001 –2009).....	55

Tableau IV-1 : Résultats granulométriques des sédiments, des fumées de silice, de la chaux et du ciment.....	58
Tableau IV-2 : Composition chimique des trois fumées de silice utilisées.....	59
Tableau IV-3. Résultats des analyses granulométriques obtenues sur les cendres volantes.....	61
Tableau IV-4. Analyse granulométriques des liants utilisées	63
Tableau IV-5. Composition chimique de Sodeline et Soproline.....	63
Tableau IV-6. Pourcentages moyens de chaux libre en solution.....	65
Tableau IV-7 : Pourcentage de matières organiques des sédiments de bassin n°2 du Port en Bessin.....	69
Tableau V-1 : Pourcentages des mélanges de liant utilisées.....	81
Tableau V-2 : Résistances mécaniques à la compression obtenues sur le sédiment traité avec deux différentes types de chaux sans ajout de sable.....	85
Tableau V-3 : Résistances mécaniques à la compression obtenues sur le sédiment traités avec deux types de chaux et un 'ajout de 5% de sable.....	89
Tableau V-4 : Performances mécaniques obtenues sur un sédiment traité avec deux types de chaux avec un ajout de 10% de sable.....	93
Tableau V-5 : Résistance mécaniques obtenues sur le sédiment traité sur deux types de chaux et un 'ajout de 15% de sables.....	97
Tableau V-6 : Pourcentages des mélanges de liant utilisées.....	98
Tableau V-7 : Résistance mécaniques obtenues sur le sédiment traité avec différents types de fumée de silice sans ajout de sable.....	99
Tableau V-8 : Performance mécaniques obtenues sur le sédiment traités à deux différentes types de fumées de silices avec l'ajout de 5 de sables.....	107
Tableau V-9 : Résistances mécaniques obtenues sur le sédiment traités aux deux différentes types de fumée de silice avec un ajout de 15 de sable.....	113
Tableau V-10 : Pourcentages des mélanges de liant utilisées.....	117
Tableau V-11 : Performances mécaniques obtenues sur le sédiment traité à 5% de ciment sans ajout de sable.....	136
Tableau V-12 : Performances mécaniques obtenues sur les sédiments traités à 5% de ciment et avec un ajout de 5% de sable.....	141
Tableau V-13: Performance mécaniques obtenues sur le sédiment traités à 5% de ciment et l'ajout de 10% de sables.....	145
Tableau V-14 : Performances mécaniques obtenues sur le sédiment traités à 5% de ciment et un ajout de 15% de sable.....	150
Tableau V-15 : Echantillons avec les dosages en liants et sable et leur résistance à la compression simple R_c à 60 jours.....	164
Tableau V-16 : Récapitulatif des conditions d'essais et résultats des mesures de l'essai de perméabilité à charge constante de la série n°1.....	166
Tableau V-17 : Perméabilités des échantillons mesurées par cellule triaxiale	165
Tableau V-18 : Caractéristique géochimique des sédiments de bassin n°2 (prélèvements ont été effectué en 2004 et 2005).....	169
Tableau V-19 : Extrait des valeurs limites (test de lixiviation sur la base d'un ratio liquide solide de 10 l/kg).....	169

Tableau VI-1 : Résultats des mesures de portance par Dynaplaque 2.....	190
Tableau VI-2 : Caractéristique géochimique (métaux lourds) des sédiments de bassin n°2	192
Tableau VI-3 : Caractéristiques géochimiques (micropolluants) des sédiments de bassin n°2	193

Annexe A

CLASSIFICATION D'UN SOL SELON LA
CLASSIFICATION DU GTR

Le guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme (GTR, 1992) a proposé une classification établie précisément en fonction des problèmes posés dans la construction des remblais et des couches de forme. Tout sol ou matériau rocheux peut ainsi être rangé selon ce système dès lors que les valeurs des paramètres sont connues et que les essais permettant de les obtenir sont reconnus significatifs. D'une manière générale, comme l'indique le tableau 1, la classification du GTR distingue quatre classes de sols notées A, B, C et D, chacune d'elle correspondant à un type de matériau. Nous analysons en détails la classe A qui concerne les sols fins, les sédiments de dragage s'en rapprochant le plus.

