Effet de la fumée de silice sur le comportement mécanique et géotechnique d'un sédiment stabilisé à base de ciment et additifs

S. Mezazigh, Javad Behmanesh

▶ **To cite this version:**

S. Mezazigh, Javad Behmanesh. Effet de la fumée de silice sur le comportement mécanique et géotechnique d'un sédiment stabilisé à base de ciment et additifs. Environnement, Ingénierie & Développement, 2009, N°53 - Janvier-Février-Mars 2009, pp.24-29. 10.4267/dechets-sciences-techniques.1297 . hal-01735705

HAL Id: hal-01735705
https://hal.science/hal-01735705

Submitted on 9 Apr 2021

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.

Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Effet de la fumée de silice sur le comportement mécanique et géotechnique d'un sédiment stabilisé à base de ciment et additifs

Salim Mezazigh* et Javad Behmanesh**

Université de Caen, Laboratoire M2C, UMR 6143 CNRS,
24, rue des Tilleuls, 14000 Caen, France

Pour toute correspondance : salim.mezazigh@unicaen.fr et javad.behmanesh@unicaen.fr

Résumé

L'accumulation des sédiments dans les installations portuaires est un phénomène inéluctable. Le dragage revêt donc une importance primordiale pour le maintien de la navigation. Mais le stockage ou le rejet en mer de cette vase pose problème, surtout dans le cas de contamination par des polluants.
Cet article présente l'étude de la valorisation des sédiments de dragage du port autonome du Havre traités par un mélange de ciment, chaux, cendre volante et fumée de silice et additifs. Différents pourcentages de liants hydrauliques ont été utilisés. L'étude du comportement à court terme des sédiments stabilisés à été réalisée à l'aide d'essais de compression axiale. Les résultats de cette étude montrent une meilleure performance pour les échantillons confectionnés avec du ciment et de la fumée silice. L'analyse des résultats mécaniques et physico-chimiques des sédiments ainsi stabilisés démontre la possibilité de leur utilisation dans les constructions routières.

Introduction

Les sédiments proviennent du dépôt des particules en suspension dans l'eau dérivant elles-mêmes de l'érosion des roches et des sols, de matériaux détritiques organiques et de la floculation d'éléments colloïdaux. Ces particules parviennent au milieu aquatique par les cours d'eau et par voie atmosphérique [1]. Les sédiments sont essentiellement caractérisés par leur granulométrie et leur composition.

Le transit littoral et fluvial des matériaux en suspension provoque une sédimentation dans les ports. Le dragage revêt donc une importance primordiale pour le maintien de la navigation dans les ports et les chenaux d'accès [2]. Le bilan des dragages fait apparaître une quantité considérable de sédiments qu'il est nécessaire d'extraire pour éviter tous les problèmes cités précédemment. Dans un souci accru d'une gestion écologique des ressources naturelles fondée sur le développement durable, la solution recherchée pour le devenir de ces matériaux est la valorisation plutôt que l'immersion (rejet en mer). Ceci est d'autant plus vrai pour des sédiments pollués. En effet, lorsque les ports se trouvent à proximité de zones industrielles, les sédiments sont souvent contaminés par des métaux lourds ou des composés organiques.

La facilité de mise en œuvre du procédé de solidification/stabilisation par liant hydraulique et son faible coût justifient que cette méthode soit utilisée pour le traitement de sédiments dragués. Des chercheurs ainsi que des industriels mettent en avant le besoin d'étendre l'utilisation de la technique de solidification/stabilisation aux sédiments inorganiques contenant un niveau plus ou moins important de polluants organiques.
La valorisation des sédiments par la technique de solidification/stabilisation est un moyen qui permet d'éviter les solutions traditionnelles comme le stockage des vases au niveau des ports ou l'immersion en mer. La solidification/stabilisation à base de ciment et additifs est un processus dans lequel les agents inorganiques réagissent avec les grains des sédiments pour former des solides chimiquement stables et capables de développer une résistance mécanique. Cette technique nécessite une étude rigoureuse des caractéristiques intrinsèques des matériaux, comme la perméabilité, la porosité, etc.

