

Etude comparative du comportement physico-mécanique d'un sédiment pollué et non pollué

Abdeljalil Zri, Nor-Edine Abriak, Zentar Rachid

Ecole nationale supérieure des Mines de Douai
941, rue Charles Bourseul - BP 10838 - 59508 DOUAI Cedex

Pour toute correspondance : abriak@ensm-douai.fr ; zentar@ensm-douai.fr ; zri@ensm-douai.fr

Résumé

Dans le contexte du développement durable, le devenir des sédiments est géré en fonction de leur impact sur l'environnement. Généralement, ces sédiments peuvent faire l'objet de rejet en mer soit par surverse, soit par immersion, ou d'un stockage à terre pour les plus pollués. Mais ces solutions sont confrontées à une réglementation de plus en plus rigide en termes de protection de l'environnement. Face à cette problématique, de nouvelles voies alternatives de gestion s'imposent, comme le pré-traitement ou le traitement conçu dans une logique de valorisation.

Toute technique de valorisation nécessite une phase de caractérisation afin de mieux connaître le matériau, ses différents composés, son potentiel polluant ainsi que son comportement.

Notre travail consiste à faire une étude comparative de comportement mécanique et physique entre les sédiments pollués (P) et non pollués (NP), via l'établissement d'une carte d'identité de chaque type de sédiment.

Les propriétés mécaniques ont été évaluées suite aux essais de cisaillement direct, aux essais œdométriques et aux essais triaxiaux. Les résultats obtenus montrent que les sédiments pollués et non pollués possèdent plus ou moins les mêmes caractéristiques mécaniques.

Mots-clés : sédiments, pollution, valorisation, consolidation, triaxial.

I. Introduction

A l'œil nu, notre sédiment (P) se distingue de celui (NP) par sa couleur noire et son odeur nauséabonde avec une teneur en eau supérieure à la limite de liquidité. Ces données nous permettent de relever le caractère polluant et organique des sédiments (P). Mais afin de conforter ces résultats, une caractérisation physique, mécanique, chimique et biologique devient une nécessité.

La présente étude se restreint à la détermination des propriétés physiques et mécaniques qui régissent le comportement général des sédiments. Dans ce travail, l'ensemble des essais pratiqués est présenté et discuté.

La caractérisation mécanique consiste à étudier le comportement à court et à long terme des sédiments suite à un état de contrainte donné. A cet effet, nous avons fait

subir à nos matériaux plusieurs types de sollicitations à travers les essais suivants :

- scissomètre
- pénétromètre à cône
- cisaillement direct à la boîte de Casagrande
- compression avec déformation latérale nulle
- compression triaxiaux à contrainte latérale constante.

Dans l'objectif d'augmenter la faible consistance des sédiments, nous avons procédé à l'essai de préconsolidation. Les mesures de la résistance au cisaillement ont été effectuées sur un sédiment pâteux ($W < WL$), grâce au scissomètre et au pénétromètre à cône, au moment de la détermination des limites d'Atterbergs.

Nous signalons que notre échantillon a subi un tamisage au tamis de 2 mm. Le refus obtenu est de l'ordre de 1 % constitué principalement de coquillages.

2. Caractérisation physique

2.1. Etude granulométrique

L'analyse granulométrique par tamisage et la sédimentométrie constituent deux techniques d'essais complémentaires pour caractériser la distribution granulaire des particules fines à grossières du matériau.

Au vu de la finesse de nos sédiments, leur granulométrie a été établie par sédimentométrie et par granulomètre Laser.

2.1.1. Granulomètre Laser

Le principe de cet appareil repose sur la diffraction d'un faisceau laser par des particules mises en suspension dans un fluide. L'appareil utilisé est de type COULTER LS 230. Cet appareil permet de déterminer la taille des particules allant de 0,04 à 2000 μm . La forme des particules est supposée sphérique.

Pour une meilleure désagrégation des particules, nous avons effectué des analyses après passage de l'échantillon à l'ultrason pendant deux minutes.

Les résultats obtenus mettent en évidence le caractère extrêmement fin du matériau. La fraction fine dans les sédiments est largement prédominante. Le limon en est le constituant principal (tableau I).

La figure 1 met en évidence l'effet de l'utilisation de l'ultrason sur la granularité du matériau testé car le couplage de l'ultrason pour une durée de 2 minutes et l'hexa méta

phosphate de potassium conduisent à une bonne désagrégation de sédiment et, par conséquent, à une augmentation de la fraction argileuse de 8 % à 18 % pour les sédiments pollués et de 13 % à 23 % pour les sédiments non pollués.