Tableau 1: Classification des sols suivant leur nature (GTR, 1992)

Classe du matériau	A	B	C	D
Type de matériau	sols fins	sols sableux et graveleux avec fines	sols comportant des fines et des gros éléments	sols insensibles à l'eau

Le tableau 2 présente les principaux critères de granularité retenus. Ils permettent d'établir un premier niveau de classification entre les matériaux. Les sols dont la dimension maximale (Dmax) est inférieure à 50 mm et dont la teneur en fines (tamisât à 80 µm) est supérieure à 35%, appartiennent à la catégorie des sols fins (classe A). On considère que ces matériaux ont un comportement régi par leur fraction fine.

Tableau 2 : Paramètres de granularité d'un sol d'après le GTR (1992)

Paramètres	Rôle	Seuil(s) retenu(s)
Dmax	dimension maximale des plus gros éléments contenus dans le sol. Cette caractéristique régit, en particulier, les conditions de malaxage éventuel avec un liant	- 50 mm : permet de distinguer les sols fins, sableux et graveleux des sols blocailleux
Tamisât à 80 µm	permet d'estimer la teneur en fines du matériau	- 35% : au dessus de ce seuil, on considère que le comportement du sol est régi par la fraction fine - 12% : permet de distinguer les sols sableux et graveleux pauvres ou riches en fines
Tamisât à 2 mm	permet d'établir une distinction entre les sols à tendance sableuse et ceux à tendance graveleuse	- 70% : au delà, le sol est à tendance sableuse et en deçà, à tendance graveleuse

Selon le GTR (Figure 1), la classification des sols fins est basée sur la teneur en argile et la granulométrie du sol :

- 1) VBs : capacité d'absorption par le bleu méthylène
- 2) IP : indice de plasticité par la méthode des limites d'Atterberg et
- 3) Passant à 80 µm et à 2 mm : Pourcentage de particules fines passant aux tamis de 80 µm et à 2 mm.

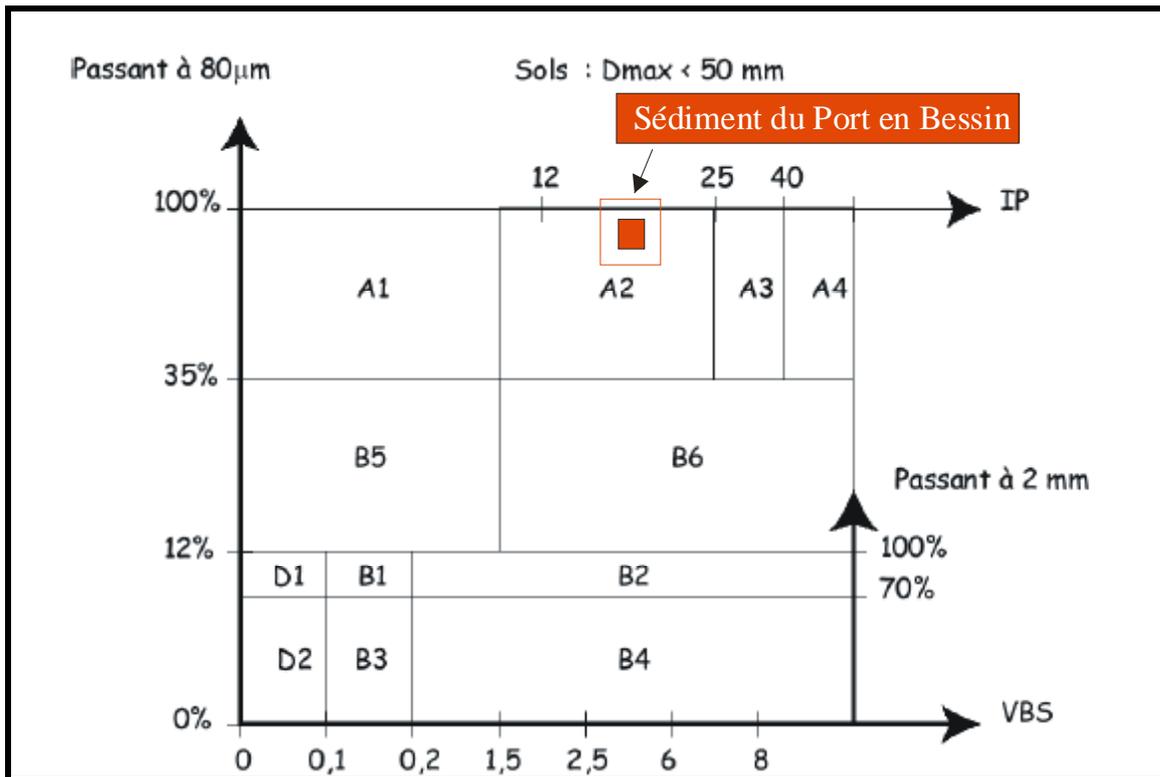


Figure1 : Classification des sols fins (GTR, 1992)