De nos jours, les recherches effectuées sur les sédiments utilisant la technique de solidification et stabilisation montrent leur efficacité dans la valorisation des sédiments. En général, la stabilisation des sédiments est obtenue par un mélange d'une certaine proportion de ciment, de cendres volantes et de chaux. 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 grand rôle dans cette opération de stabilisation.

Les paramètres guidant le choix des ajouts sont leur pouvoir à stabiliser, leur disponibilité et leur coût. L'efficacité d'un ajout est forcément conditionnée par sa composition, tandis que le coût est essentiellement lié à la disponibilité (transport et manutention) et à la valeur marchande de l'ajout.

La fumée de silice, composée de grains fins, est une substance minérale composée essentiellement de silice. Elle peut remplir les espaces vides entre les grains de ciment des matériaux solidifiés. De plus, la fumée de silice possède une propriété pouzzolanique, c'est-à-dire qu'elle peut réagir avec l'hydroxyde de calcium dégagé par l'hydratation du ciment. Par conséquent, les silicates de calcium hydraté créent un lien entre les grains du sédiment. Grâce à la structure fine de la fumée de silice (10 à 20 fois plus fine

que les cendres volantes), la structure cristalline obtenue par la réaction est très fine et peut remplir ainsi les vides. La fumée de silice peut améliorer aussi les propriétés mécaniques et physiques du sédiment traité comme la résistance à la compression, la résistance au gel-dégel, la résistance à la pénétration des ions chlore, la résistance aux attaques par les sulfates et la résistance à la réaction alcaligranulat.

La densité des sols traités avec de la fumée de silice et de la chaux est supérieure à celle des échantillons traités avec des cendres volantes et de la chaux. Ce phénomène est lié à la propriété pouzzolanique plus importante de la fumée de silice. D'autre part, la fumée de silice réduit les dégradations des échantillons exposés aux cycles gel/dégel [4] et [7].

L'ajout de la fumée de silice pour stabiliser des sols sulfatés traités au ciment et à la chaux empêche l'obtention des composants nuisibles comme l'ettringite [6].

Dans cette étude, nous montrons l'effet de la fumée de silice et des additifs sur la stabilisation des sédiments dragués sur leur comportement à long terme. Ces travaux vont également mettre en évidence d'une part une réduction de la perméabilité et de la porosité des échantillons traités avec de la fumée de silice, et d'autre part une augmentation de la réaction pouzzolanique dans les sédiments solidifiés/stabilisés.

Une valorisation d'un sédiment par ajout de ciment et additifs a été réalisée. Dans cette valorisation, différentes formulations en liants ont été effectuées. Une attention particulière a été portée pour ne pas dépasser un pourcentage de 9 % en liants au maximum. Ces liants sont principalement constitués de 2 à 4 % de ciment, de 2 % chaux, de 2 % cendre volante et de 1 % de fumée de silice.

L'objectif de cette étude consistait, à partir des sédiments fins dragués dans le port autonome du Havre, à élaborer un matériau routier susceptible d'être employé pour la réalisation de couches de forme ou de fondation. Au terme de ces travaux, l'utilisation de ces sédiments dragués en tant que matériau de substitution dans le domaine routier apparaît tout à fait envisageable.

2. Matériaux utilisés

2.1. Sédiments dragués

Les sédiments de la présente étude sont issus du dragage au port autonome du Havre. La granulométrie des sédiments a été déterminé à l'aide de la granulométrie au laser par voie humide. La figure 1 et le tableau 1 présentent la granulométrie et les propriétés physiques des sédiments étudiés.

Le tableau 1 et la figure 1 ci-dessus montrent la granularité moyenne des sédiments, le diamètre efficace (D_{10}), la dimension des granulats à 60 % de passant inférieurs à 10µm (D_{60}), le facteur d'uniformité de Hazen (CU = D_{60}/D_{10}) et le facteur de courbure (CC = $D_{30}^2/(D_{60}*D_{10})$) des sédiments du port autonome du Havre. Les résultats mettent en avant le caractère extrêmement fin du matériau.