2.1.2. Sédimentométrie

Cet essai est basé sur la loi de Stokes qui donne la relation entre la vitesse d'une particule et son diamètre sous la pesanteur dans un milieu visqueux. Ces particules sont supposées sphériques.

Le principe de l'essai consiste à mesurer la variation de la densité en fonction du temps à plusieurs reprises à l'aide d'un hydromètre.

La granulométrie obtenue par la sédimentométrie pour les deux matériaux est presque identique avec une teneur en argile et en sable plus élevée par rapport aux résultats donnés par le granulomètre Laser. En outre, la dominance de la partie limoneuse est confirmée par la sédimentométrie (60 % pour les sédiments pollués contre 58 % pour les sédiments non pollués).

Les valeurs obtenues de coefficient d'uniformité et de coefficient de courbure montrent que la granulométrie pour tous les échantillons est bien étalée.

L'inaboutissement à des résultats identiques par la sédimentométrie et le granulomètre Laser tient à plusieurs facteurs parmi lesquels la différence du principe de base de chaque essai, l'existence de la matière organique qui ralentit la vitesse de décantation et la forme des particules testées.

Selon la classification du GTR (1992), nos sédiments sont classés dans la catégorie des sols fins (passant à 80 µm > 35 %).

2.2. Teneur en eau

Vu le caractère organique de nos matériaux, le séchage à l'étuve à des températures différentes a été entrepris afin d'appréhender l'effet de la température sur l'évolution du sédiment, en particulier au regard de la matière organique. L'état hydrique du sédiment pollué est de l'ordre de 175 % après séchage à l'étuve à 105 °C (tableau II). La teneur en eau définie par un séchage à 40 °C et 60 °C est d'environ 172 %.

La différence du résultat peut être due à une perte de matières organiques ou d'éléments volatils à des températures supérieures à 60 °C. Bien que la différence reste faible, il est important pour les caractérisations chimiques de maintenir une faible température de séchage pour éviter de changer la composition initiale du matériau.

En outre, nous remarquons que la teneur en eau donnée par la méthode de micro-ondes est similaire à celle donnée par la méthode normalisée par séchage dans une étuve à 105 °C (NF P 94-050).

La différence entre la teneur en eau du sédiment pollué obtenue et celle du sédiment peu pollué, qui est de 156 % (tableau II), est principalement due au mode et au point de prélèvement des sédiments.

2.3. Masse volumique des grains solides

Dans le cas général, la valeur de g_s pour les argiles est comprise entre 2,65 et 2,8 g/cm³. Cette valeur dépend de la nature du minéral prédominant dans le matériau ainsi que du taux de matières organiques.

Afin de mettre en évidence l'effet de la matière organique sur les valeurs de g_s , nous avons déterminé la valeur de la densité sèche des deux sédiments avant et après calcination à une température de 450 °C.

Les résultats obtenus montrent effectivement l'augmentation de la densité de nos matériaux après élimination de matières organiques par calcination (tableau II).

2.4. Matière organique

Les mesures ont été effectuées sur des échantillons de sédiments bruts et traités que nous avons séchés préalablement à trois températures différentes : 40 °C, 60 °C et 105 °C. Le protocole d'essai consiste à calciner dans un four à moufle les échantillons à des températures différentes : 375 °C, 450 °C et 550 °C pendant une durée de 2 h.

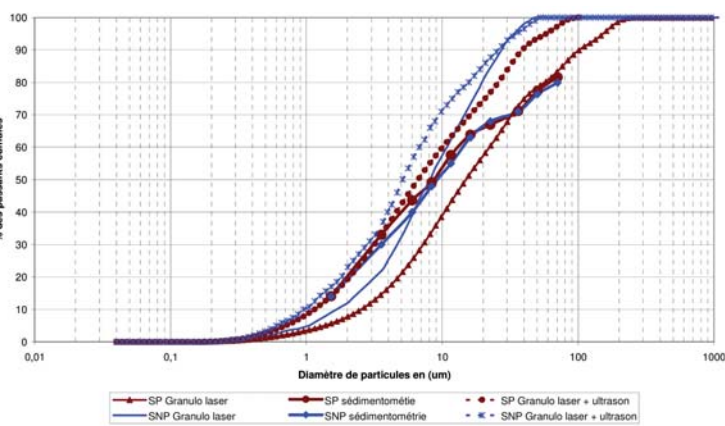


Figure 1. Courbe granulométrique de sédiments pollués et non pollués

Le tableau ci-dessous retrace la composition des sédiments en fonction de la distribution granulométrique, ainsi que les valeurs des coefficients d'uniformité (C_u) et de courbure (C_c) pour chaque échantillon.