Annexe B

ANALYSE DU DECHET (XP X 31211)

	Vase non traitée	SAB5 CIM2 Chx5	SAB5 CIM2 Chx3 SF1	SAB5 CIM2 Chx3
N°LDFD 14	E2008-7250	E2008-7305	E2008-7304	E2008-7303
Date de réception	15/07/2008	15/07/2008	15/07/2008	15/07/2008
Poids brut de l'éprouvette (g)	128.8	127.4	117.6	125.7
Teneur en eau (%) (Labo M2C)	10.95	9.2	6.5	6.2
Poids sec de l'éprouvette (g)	114.7	115.7	109.9	117.9
Analyses chimiques				
Résultats en mg/kg de MS	Vase non traitée	SAB5 CIM2 Chx5	SAB5 CIM2 Chx3 SF1	SAB5 CIM2 Chx3
Fraction soluble	13562	17061	18323	16798
DCO	607	656	755	654
Sulfates en SO4	947	779	817	745
Chlorures en Cl	7439	11488	9906	10672
Nitrates en NO3	< 25	< 25	< 25	<25
Carbone organique total (COT)	151	158	192	182
Micropolluants				
HPA (µg/Kg de MS)	Vase non traitée	SAB5 CIM2 Chx5	SAB5 CIM2 Chx3 SF1	SAB5 CIM2 Chx3
Naphtalène	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Acénaphthylène	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Acénaphthène	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Fluorène	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Phénanthrène	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Anthracène	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Fluoranthène	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Pyrène	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Benzo (a) Anthracène	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Chrysène	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Benzo(b) fluoranthène	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Benzo (k) fluoranthène	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Benzo (a) pyrène	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Dibenzo (ah) anthracène	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Benzo (ghi) pérylène	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Indéno (1,2,3-cd) pyrène	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Méthyl (2) fluoranthène	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Méthyl (2) naphtalène	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
PCB ((µg/Kg de MS)				
PCB 28	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
PCB 35	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
PCB 52	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
PCB 54	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
PCB 101	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
PCB 118	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
PCB 153	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
PCB 138	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
PCB 180	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02

Lixiviation à PH Variable	Vase non traitée	SAB5 CIM2 Chx5	SAB5 CIM2 Chx3 SF1	SAB5 CIM2 Chx3
N°LDFD 14	E2008-9015-1-1	E2008-9015-1-5	E2008-9015-1-3	E2008-9015-1-2
Date de réception	2/9/08	2/9/08	2/9/08	2/9/08
pH (Labo MC2)	4,43 ou 3,81	6,7 - 7,92	4.01	3,91-3,97
Sulfates (mg/L)	115	58.5	56.8	77.1
Chlorures (mg/L)	1219	758	619	750
Zinc (mg/L)	0.12	0.02	0.025	0.025
Chrome total (mg/L)	0.005	0.005	0.005	0.005
Cuivre (mg/L)	0.12	0.03	0.03	0.065
Nickel (mg/L)	0.01	0.01	0.01	0.01
Cadmium (mg/L)	0.001	0.001	0.001	0.001
Plomb (mg/L)	0.013	0.005	0.005	0.005
Etain (mg/L)	0.02	0.02	0.02	0.02
Résultats exprimés en mg/L de lixiviat - Les valeurs en mg/kg MS doivent être calculées à partir des masses des éprouvettes (Voir Laboratoire MC2)				
Lixiviation à PH Variable	Vase non traitée	SAB5 CIM2 Chx5	SAB5 CIM2 Chx3 SF1	SAB5 CIM2 Chx3
Masse de l'échantillon MS (g)	103.53	107.91	112.96	110.26
Volume d'eau (ml)	1377	1401	1629	1577
Sulfates (mg/Kg de MS)	1529.56	759.51	819.11	1102.73
Chlorures (mg/Kg de MS)	16213.30	9841.15	8926.62	10726.92
Zinc (mg/Kg de MS)	1.60	0.26	0.36	0.36
Chrome total (mg/Kg de MS)	0.07	0.06	0.07	0.07
Cuivre (mg/Kg de MS)	1.60	0.39	0.43	0.93
Nickel (mg/Kg de MS)	0.13	0.13	0.14	0.14
Cadmium (mg/Kg de MS)	0.01	0.01	0.01	0.01
Plomb (mg/Kg de MS)	0.17	0.06	0.07	0.07
Etain (mg/Kg de MS)	0.27	0.26	0.29	0.29