Médiane (µm)	8
Teneur en fines (< 80 µm)	92 %
Les différentes fractions :	
Argile (< 2 µm)	20 %
Limon	70 %
Sable	10 %
D_{10}	0,6µm
D_{60}	10µm
D_{30}	3,5µm
C_u	16.67
C_c	2,04
ρ_s (gr/cm^3)	2,54
Teneur en eau naturelle (W %)	155,2
Limite de plasticité	34,2 %
Limite de liquidité	67,1 %
Indice de plasticité	32,9 %
Activité	2,06
Teneur en matière organique	1,31 %

Tableau 1 : Caractéristiques des sédiments dragués

Les fines (< 80 µm) sont largement prédominantes avec une teneur de l'ordre de 92 %. La médiane du sédiment moyen est évaluée à environ 8 µm. Si les sédiments sont composés majoritairement de limon, on trouve également une fraction argileuse (< 2 µm) estimée à 20 % et une fraction sableuse (> 63 µm) inférieure à 10 %. Cet apport sableux est, en outre, très fin puisque les éléments les plus grossiers sont compris entre à peu près 0.2 et 0.6 mm. Soulignons que la granulométrie des sédiments par la méthode de granulométrie laser montre une très bonne homogénéité. La teneur en matières organiques obtenue (1,31 %) permet de classer notre sédiment en sédiment non organique (C_{MO} < 3). Selon la classification du GTR, les sédiments étudiés se classent dans la catégorie A_2 qui désigne les limons [5].

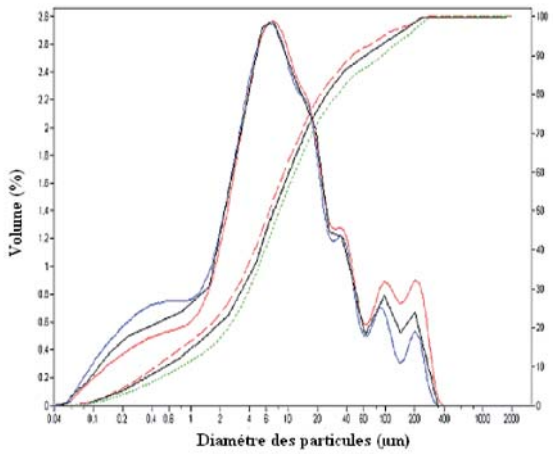


Figure 1 : Courbes granulométriques des sédiments dragués au port Autonome du Havre

2.2. Les liants

Dans cette étude, on a utilisé quatre types de liants hydrauliques : cendre volante, ciment, chaux et fumée de silice. La composition chimique de la cendre volante utilisée (Sodeline 2005) est donnée dans le tableau 2 :
La composition chimique et les caractéristiques physiques du ciment Calcia utilisé sont résumées dans le tableau 3. De même, les caractéristiques de la chaux utilisée sont présentées dans le tableau 4.
La fumée de silice utilisée dans cette étude a été fournie par la Compagnie de Silice Fume Association (société Danoise). Ses propriétés physiques sont résumées dans les tableaux 5 et 6.

La composition chimique de la fumée de silice utilisée est donnée dans le tableau 6.
Les tableaux 5 et 6 montrent que la fumée de silice utilisée est majoritairement constituée de silice (SiO_2 > 85 %) essentiellement sous forme de particules fines. Ce paramètre est très importants pour la suite dans la réaction pouzzolanique et aussi la réduction de la porosité et la perméabilité comme est confirmé dans la partie résultats ci-après

SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	MgO	MnO_2	CaO_{total}	CaO_{libre}	Na_20	K_20	SO_3
47.36	7.09	21.63	3.32	0.62	8.52	0.90	0.46	4.35	4.02

Tableau 2 : Composition chimique de la Sodeline 2005 (%)