Paramètres	Granulométrie sans ultrason		Granulométrie avec ultrason		Sédimentométrie	
	SP	SNP	SP	SNP	SP	SNP
Teneur en fine [$< 80\mu\text{m}$]	87	100	98	100	83	81
Argile [$< 2\mu\text{m}$]	8	13	18	23	20	20
Limon [$2\text{ à }63\mu\text{m}$]	73	87	78	77	60	58
Sable [$> 63\mu\text{m}$]	19	0	4	0	20	22
C_u	8.1	6.1	8.3	7.4	11.67	12.5
C_c	0.82	1.07	0.37	0.54	0.61	0.68

Tableau I. Caractéristiques granulométriques des sédiments pollués et non pollués

Les résultats obtenus montrent la présence d'une importante fraction organique dans les deux matériaux (tableau II). Ces valeurs obtenues confirment le caractère organique de nos échantillons.

La dispersion des résultats pour le même matériau peut être expliquée par l'augmentation de la température qui engendre fortement la calcination des autres constituants présents dans les sédiments hormis la matière organique. Il sera intéressant de procéder à l'évaluation de la matière organique par d'autres méthodes afin de confirmer nos résultats et de prendre des matériaux inorganiques comme témoins.

Nous remarquons aussi que le taux de matières organiques dans les sédiments non pollués est légèrement au-dessus de celui des sédiments pollués, et cela quelle que soit la température de calcination.

2.5. Limites d'Atterbergs

La plasticité est une propriété caractéristique des éléments très fins ou argileux du sol, en relation avec l'existence de couches d'eau adsorbée avec ou sans électrolytes dissociés. Les essais de limites d'Atterbergs effectués sur nos matériaux donnent des indices de plasticité très élevés (tableau II). Autrement dit, la compressibilité des sédiments est très grande.

A l'aide du diagramme de plasticité (figure II), nous classifions nos sédiments pollués parmi les limons inorganiques fortement compressibles et argiles organiques, et nos sédiments non pollués parmi les argiles inorganiques très plastiques.

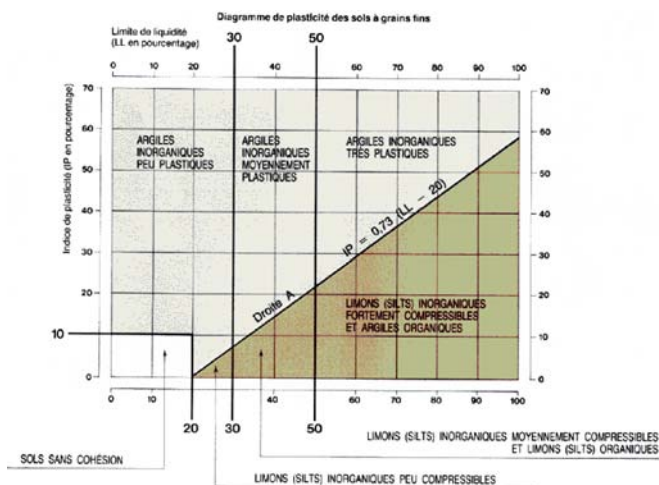


Figure II. Diagramme de plasticité des sols fins

2.6. Argilosité

Deux grandeurs permettent d'apprécier ce paramètre : l'indice de plasticité et la valeur de bleu de méthylène (VBs).

L'évaluation de l'activité argileuse des sédiments a été effectuée selon la norme NP P 94-064. Les résultats obtenus sont mentionnés dans le tableau II. Soulignons que l'argilosité intervient notamment dans le choix du produit de traite-

ment et conditionne la nécessité ou pas de réaliser un prétraitement à la chaux dans le cas d'un traitement mixte.

2.7. Mesure de la sensibilité pH

La composition chimique des sédiments peut être influencée par le pH qui conditionne la solubilité de certaines phases solides. Le pH peut être la cause d'une variation de la solubilité de certains métaux, au cours de l'oxydation du sédiment.

Caplat (2001) note que les pH de Port-en-Bessin présentent une stabilité relative à des valeurs aux alentours d'un pH = 7. Par ailleurs, dans les sédiments carottés de l'estuaire de la Seine, Martin (1996), cité par Caplat, a mesuré des pH allant de 7,1 à 7,6. (Caplat, 2001).

Les résultats des essais de mesure du pH montrent que les sédiments non pollués sont neutres. En revanche, les sédiments pollués sont basiques (tableau II).