	SAB15 CIM 2 Chx3 SF1	SAB5 CIM2 Chx3 CV4	SAB5 CIM5 Chx3 SF1	SAB5 CIM2 Chx3 SF2,5
N°LDFD 14	E2008-7478	E2008-7479	E2008-7480	E2008-7481
Date de réception	21/07/2008	21/07/2008	21/07/2008	21/07/2008
Poids brut de l'éprouvette (g)	125.5	107.9	116.0	121.2
Teneur en eau (%) (Labo M2C)	5.93	7.72	7.71	7.07
Poids sec de l'éprouvette (g)	118.07	99.58	107.09	112.66
Analyses chimiques				
Résultats en mg/kg de MS	SAB15 CIM 2 Chx3 SF1	SAB5 CIM2 Chx3 CV4	SAB5 CIM5 Chx3 SF1	SAB5 CIM2 Chx3 SF2,5
Fraction soluble	16393	20453	18840	19537
DCO	724	1008	1360	896
Sulfates en SO4	805	2005	1441	1057
Chlorures en Cl	7814	8846	8423	9577
Nitrates en NO3	28.7	33.2	30.2	33.2
Carbone organique total (COT)	129	275	250	138
Micropolluants				
HPA (µg/Kg de MS)	SAB15 CIM 2 Chx3 SF1	SAB5 CIM2 Chx3 CV4	SAB5 CIM5 Chx3 SF1	SAB5 CIM2 Chx3 SF2,5
Naphtalène	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Acénaphthylène	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Acénaphtène	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Fluorène	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Phénanthrène	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Anthracène	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Fluoranthène	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Pyrène	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Benzo (a) Anthracène	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Chrysène	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Benzo(b) fluoranthène	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Benzo (k) fluoranthène	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Benzo (a) pyrène	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Dibenzo (ah) anthracène	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Benzo (ghi) pérylène	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Indéno (1,2,3-cd) pyrène	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Méthyl (2) fluoranthène	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Méthyl (2) naphtalène	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
PCB ((µg/Kg de MS)				
PCB 28	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
PCB 35	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
PCB 52	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
PCB 54	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
PCB 101	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
PCB 118	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
PCB 153	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
PCB 138	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
PCB 180	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02

Lixiviation à PH Variable	SAB15 CIM 2 Chx3 SF1	SAB5 CIM2 Chx3 CV4	SAB5 CIM5 Chx3 SF1	SAB5 CIM2 Chx3 SF2,5
N°LDFD 14	E2008-9015-2-1	E2008-10953-1-2	E2008-10953-2-1	E2008-9015-1-4
Date de réception	2/9/08	20/10/2008	20/10/2008	2/9/08
pH (Labo MC2)	7.4	4.57	6.13	7.48
Sulfates (mg/L)	80.1	104	84.8	79.8
Chlorures (mg/L)	789	706	662	702
Zinc (mg/L)	0.020	0.020	0.020	0.02
Chrome total (mg/L)	0.005	0.005	0.008	0.005
Cuivre (mg/L)	0.045	0.035	0.03	0.03
Nickel (mg/L)	0.01	0.01	0.01	0.01
Cadmium (mg/L)	0.001	0.0005	0.0005	0.001
Plomb (mg/L)	0.005	0.005	0.005	0.005
Etain (mg/L)	0.02	0.030	0.045	0.02
Résultats exprimés en mg/L de lixiviat - Les valeurs en mg/kg MS doivent être calculées à partir des masses des éprouvettes (Voir Laboratoire MC2)				
Lixiviation à PH Variable	SAB15 CIM 2 Chx3 SF1	SAB5 CIM2 Chx3 CV4	SAB5 CIM5 Chx3 SF1	SAB5 CIM2 Chx3 SF2,5
Masse de l'échantillon MS (g)	111.71	115.68	112.71	111.47
Volume d'eau (ml)	1601	1751	1601	1701
Sulfates (mg/Kg de MS)	1148.0	1574.2	1204.5	1217.7
Chlorures (mg/Kg de MS)	11307.8	10686.4	9403.4	10712.3
Zinc (mg/Kg de MS)	0.29	0.30	0.28	0.31
Chrome total (mg/Kg de MS)	0.07	0.08	0.11	0.08
Cuivre (mg/Kg de MS)	0.64	0.53	0.43	0.46
Nickel (mg/Kg de MS)	0.14	0.15	0.14	0.15
Cadmium (mg/Kg de MS)	0.01	0.01	0.01	0.02
Plomb (mg/Kg de MS)	0.07	0.08	0.07	0.08
Etain (mg/Kg de MS)	0.29	0.45	0.64	0.31