Dénomination des produits	C_3A	C_3S	C_2S	SO3	Résistance mécanique du mortier en Mpa (28 jours)	Finesse blaine (cm^2/g)	Chaleur d'hydratation à 41 h en J/g
CEM II/B-M(S-L) 32,5 R CE CP1 NF	6,6	68,1	9	2,5	49	3840	253

Tableau 3 : Composition chimique et caractéristiques physiques du ciment Calcia

pH	CEC (meq/100 g)	EC (ms/cm)	G_s
12,6	16,43	6,29	2,45

Tableau 4 : Propriétés chimiques et physiques de la chaux utilisée

Silice (SiO_2)	Taille des particules	Densité	Masse volumique absolue	Surface spécifique
> 85 %	< 1 µm	250 kg/m^3	2,2 g/cm^3	15 000 m^2/kg

Tableau 5 : Propriétés physiques de la fumée de silice

Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SiO_2	P.F.*
1-3	0,05-1	0,8-1,2	1-2	85-95	0,5-1

*P.F. : pertes au feu

Tableau 6 : Composition chimique de la fumée de silice (%)

Série	Ciment (%)	Cendres volantes (%)	Chaux (%)	Fumée de silice (%)
1	2	2	2	0
2	2	2	2	1
3	0	2	2	0
4	4	2	2	1
5	4	2	2	1

Tableau 7 : Pourcentages des mélanges de liants utilisés

3. Les mélanges étudiés et la préparation des échantillons

Le tableau 7 montre les pourcentages de liants utilisés. Les échantillons préparés sans ciment et sans fumée de silice servent de référence. Pour chaque série de mélange, trois éprouvettes ont été réalisées pour chaque période d'essai (7, 14, 28, 56 et 90 jours). Au total, 75 éprouvettes ont été réalisées.

Les sédiments sont disposés dans des bacs et subissent une pré-étape de séchage en étuve pendant 24 h. La température est fixée a 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. L'eau est ajoutée après jusqu'à la teneur optimale. Une fois la préparation des mélanges sédiments-liants effectuée, les échantillons sont confectionnés dans des moules 40*80 mm en trois couches par compactage statique (NF P 94-093) à la teneur optimale et à la densité maximale.

4. Résultats et interprétation

4.1. Effet des liants sur le compactage

Pour confectionner les éprouvettes d'essai, il est nécessaire de connaître la teneur en eau optimale des sédiments dragués. Cet essai est réalisé pour déterminer l'effet du liant stabilisateur sur la densité sèche maximale et la teneur en eau optimale.

Afin d'obtenir la densité sèche maximale et la teneur en eau optimale, une étude Proctor est nécessaire pour les sédiments utilisés dans le domaine routier. Le principe consiste à compacter le sédiment à différentes humidités selon un processus et une énergie conventionnelle. Pour chaque valeur de teneur en eau, on mesure la masse volumique sèche du sédiment et on établit la relation expérimentale entre cette masse et sa teneur en eau. A partir de cette dernière, il est possible de déterminer les caractéristiques Proctor (densité sèche maximale et teneur en eau optimale) du matériau étudié. Ces valeurs peuvent servir à caractériser la qualité du compactage réalisé sur le chantier.

L'effet des liants sur la teneur en eau optimale et la densité sèche dépendent de la nature des sédiments et des liants utilisés. La figure 2 montre les résultats obtenus.

On peut constater que l'ajout de liants dans les sédiments modifie les valeurs des densités sèches et la teneur en eau optimale. La figure 2 montre que l'augmentation des liants dans les sédiments entraîne un accroissement de la teneur en eau optimale et une diminution de la densité sèche