Paramètre	Remarques	SP	SNP
Teneur en eau (%)	40 °C	172.7	151
	105 °C	175.2	156
	Micro-onde	175	156.9
Densité (g/cm ³)	Brut	2.502	2.5
	Calciné	2.634	2.613
Matières organiques (%)	375 °C	5.06	3.5
	450 °C	9.24	6.4
	550 °C	12.61	11
Limites d'Atterbergs	W _L [%]	103	112
	W _p [%]	59	46
	I _p [%]	44	66
	I _L	2.62	1.69
	I _C	1.62	0.67
Argilosité	Vbs	3	3.62
Mesure de pH	pH	8.83	7

Tableau II. Récapitulatif de la caractérisation physique des sédiments pollués et non pollués

2.8. Classification de sédiment

Les résultats obtenus précédemment nous amènent à classer notre sol parmi les sols fins renfermant des matières organiques. Selon la classification du GTR (1992), notre sédiment appartient à la catégorie des sols FIA4. Selon la classification AASHTO, notre échantillon est de classe A-7-5 (sol argileux) et, d'après la classification unifiée des sols USCS, notre matériau est de classe OH (argiles organiques de plasticité moyenne à élevée ; silts organiques).

3. Caractérisation mécanique

3.1. Pénétrromètre à cône (Fall cône) et scissomètre

La figure III présente l'évolution de la résistance au cisaillement Cu en fonction de la teneur en eau pour les essais Fall cône et au scissomètre. La cohésion non drainée Cu s'exprime en fonction de la nature d'essai

par la relation suivante :

- Scissomètre :

$C_u = T/K$ [T : moment de torsion et K : coefficient en fonction de la raideur du ressort]

- Fall cône :

$C_u = 9.81 k_{\alpha} m/d^2$ [m : masse du cône, d : profondeur de pénétration du cône et k_{α} : constante en fonction de l'angle de point du cône (prise égale à 0.85 (Wood, 1991 ; Dubois,

pour les sédiments (sol marin).

L'enfoncement qui correspond à la limite de liquidité mesurée à la coupelle pour les sédiments pollués et non pollués est respectivement de l'ordre de 22,72 mm et de 22,09 mm.

3.2. Préconsolidation

La concrétisation de l'étude de comportement mécanique de sédiments pollués à travers les essais de consolidation unidimensionnelle et de cisaillement nécessite une pré-consolidation préalable du matériau. Dans cet objectif, un système de préconsolidation destiné aux matériaux dont la teneur en eau initiale est supérieure à la limite de liquidité a été développé. Le protocole de préconsolidation consiste, en premier lieu, à faire subir à l'échantillon disposé dans un conteneur cylindrique une dépression de 100 kPa par une aspiration à l'aide d'une pompe à vide jusqu'à stabilisation des tassements. En second lieu, l'échantillon subit des charges par palier à l'aide d'un piston afin d'atteindre la contrainte de préconsolidation fixée à 100 kPa.

L'application d'une dépression puis d'un chargement par le haut s'avère très efficace pour éviter ou diminuer le gradient de contraintes dans l'échantillon.

Pour des raisons pratiques, on distingue deux types de moules (consolidomètre cylindrique en plexiglas) de diamètre 36 mm pour les essais triaxiaux et de diamètre 70 mm destinés aux essais œdométriques.

La procédure de préparation des échantillons consiste à homogénéiser le matériau, à mesurer sa teneur en eau, à ajouter éventuellement de l'eau déminéralisée afin d'atteindre une teneur en eau égale à 1.5 WL, à remplir par couche les consolidomètres sur une table vibrante afin d'évacuer les bulles d'air, à veiller à remplir les trois quarts du cylindre du consolidomètre, et à relever la masse de chaque consolidomètre ainsi que la hauteur initiale du matériau.

Lors de la pré-consolidation et sous les différentes charges appliquées, le sédiment est soumis à une décantation des particules solides qui le constituent. Les flocons de vase perdent progressivement une partie de leur eau interstitielle. Leur réseau va se resserrer et former un matériau qui, au cours de ce tassement, présentera des états physiques très différents : liquide, visqueux puis solide après décantation prolongée.

Une fois la préconsolidation terminée, nous relevons le tassement et nous traçons l'évolution de l'indice de vide dans le temps. Ainsi, nous effectuons des mesures de teneur en eau, sur la partie haute et la partie basse de chaque échantillon, afin de mettre en évidence l'existence du gradient de teneur en eau.

Nous remarquons, d'après les résultats obtenus, que les échantillons soumis à notre protocole de préconsolidation ne présentent pas un gradient de teneur en eau. Le phénomène de gradient de teneur en eau est dû d'une part à la non répartition uniforme dans l'éprouvette des charges, lesquelles sont plus importantes en haut qu'en bas, et d'autre part à l'écoulement gravitaire de l'eau.