	SAB10 CIM5 Chx3 SF1	SAB15 CIM5 Chx3 SF1	SAB15 CIM5 Chx3
N°LDFD 14	E2008-7482	E2008-7483	E2008-7484
Date de réception	21/07/2008	21/07/2008	21/07/2008
Poids brut de l'éprouvette (g)	124.5	128.5	133.0
Teneur en eau (%) (Labo M2C)	6.33	6.8	12.07
Poids sec de l'éprouvette (g)	116.61	119.76	116.98
Analyses chimiques			
Résultats en mg/kg de MS	SAB10 CIM5 Chx3 SF1	SAB15 CIM5 Chx3 SF1	SAB15 CIM5 Chx3
Fraction soluble	résultat confirmer	14837	13992
DCO	848	885	852
Sulfates en SO4	1040	1001	884
Chlorures en Cl	6970	6571	6692
Nitrates en NO3	26.3	<25,2	<25,4
Carbone organique total (COT)	169	169	142
Micropolluants			
HPA (µg/Kg de MS)	SAB10 CIM5 Chx3 SF1	SAB15 CIM5 Chx3 SF1	SAB15 CIM5 Chx3
Naphtalène	<0,02	<0,02	<0,02
Acénaphtylène	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Acénaphène	<0,02	<0,02	<0,02
Fluorène	<0,02	<0,02	<0,02
Phénanthrène	<0,02	<0,02	<0,02
Anthracène	<0,02	<0,02	<0,02
Fluoranthène	<0,02	<0,02	<0,02
Pyrène	<0,02	<0,02	<0,02
Benzo (a) Anthracène	<0,02	<0,02	<0,02
Chrysène	<0,02	<0,02	<0,02
Benzo(b) fluoranthène	<0,02	<0,02	<0,02
Benzo (k) fluoranthène	<0,02	<0,02	<0,02
Benzo (a) pyrène	<0,02	<0,02	<0,02
Dibenzo (ah) anthracène	<0,02	<0,02	<0,02
Benzo (ghi) pérylène	<0,02	<0,02	<0,02
Indéno (1,2,3-cd) pyrène	<0,02	<0,02	<0,02
Méthyl (2) fluoranthène	<0,02	<0,02	<0,02
Méthyl (2) naphtalène	<0,02	<0,02	<0,02
PCB ((µg/Kg de MS)			
PCB 28	<0,02	<0,02	<0,02
PCB 35	<0,02	<0,02	<0,02
PCB 52	<0,02	<0,02	<0,02
PCB 54	<0,02	<0,02	<0,02
PCB 101	<0,02	<0,02	<0,02
PCB 118	<0,02	<0,02	<0,02
PCB 153	<0,02	<0,02	<0,02
PCB 138	<0,02	<0,02	<0,02
PCB 180	<0,02	<0,02	<0,02

Lixiviation à PH Variable	SAB10 CIM5 Chx3 SF1	SAB15 CIM5 Chx3 SF1	SAB15 CIM5 Chx3
N°LDFD 14	E2008-13221-1-1	E2008-10953-1-3	E2008-10953-2-2
Date de réception	17/12/2009	20/10/2008	20/10/2008
pH (Labo MC2)	4.04	6.25	4.61
Sulfates (mg/L)	148	72.7	64.2
Chlorures (mg/L)	705	730	728
Zinc (mg/L)	0.06	0.030	0.02
Chrome total (mg/L)	0.005	0.005	0.012
Cuivre (mg/L)	0.03	0.035	0.035
Nickel (mg/L)	0.01	0.01	0.015
Cadmium (mg/L)	0.001	0.0005	0.0005
Plomb (mg/L)	0.005	0.005	0.005
Etain (mg/L)	0.06	0.02	0.02
Résultats exprimés en mg/L de lixiviat - Les valeurs en mg/kg MS doivent être calculées à partir des masses des éprouvettes (Voir Laboratoire MC2)			
Lixiviation à PH Variable	SAB10 CIM5 Chx3 SF1	SAB15 CIM5 Chx3 SF1	SAB15 CIM5 Chx3
Masse de l'échantillon MS (g)	111.4	107.98	109.1
Volume d'eau (ml)	1775	1451	1551
Sulfates (mg/Kg de MS)	2358.2	976.9	912.7
Chlorures (mg/Kg de MS)	11233.2	9809.5	10349.5
Zinc (mg/Kg de MS)	0.96	0.40	0.28
Chrome total (mg/Kg de MS)	0.08	0.07	0.17
Cuivre (mg/Kg de MS)	0.48	0.47	0.50
Nickel (mg/Kg de MS)	0.16	0.13	0.21
Cadmium (mg/Kg de MS)	0.02	0.01	0.01
Plomb (mg/Kg de MS)	0.08	0.07	0.07
Etain (mg/Kg de MS)	0.96	0.27	0.28