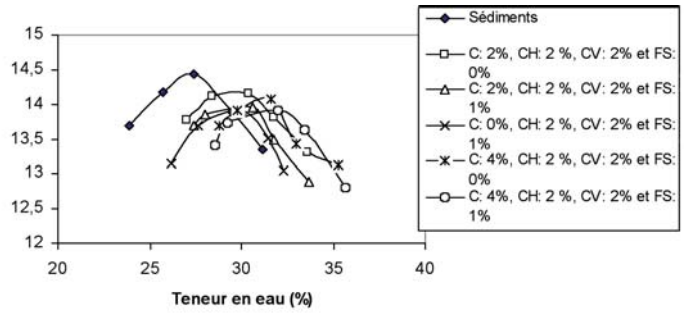


Figure 2 : Essais Proctor Normal des sédiments traités aux liants ou non

maximale. En effet, l'addition des liants dans des sédiments augmente la valeur de la teneur en eau optimale de l'ordre de 27,4 à 32 % et au contraire elle diminue la valeur de la masse volumique sèche maximale des sédiments de l'ordre de 14,4 à 13,9 kN/m^3 (tableau V-3). Les caractéristiques des sédiments compactés dépendent de la granulométrie et de la densité des grains des sédiments et des liants ajoutés.

On observe d'une part qu'une augmentation de la teneur en eau avec l'addition des liants dans les sédiments résulte de l'attractivité de l'eau par les liants, c'est-à-dire que l'ajout des liants dans les sédiments augmente la surface spécifique des particules du mélange par rapport aux sédiments de référence grâce à l'ajout des matières fines. En effet, les liants utilisés, en augmentant la taille des groupes de particules floculées et leur coefficient de frottement, pénalise l'arrangement des grains lors du compactage et aplatit ainsi les courbes Proctor des matériaux traités. D'autre part, la densité sèche maximale diminue. Le groupement des particules de sédiments avec les macropores peut expliquer la raison de cette diminution.

Le tableau 8 présente les valeurs des teneurs en eau optimales des séries des mélanges 1, 2, 3, 4 et 5. On constate d'après le tableau 2 que malgré un pourcentage élevé en ciment, la variation relative de la masse volumique maximale reste faible. Ce phénomène peut être attribué à la densité du ciment qui est relativement supérieure à celle des autres liants présents dans le sédiment.

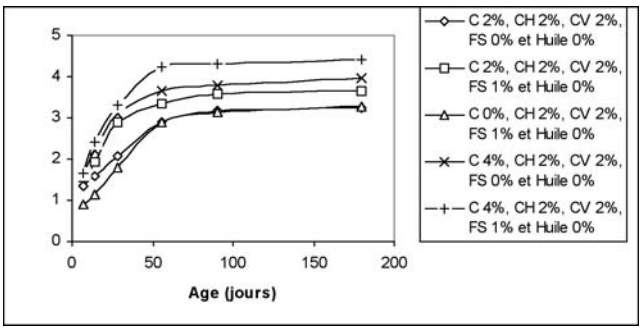
Série	Mélange	Teneur en eau (%)	Masse volumique sèche maximale (kN/m^3)
Sédiments	Non traité	27,4	14,4
1	C 2 %, CH 2 % et CV 2 %	30,4	14,2
2	C 2 %, CH 2 %, CV 2 % et FS 1 %	30,6	14,0
3	CH 2 %, CV 2 % et FS 1 %	30,0	13,9
4	C 4 %, CH 2 % et CV 2 %	31,6	14,1
5	C 4 %, CH 2 %, CV 2 % et FS 1 %	32,0	13,9

C : Ciment, CH : Chaux, CV : Cendres volantes et FS : Fumée de silice

Tableau 8 : Valeurs des teneurs en eau optimales des sédiments sains traités aux liants

4.2. Résistance à la compression simple

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 de la force permet de calculer la résistance uniaxiale en compression de l'éprouvette.