Courbe de la résistance au cisaillement

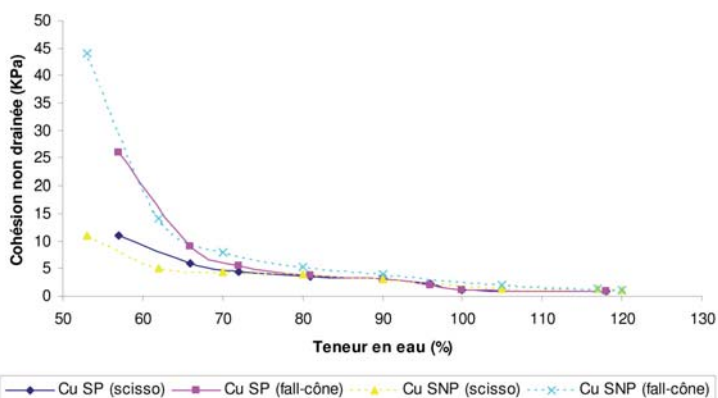


Figure III. Evolution de la résistance au cisaillement des sédiments pollués en fonction de la teneur en eau

2006)]

Nous remarquons que les valeurs de la cohésion non drainée obtenues par le scissomètre et le pénétromètre à cône pour les deux matériaux sont quasi identiques aux alentours de la limite de liquidité, mais elles divergent de plus en plus en se rapprochant de la limite de plasticité du sol. Selon la norme NF P 94-052-1, la limite de liquidité correspond à une pénétration (P = 17 mm) contre une pénétration égale à 20 mm dans la norme anglaise. Mais, ces valeurs de pénétration précitées sont spécifiques pour les sols continentaux. Le laboratoire, après une étude préliminaire (Zentar et al.), fixe cette pénétration à 24 mm

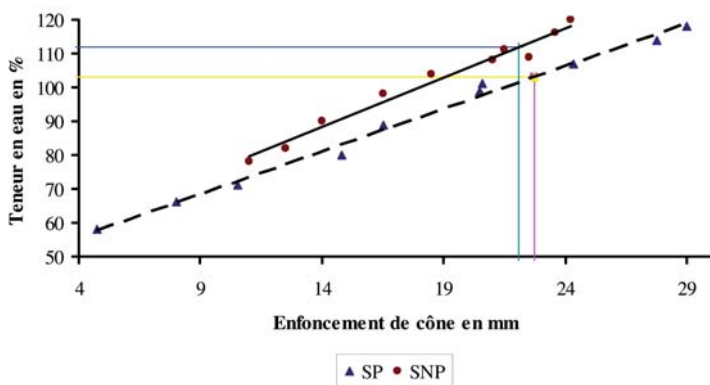


Figure IV. Courbe de l'enfoncement du cône de pénétromètre des sédiments pollués à différentes teneurs en eau

3. 4. Essai œdométrique

L'objectif de l'essai est de mesurer le module de compressibilité et de tracer la courbe effort-déformation. Le pourcentage de compression en fonction de la contrainte effective et l'indice des vides en fonction de la contrainte effective (figure V).

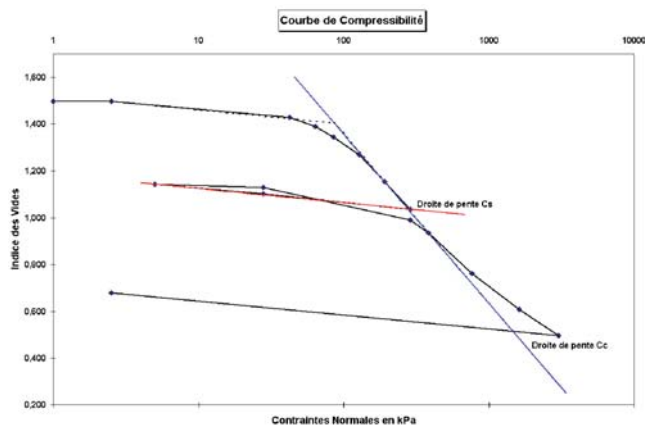


Figure V. Courbe de compressibilité des sédiments pollués

L'essai œdométrique nous permet aussi de mesurer la perméabilité du sol directement sur l'échantillon et son évolution en fonction de temps.

Le tableau ci-dessous résume l'ensemble des caractéristiques de compressibilité et de consolidation des sédiments pollués et non pollués.