	SAB0 CIM5 Chx3	SAB0 CIM5 Chx3 FS1	SAB5 CIM5 Chx3	SAB10 CIM5 Chx3
N° LDFD 14	E2008-13150-1	E2008-13152-1	E2008-13151-1	E2008-13154-1
Date de réception	17/12/2008	17/12/2008	17/12/2008	17/12/2008
Poids brut de l'éprouvette (g)	114.8	116.2	111.8	114.4
Teneur en eau (%) (Labo M2C)	5.37	4.52	5.86	5.29
Poids sec de l'éprouvette (g)	108.6	110.9	105.2	108.4
Analyses chimiques				
Résultats en mg/kg de MS	SAB0 CIM5 Chx3	SAB0 CIM5 Chx3 FS1	SAB5 CIM5 Chx3	SAB10 CIM5 Chx3
Fraction soluble	21000	18400	22900	21600
DCO	1860	1653	1667	2154
Sulfates en SO4	1890	1494	1577	1804
Chlorures en Cl	9661	8686	11167	10050
Nitrates en NO3	<25	<25	<25,1	<25
Carbone organique total (COT)	651	563	495	670
Micropolluants				
HPA (µg/Kg de MS)	SAB0 CIM5 Chx3	SAB0 CIM5 Chx3 FS1	SAB5 CIM5 Chx3	SAB10 CIM5 Chx3
Naphtalène	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Acénaphthylène	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Acénaphthène	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Fluorène	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Phénanthrène	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Anthracène	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Fluoranthène	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Pyrène	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Benzo (a) Anthracène	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Chrysène	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Benzo(b) fluoranthène	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Benzo (k) fluoranthène	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Benzo (a) pyrène	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Dibenzo (ah) anthracène	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Benzo (ghi) pérylène	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Indéno (1,2,3-cd) pyrène	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Méthyl (2) fluoranthène	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Méthyl (2) naphtalène	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
PCB ((µg/Kg de MS)				
PCB 28	<0,10	<0,10	<0,02	<0,02
PCB 35	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
PCB 52	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
PCB 54	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
PCB 101	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
PCB 118	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
PCB 153	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
PCB 138	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
PCB 180	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02

Lixiviation à PH Variable	SAB0 CIM5 Chx3	SAB0 CIM5 Chx3 FS1	SAB5 CIM5 Chx3	SAB10 CIM5 Chx3
N°LDFD 14	E2008-13135-1-1		E2008-13135-1-2	E2008-13135-1-3
Date de réception	17/12/08		17/12/2008	17/12/2008
pH (Labo MC2)	4.76		4.7	4.65
Sulfates (mg/L)	213		153	141
Chlorures (mg/L)	834		823	664
Zinc (mg/L)	0.050		0.025	0.025
Chrome total (mg/L)	0.005		0.006	0.005
Cuivre (mg/L)	0.035		0.03	0.03
Nickel (mg/L)	0.015		0.01	0.01
Cadmium (mg/L)	0.0020		0.0013	0.001
Plomb (mg/L)	0.005		0.005	0.005
Etain (mg/L)	0.065		0.050	0.055
Lixiviation à PH Variable	SAB0 CIM5 Chx3	SAB0 CIM5 Chx3 FS1	SAB5 CIM5 Chx3	SAB10 CIM5 Chx3
Masse de l'échantillon MS (g)	116.44		112.38	113.91
Volume d'eau (ml)	1804		1773	1783
Sulfates (mg/Kg de MS)	3300.0		2413.9	2207.0
Chlorures (mg/Kg de MS)	12921.1		12984.3	10393.4
Zinc (mg/Kg de MS)	0.77		0.39	0.39
Chrome total (mg/Kg de MS)	0.08		0.09	0.08
Cuivre (mg/Kg de MS)	0.54		0.47	0.47
Nickel (mg/Kg de MS)	0.23		0.16	0.16
Cadmium (mg/Kg de MS)	0.03		0.02	0.02
Plomb (mg/Kg de MS)	0.08		0.08	0.08
Etain (mg/Kg de MS)	1.01		0.79	0.86