C : Ciment, CH : Chaux, CV : Cendres volantes
et FS : Fumée de silice

Figure 3 : Résistance en compression simple des sédiments traités

Nous pouvons constater d'abord que la résistance à la compression simple croît avec l'âge des échantillons. En effet, la résistance entre le début et la fin de solidification (7 et 180 jours) est d'environ 2,5 fois plus importante pour l'ensemble des séries. D'autre part, on peut constater que l'augmentation de la concentration en ciment conduit à une résistance à la compression plus élevée. Par exemple, la comparaison des résultats des séries 1 et 4 à 180 jours permet de noter un accroissement de la résistance en compression simple dû à une augmentation de la concentration en ciment d'environ 19 %. Ce phénomène est dû au remplissage des pores avec les produits d'hydratation du ciment et à une l'augmentation de la rigidité des échantillons par la formation des silicates de calcium hydratés. Nous pouvons également constater que pour les échantillons confectionnés avec de la fumée de silice, la résistance en compression simple est plus importante. Pour les séries 4 et 5 l'augmentation de la résistance en compression simple à 180 jours est de l'ordre de 13 %, sachant que les composés de silice favorisent la formation de silicate de calcium hydraté (C-S-H) et par conséquent une résistance de stabilisation des sédiments. L'hydratation du ciment et la chaux utilisée contribuent à la formation d'hydroxyde de calcium, ($Ca(OH)_2$). Dans les réactions pouzzolaniques, la silice peut réagir avec le calcium. Cette réaction peut créer les chaînes C-S-H qui sont responsables de l'augmentation de la résistance mécanique observée.

La fumée de silice améliore la structure physique des sédiments traités avec le remplissage des pores entraînant une augmentation de la densité d'échantillons. La résistance à jeune âge des échantillons avec de la

fumée de silice est plus importante que les autres. Par exemple, en comparant les séries 2-1 et 2-2 à 28 jours dont l'écart en fumée de silice est seulement de 1 %, la résistance en compression simple croît de 2,1 à 2,9 soit environ une augmentation de 38 %. Ceci est attribué à l'accélération de l'hydratation du ciment car les particules de fumée de silice absorbent les ions Ca^{2+} et provoquent une diminution de la concentration de calcium, ce qui engendre une augmentation du taux d'hydratation du ciment. L'augmentation du taux d'hydratation du ciment entraîne donc une augmentation de la concentration les chaînes C-S-H qui sont responsables de l'augmentation de la résistance à la compression.
On constate également que la présence simultanée de la fumée de silice et du ciment entraîne des résistances à la compression plus importantes que dans les autres cas. En effet, la présence d'ions de silice dans l'ambiance favorise la production des chaînes C-S-H liées aux réactions pouzzolaniques.

4.3. Effet des liants sur le module d'élasticité

Le tableau 9 montre les variations du module d'élasticité des différents échantillons.

Série	Mélange (%)	7 jours	14 jours	28 jours	56 jours	90 jours	180 jours
1	C2, CH2 et CV2	54,1	78,6	90,4	107,4	136,1	140,5
2	C2, CH2, CV2 et FS1	71,3	89,0	103,4	138,7	166,4	174,6
3	CH2, CV2 et FS1	50,8	59,1	85,8	103,5	118,9	124,5
4	C4, CH2 et CV2	71,1	98,8	114,4	167,9	173,2	180,5
5	C4, CH2, CV2 et FS1	80,7	97,9	144,0	195,0	199,8	204,9

Tableau 9 : Module d'élasticité des échantillons sains (MPa)

On constate d'abord que les modules d'élasticité des échantillons avec les différents mélanges croissent avec l'âge. Cet accroissement est de l'ordre de 150 % à la fin de la solidification (180 jours) pour les différents échantillons. D'autre part, on constate que dans le cas de la présence simultanée de la fumée de silice et du ciment, le module d'élasticité des échantillons est plus important et la rigidité des échantillons est améliorée. En effet, en fin de solidification, l'accroissement du module d'élasticité atteint environ 24 % dans le cas des échantillons avec 1 % de fumée de silice et 2 % de ciment (séries 1 et 2). Cet accroissement est de l'ordre de 14 % dans le cas des échantillons avec 1 % de fumée de silice et 4 % de ciment (séries 4 et 5). La comparaison des échantillons sans ciment mais en présence de 1 % de fumée de silice (série 3) avec les compositions à 2 % et à 4 % de ciment (séries 2 et 5) montre qu'en fin de solidification, l'amélioration du module d'élasticité est respectivement de l'ordre de 40 % et 65 %. Il résulte de ces dernières remarques, compte tenu des améliorations obtenues pour les différents mélanges, que la série 2 est la meilleure composition.