Paramètres	Caractéristiques œdométriques moyennes	
	SP	SNP [Brakni, 2008]
Indice de vides e_0	1.5	0.6
Indice de vide final e_f	0.4	0.15
Pression de préconsolidation σ'_p (kPa)	85.6	49
Indice de compressibilité C_c	0.721	0.146
Indice de gonflement C_s	0.061	0.0138
Rapport C_c/C_s	11.81	10.57
Indice de consolidation C_v ($10^{-7} m^2/s$)	2.47	3.5
Coefficient de perméabilité K (charge constante : 100 kPa)	1.38E-8	2.5E-10

Tableau III. Paramètres de compressibilité et de consolidation du sédiment

On a vu précédemment que la granularité des sédiments étudiés est majoritairement limoneuse. Ces sédiments ont donc un comportement typique des sols fins et leurs valeurs de perméabilité doivent correspondre à celles d'argiles avec : ($10E-11 < k < 10E-7$). Ces sédiments ont effectivement une perméabilité faible, celle d'une argile. Ils ont donc un comportement assez compressible, qui a une tendance à moins laisser passer l'eau.

Les indices C_c et C_s obtenus montrent que les sédiments pollués sont extrêmement compressibles (Montmorillonites) et les sédiments non pollués sont moyennement compressibles (Kaolinites). Cela peut être expliqué par un taux de matière organique plus élevé dans les sédiments pollués.

3.3. Essai à la boîte de cisaillement

Cet essai consiste à étudier la résistance au cisaillement d'un échantillon suivant un plan de rupture imposé et supposé horizontal. Il permet aussi d'apprécier sa cohésion et son angle de frottement.

Dans notre étude, nous avons réalisé des essais de type consolidé non drainé avec une vitesse de cisaillement de 0,9 mm/min.

Avant d'effectuer l'essai de cisaillement, les éprouvettes subissent une consolidation drainée pendant 12 h. Puis nous avons appliqué pendant la consolidation et le cisaillement direct les charges suivantes : 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 et 0.6 MPa.

Les figures présentent les différents résultats obtenus suivant les différentes configurations d'essais.

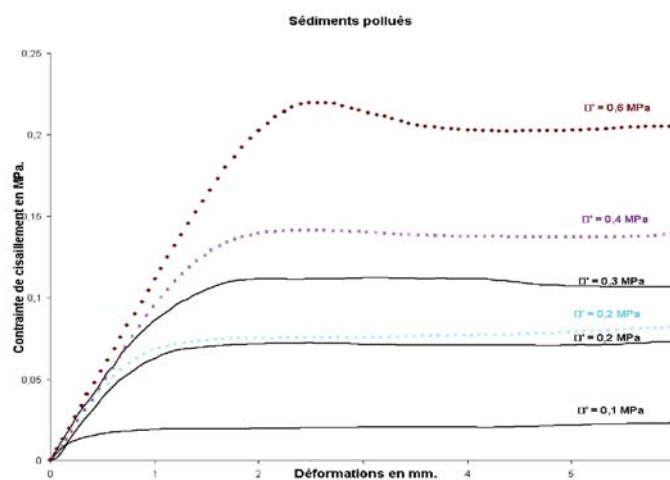


Figure VI. Courbe du déplacement horizontal en fonction de la contrainte appliquée pour les sédiments pollués

Nous remarquons que pour les mêmes contraintes normales, les valeurs de la résistance au cisaillement du sédiment traité à la chaux sont plus grandes que celles du sédiment naturel.

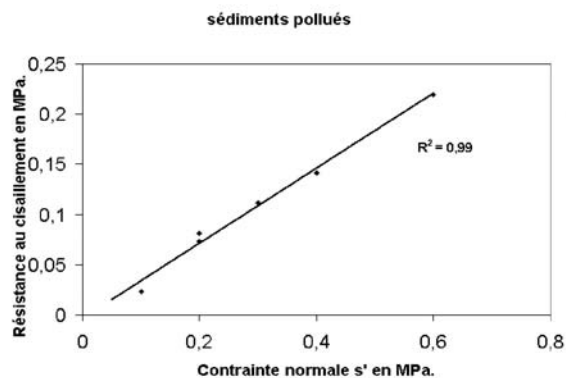


Figure VII. Courbe de contraintes de cisaillement en fonction de la contrainte normale pour les sédiments pollués

Les résultats de comparaison de l'angle de frottement interne et de la cohésion entre les sédiments pollués et non pollués sont présentés dans le tableau ci-après.

	Sédiment pollué	Sédiment non pollué (Dubois, 2006)
Cohésion C_u (Mpa)	0,003	0,01
Angle de frottement φ (°)	20,52	33

Tableau IV. Valeurs de C_u et j

Nous remarquons que la résistance au cisaillement des sédiments non pollués est plus importante que celle des sédiments pollués.

3.5. Essai triaxial

Les essais triaxiaux sont utilisés principalement pour déterminer la résistance au cisaillement des sols. Ils représentent aussi les essais de référence pour l'étude des lois de comportement des sols et en particulier pour l'étude de la déformabilité des sols quand on sort des conditions unidimensionnelles de l'essai œdométrique. L'essai triaxial est réalisé sur une éprouvette cylindrique placée dans une cellule permettant de lui appliquer simultanément une pression latérale isotrope et une charge axiale. Les résultats présentés dans les tableaux et figures suivants correspondent à une déformation axiale de 15 % pour les sédiments pollués.