	SAB10CIM2Chx3	SAB15CIM2Chx3
N° LDFD 14	E2008-13153-1	E2008-13155-1
Date de réception	17/12/2008	17/12/2008
Poids brut de l'éprouvette (g)	113.0	110.2
Teneur en eau (%) (Labo M2C)	6.51	6.14
Poids sec de l'éprouvette (g)	105.7	103.5
Analyses chimiques		
Résultats en mg/kg de MS	SAB10CIM2Chx3	SAB15CIM2Chx3
Fraction soluble	21000	22000
DCO	2341	2004
Sulfates en SO4	1731	1863
Chlorures en Cl	9706	10739
Nitrates en NO3	<25	<25
Carbone organique total (COT)	707	620
Micropolluants		
HPA (µg/Kg de MS)	SAB10CIM2Chx3	SAB15CIM2Chx3
Naphtalène	<0,02	<0,02
Acénaphtylène	< 0,5	< 0,5
Acénaphène	<0,02	<0,02
Fluorène	<0,02	<0,02
Phénanthrène	<0,02	<0,02
Anthracène	<0,02	<0,02
Fluoranthène	<0,02	<0,02
Pyrène	<0,02	<0,02
Benzo (a) Anthracène	<0,02	<0,02
Chrysène	<0,02	<0,02
Benzo(b) fluoranthène	<0,02	<0,02
Benzo (k) fluoranthène	<0,02	<0,02
Benzo (a) pyrène	<0,02	<0,02
Dibenzo (ah) anthracène	<0,02	<0,02
Benzo (ghi) pérylène	<0,02	<0,02
Indéno (1,2,3-cd) pyrène	<0,02	<0,02
Méthyl (2) fluoranthène	<0,02	<0,02
Méthyl (2) naphtalène	<0,02	<0,02
PCB ((µg/Kg de MS)		
PCB 28	<0,02	<0,02
PCB 35	<0,02	<0,02
PCB 52	<0,02	<0,02
PCB 54	<0,02	<0,02
PCB 101	<0,02	<0,02
PCB 118	<0,02	<0,02
PCB 153	<0,02	<0,02
PCB 138	<0,02	<0,02
PCB 180	<0,02	<0,02

Lixiviation à PH Variable		SAB15CIM2Chx3
N° LDFD 14		E2008-13221-1-3
Date de réception		17/12/2008
pH (Labo MC2)		4.01
Sulfates (mg/L)		118
Chlorures (mg/L)		528
Zinc (mg/L)		0.085
Chrome total (mg/L)		0.005
Cuivre (mg/L)		0.03
Nickel (mg/L)		0.01
Cadmium (mg/L)		0.001
Plomb (mg/L)		0.005
Etain (mg/L)		0.04
Lixiviation à PH Variable		SAB15CIM2Chx3
Masse de l'échantillon MS (g)		112.91
Volume d'eau (ml)		1773
Sulfates (mg/Kg de MS)		1852.9
Chlorures (mg/Kg de MS)		8291.1
Zinc (mg/Kg de MS)		1.33
Chrome total (mg/Kg de MS)		0.08
Cuivre (mg/Kg de MS)		0.47
Nickel (mg/Kg de MS)		0.16
Cadmium (mg/Kg de MS)		0.02
Plomb (mg/Kg de MS)		0.08
Etain (mg/Kg de MS)		0.63