4.4. Perméabilité des sédiments traités

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 mm^3. L'ensemble est piloté par ordinateur via une centrale d'acquisition. L'essai de perméabilité a été effectué sur des échantillons à 56 jours d'âge.

Le tableau 10 présente les valeurs des perméabilités obtenues pour les échantillons. On constate que les perméabilités des échantillons contenant de la fumée de silice sont plus faibles que celles des autres échantillons ($3,2*10^{-8}$ m/s, série 5 pour les sédiments sains). En présence de 4 % de ciments et sans fumée de silice (série 4), la perméabilité est environ 2 fois plus importante que dans le cas de la série 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. Pour les sédiments sans fumée de silice, une augmentation de 2 % en ciment entraîne une réduction de la perméabilité de seulement 24 % (série 1 et 4).

La relation entre la perméabilité des échantillons avec la résistance en compression simple à 56 jours montre une relation polynomiale non linéaire entre la perméabilité et la résistance. En effet, la résistance à la compression simple diminue avec l'augmentation de la perméabilité. Ceci peut être attribué à l'augmentation de la porosité des échantillons avec l'augmentation de la perméabilité.

4.5. Porosité, indice des vides et densité sèche des sédiments traités

La porosité des sédiments stabilisés affecte directement leur résistance. La porosité est définie par le rapport du volume des interstices (V_v), dans un échantillon de matériau tel qu'un sédiment stabilisé, au volume total de l'échantillon, vides compris (V_s).
La porosité des échantillons et les caractéristiques des sédiments traités ont été mesurées pour les échantillons à 56 jours d'âge. Le tableau 11 montre les résultats obtenus des mesures des porosités et des indices des vides des échantillons traités.

D'après le tableau 11, la porosité varie entre 46,2 % (série 5) et 46,8 % (série 4). Ceci peut être attribuée aux propriétés de filer de la fumée de silice dans les série 5.
Par ailleurs, l'analyse de la porosité des sédiments révèle une réduction de la porosité avec l'augmentation du dosage en ciment et fumée de silice. Par exemple, cette réduction varie de 0,2 % à 0,6 % pour des mélanges contenant ou pas de la fumée de silice avec respectivement une concentration de ciment de 2 et 4 % (séries 1/2 et 4/5).

Série	Mélange (%)	K(m/s)* 10^{-8}
1	C2, CH2, CV2 et H0	6,8
2	C2, CH2, CV2, FS1 et H0	5,1
3	CH2, CV2, FS1 et H0	6,5
4	C4, CH2, CV2 et H0	5,1
5	C4, CH2, CV2, FS1 et H0	3,2

Tableau 10 : Perméabilités des échantillons mesurées par cellule triaxiale

Série	Mélange (%)	Porosité (%)	Indice des vides (%)	Densité sèche
1	C2, CH2, CV2	48,3	93,6	13,5
2	C2, CH2, CV2, FS1	48,1	92,5	13,8
3	CH2, CV2, FS1	48,4	93,7	13,5
4	C4, CH2, CV2	46,8	88,1	14,2
5	C4, CH2, CV2, FS1	46,2	85,9	14,3

Tableau 11 : Porosité et indice des vides des sédiments traités

D'autre part, pour les mêmes échantillons sains, une augmentation de 2 % de ciment entraîne une diminution de la porosité en moyenne de l'ordre de 1,7 % (séries 1/4 et 2/5).

La figure 4 présente la relation entre la densité sèche et la résistance à la compression des échantillons à 56 jours. On peut constater que la résistance à la compression augmente avec l'augmentation de la densité sèche. Par ailleurs, la figure 5 montre la variation de la perméabilité en fonction de l'indice des vides. On peut observer que la perméabilité croît avec l'indice des vides.