Valeurs initiales	Avant essais			Valeurs finales	Après cisaillement		
	1	2	3		1	2	3
Ho (en mm)	73,00	72,00	72,00	Hf en mm	56	43	62,5
Do (en mm)	36,00	36,00	36,00	Mhf en g	97,8	92,72	89,85
Masse humide en g	111,99	113,77	114,00	Msf en g	63,88	65,66	65,6
gh en g/cm ³	1,56	1,64	1,65	Wf %	53,10	41,21	36,97
W %	64,02	63,72	64,77				
gd en g/cm ³	0,95	1,00	1,00				
Saturation ucp en kPa	400	400	400				
Consolidation	10 jours de consolidation						
s ['] c en kPa	100	200	600	D'après le graphique $t = f(s')$: $q^* = 21,57^\circ$			
Critère de rupture				$t_0 = -0,96$ kPa			
q = (sis ₃ max	102,90	238,19	534,77	D'où : $\bar{\gamma} = 23,29^\circ$ $C^* = 0$ kPa			
s ['] en kPa	98,95	370,49	645,58				
t en kPa	51,45	119,09	267,38				
Vitesse d'écrasement	0,1 mm/min						

Tableau V. Tableau récapitulatif des résultats de SP

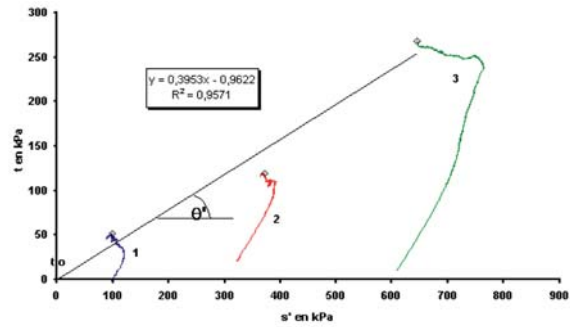


Figure VIII. Représentation de Lambe des SP

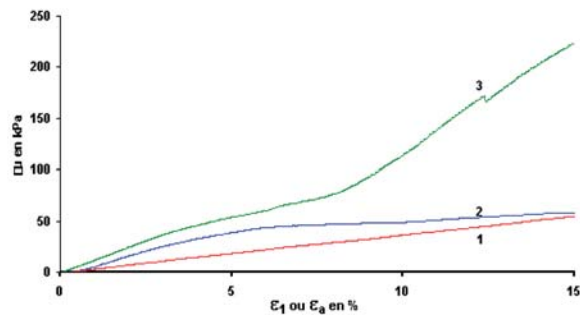


Figure IX. Courbe de la variation de la pression interstitielle en fonction de la déformation axiale des SP

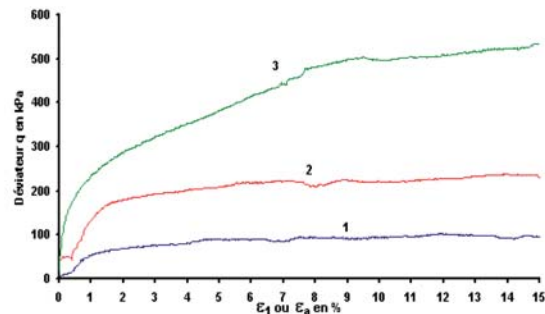


Figure X. Courbe déviateur-déformation des SP

	A $\epsilon_a = 5\%$	A $\epsilon_a = 10\%$	A $\epsilon_a = 15\%$
Angle de frottement φ (°)	13,38	18,60	23,29
Cohésion C (kPa)	19,38	6,76	-1,05

Tableau VI. Les valeurs de la cohésion et l'angle de frottement à différentes valeurs de la déformation axiale des SP

La figure montre que l'état critique est atteint à une déformation de l'ordre de 16 %.

Le tableau VI montre que l'angle de frottement augmente avec l'augmentation du taux de déformation axiale. Par contre, la cohésion chute.

Dans les mêmes conditions, l'angle de frottement obtenu pour les sédiments non pollués est de l'ordre de 31 ° avec une cohésion nulle. Les valeurs obtenues à 15 % pour les SP et SNP sont proches de celles données par la boîte de cisaillement directe.

4. Discussion

L'étude minéralogique et l'étude chimique s'avèrent intéressantes et complémentaires afin de parfaire la connaissance de notre matériau.