Lixiviation à PH Variable	SAB5 CIM3 CHX5 SF1	CIM3 CHX5 SF1	SAB10 CIM2 CHX3 FS1
N° LDFD 14	E2008-10953-1-1	E2008-10953-2-3	E2008-13221-1-2
Date de réception	20/10/2008	20/10/2008	18/12/2008
pH (Labo MC2)	4.45	6.18	3.9
Sulfates (mg/L)	42.3	53	148
Chlorures (mg/L)	554	572	705
Zinc (mg/L)	0.02	0.02	0.06
Chrome total (mg/L)	0.005	0.005	0.005
Cuivre (mg/L)	0.03	0.040	0.03
Nickel (mg/L)	0.01	0.01	0.01
Cadmium (mg/L)	0.0005	0.0005	0.001
Plomb (mg/L)	0.005	0.005	0.005
Etain (mg/L)	0.035	0.02	0.060
Lixiviation à PH Variable	SAB5 CIM3 CHX5 SF1	CIM3 CHX5 SF1	SAB10 CIM2 CHX3 FS1
Masse de l'échantillon MS (g)	113.46	114.05	108.16

Volume d'eau (ml)	1751	1761	1703
Sulfates (mg/Kg de MS)	652.8	818.4	2330.3
Chlorures (mg/Kg de MS)	8549.7	8832.0	11100.4
Zinc (mg/Kg de MS)	0.31	0.31	0.94
Chrome total (mg/Kg de MS)	0.08	0.08	0.08
Cuivre (mg/Kg de MS)	0.46	0.62	0.47
Nickel (mg/Kg de MS)	0.15	0.15	0.16
Cadmium (mg/Kg de MS)	0.01	0.01	0.02
Plomb (mg/Kg de MS)	0.08	0.08	0.08
Etain (mg/Kg de MS)	0.54	0.31	0.94

Résumé : Des travaux de recherche effectués sur le traitement des sédiments valorisés ont été entrepris depuis une dizaine d'années et ont fait l'objet de plusieurs publications comme relaté dans l'étude bibliographique présentée dans ce rapport. L'essentiel a porté sur la caractérisation physique, puis mécanique en fonction des dosages en ciments et additifs. Ainsi, les travaux de recherche entrepris dans cette thèse entre dans le cadre de la poursuite des recherches dans ce domaine. Elle définit les modalités d'étude, ayant pour objet la valorisation des sédiments de dragage du Port En Bessin en vue d'obtention d'un matériau final utilisable en techniques routières. Ainsi la première phase de l'étude consiste en une caractérisation des boues aussi bien dans leur composition que dans leur comportement aux contraintes mécaniques. Les caractéristiques mécaniques sont aussi étudiées dans la partie formulation. Une planche expérimentale en techniques routières a permis l'étude en conditions réelles d'utilisation du matériau. Des analyses sont réalisées pour étudier le relargage de certains polluants (métaux lourds, HAP...) et comparent les résultats avec les prévisions réalisées à partir des essais de lixiviation. D'autres paramètres concernant le comportement géotechnique du matériau ont été vérifiés et comparés aux prévisions attendues pour voir si l'ensemble des résultats obtenus ne montre pas de dérive par rapport aux prévisions. Le matériau peut être ainsi mis en œuvre dans une troisième phase pour la réalisation finalement d'une plate forme routière sur site réel.

Mots clés : Sédiments marins, vase de dragage, la chaux, fumée de silice, cendres volantes, lixiviation, gel-dégel, mouillage-séchage, planche expérimentale, Dynaplaque 2.

Abstract : The reuse of the dredged sediments in road construction has been studied and published in the previous researches which are presented in this rapport. The main objective is to enhance the physical and mechanical characteristics of the mix by incorporating binders (cement and/or pozzolanic binder). The preliminary study performed on fine dredged sediments revealed the identification of the mechanical characteristics measured on the mixes is compatible with their use as a base course material. The result shows that the treatment by hydraulics binders could satisfy the needed mechanical characteristics. However the proportion of hydraulics binders needed to meet prescribed specification is important so the reuse of the dredged sediments of Port en Bessin in road construction as an alternative material could be achieved. The construction of the experimental road has allowed to evaluate the compatibility of this designed material with the current practice with standard materials. To evaluate the environmental impacts of the used material, leaching tests are performed. The leaching tests were performed to verify the predicted release of pollutants based on total dissolution. And for the final part, the fine dredged sediments were used for the construction of the of the platform road in situ.

Keywords: marine dredged sediments, lime, silica fume, leaching test, freeze-thaw test, wet-dry test, experimental road, Dynaplaque 2,

Discipline : Génie Civil

Adresse : Laboratoire de Morphodynamique continentale et côtière
M2C GRGC UMR-CNRS 6143, 24 rue des Tilleuls, 14000 Caen, France