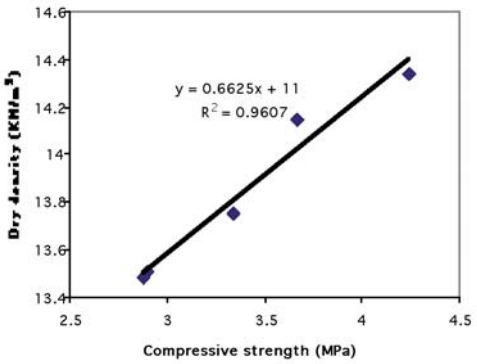


Figure 4 : Contrainte de compression en fonction de la densité sèche des échantillons traités

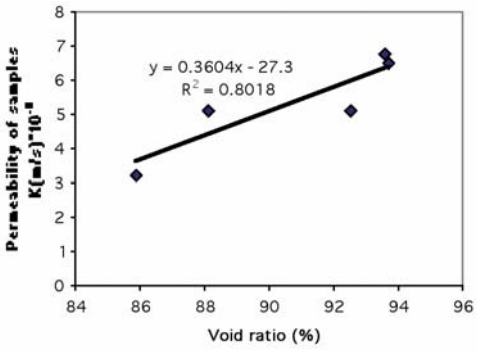


Figure 5 : Evolution de la perméabilité en fonction des indices des vides des échantillons traités

5. Conclusions

Chaque année, un grand volume de sédiments est dragué en Europe pour maintenir les activités portuaires. Afin d'éviter leur stockage ou leur rejet en mer, une proposition d'utilisation en tant que matériau en construction routière peut être envisagée. Pour atteindre la résistance nécessaire à la construction routière, des liants sont indispensables. A la lumière des résultats expérimentaux obtenus, on peut tirer les conclusions suivantes :

L'augmentation des liants dans les sédiments entraîne un accroissement de la teneur en eau optimale et une diminution de la densité sèche maximale.
La résistance à la compression simple croît avec l'âge des sédiments traités avec la modification de la teneur en eau. Dans ce cas, l'augmentation de la concentration en ciment et fumée de silice conduit à une résistance à la compression plus élevée.
La perméabilité des échantillons contenant de la fumée de silice est plus faible que celle des autres échantillons. Ceci peut être lié à la taille très fine des grains de la fumée de silice qui permet de remplir les espaces vides entre les grains dans les matériaux solidifiés.
L'analyse de la porosité des sédiments sains révèle une réduction de la porosité avec l'augmentation du dosage en ciment et fumée de silice.
Ces deux derniers résultats permettent d'envisager l'utilisation des sédiments pollués traités au ciment, à la chaux et à une faible concentration de fumée de silice (1 %), afin de piéger ces polluants dans la matrice cimentaire.

Références bibliographiques

(1) Agostini F., Skoczylas F., Lafhaj Z., (2007), « About a possible valorisation in cementitious materials of polluted sediments after treatment », Cement & Concrete Composites, Vol. 29, pp. 270–278.

(2) Bortone G. and Palumbo L., (2006), « Sediment and dredged material treatment », Elsevier, 222 p.

(3) Colin D., (2003), « Valorisation de sédiments fins de dragage en technique routière », thèse de doctorat, université de Caen, 180 p.

(4) Escalante J.I., Mendoza G., Mancha H., López J., Vargas G., (1999), « Pozzolanic properties of a geothermal silica waste material », Cement & Concrete Research, Vol. 29, pp. 623-625.

(5) GTR (1992) : « Guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme », fascicule I, Principes généraux, 100 p.

(6) Mckennon J.T., Hains N.L., et Hoffman D.C., (1994). « Method for stabilizing clay bearing soils by addition of silica and lime », Patent Cooperation Treaty (PCT), Patent classification : C09K 17/00, Publication Number WO 94/06884, 6 p.

(7) Yarbafli N, Kalkan E. et Akbulut S., (2007). « Modification of the Geotechnical Properties, as Influenced by Freeze-Thaw, of Granular Soils with Waste Additives », Cold Regions Science and Technology, Vol. 48, pp. 44-54.