A l'issue de cette phase de caractérisation, nos échantillons se présentent comme des matériaux extrêmement fins composés majoritairement de limon et d'argile. Cette fraction limoneuse et argileuse est de même ordre pour les sédiments pollués que les non pollués. Par contre, la fraction sableuse est quasi absente dans les deux matériaux.

L'inaboutissement à des résultats identiques par la sédimentométrie et le granulomètre Laser tient à plusieurs facteurs parmi lesquels la différence du principe de base de chaque essai, l'existence de la matière organique qui ralentit la vitesse de décantation, et la forme des particules testées.

L'état hydrique des sédiments pollués est plus élevé que celui des sédiments non pollués. Cette différence peut être due au mode et au point de prélèvement des sédiments. On constate aussi que la plage de plasticité des sédiments non pollués est plus importante que celle des sédiments pollués.

Nous ne signalons aucune grande différence pour les valeurs de bleu méthylène, la densité sèche, le PH mètre et pour les coefficients de compressibilité, de gonflement, de consolidation et de perméabilité.

Les sédiments non pollués contiennent plus de matière organique que les sédiments non pollués. La présence de cette dernière influencera les comportements mécaniques de chaque type de sédiments.

L'angle de frottement des sédiments non pollués est plus important que celui des sédiments pollués. Par ailleurs, la cohésion est presque identique.

En résumé, les sédiments pollués présentent des caractéristiques physiques et mécaniques légèrement différentes de celles des sédiments non pollués. Leurs traitements s'avèrent nécessaires pour toute voie de valorisation.

5. Conclusion et perspective

La gestion des sédiments pollués est une problématique complexe. Elle soulève des défis technologiques, économiques et environnementaux de plus en plus importants. A cet effet, une réflexion basée sur une étude d'impact et une analyse de risque ou une analyse de cycle de vie (ACV) constitue une étape cruciale pour une gestion saine des matériaux dragués.

La valorisation présente une nouvelle alternative pour le devenir des sédiments, dans le cadre d'une réglementation de plus en plus exigeante fondée sur le développement durable.

L'étude a montré que les sédiments pollués possèdent presque les mêmes propriétés que les sédiments non pollués.

Il s'avère judicieux d'appliquer aux sédiments pollués la même formule que pour les sédiments non pollués.

Enfin, il s'avère judicieux de procéder à des analyses plus poussées afin de mettre en évidence l'effet de la matière organique sur la compressibilité et la résistance au cisaillement des sédiments, de parfaire la connaissance de nos matériaux par une étude complémentaire minéralogique et chimique et d'étudier la durabilité et l'impact sur l'environnement des sédiments pollués valorisés dont on adopte les techniques de valorisation déjà appliquées pour les sédiments non pollués.

6. Bibliographie

Brakni S., Première approche vers une valorisation de granulats artificiels à base de sédiments de dragage portuaire – Application en génie côtier, Thèse de doctorat de génie civil, Université d'Artois – Ecole des Mines de Douai, 2008.

Caplat, Caractérisation géochimique de sédiments fins du littoral du Calvados (baie de Seine), Thèse de doctorat de science de la terre et de l'univers, Université de Caen, 2001.

Dubois V., Etude du comportement physico-mécanique et caractérisation environnementale des sédiments marins – Valorisation en technique routière, Thèse de doctorat de génie civil, Université d'Artois – Ecole des Mines de Douai, 2006.

Gregoire P., Modèle conceptuel d'aide à la décision multicritère pour le choix négocié d'un scénario de dragage maritime, Thèse de doctorat, Université d'Artois – Ecole des Mines de Douai, 2004.

Holm G., Trank R., Ekstrom A., « Improving lime column strength with gypsum », In proceedings of the 8th European Conference on Soil Mechanics and foundation Engineering, Finland, 1983, p. 903-907.

KRIBI S., Décomposition des matières organiques et stabilisation des métaux lourds dans les sédiments de dragage, Thèse de doctorat de science et technique du déchet, Institut national des sciences appliquées du déchet, 2005.

Mac Farlane F., Méthodologie de gestion des matériaux de dragage maritime, application au port de Dunkerque, Thèse de doctorat de génie civil, Université d'Artois – Ecole des Mines de Douai, 2004.

Marot F., Caractérisation et traitement de sédiments de dragage contenant des polluants métalliques, Thèse de doctorat, BRGM d'Orléans, 1998.

Migniot C., Lorin J., « Etude de l'exhaussement des fonds de l'avant-port ouest de Dunkerque – Propriétés physiques des vases », Laboratoire central d'hydraulique de France pour le Port autonome de Dunkerque, 1986, p. 32.

Tremblay H., Amélioration mécanique et prédiction de la compressibilité des sols fins du Québec, Thèse de doctorat de génie civil, Université de Laval, 1998.