



Propriétés hydrauliques et de consolidation de sédiments lagunés du Port de Dunkerque

Dahbia BERKAINE¹, Daniel LEVACHER¹

1. Université de Caen - Normandie, Unicaen, Laboratoire M2C UMR6143CNRS,
24 rue des Tilleuls, 14000 Caen, France.
dahbia.berkaine@unicaen.fr ; daniel.levacher@unicaen.fr

Résumé :

Le suivi d'un lagunage comme la valorisation de sédiments dragués en matériau de remblai ou de comblement exige la détermination des propriétés hydromécaniques et de consolidation. Les moyens d'essais disponibles sont la colonne de décantation pour les concentrations faibles en sédiments et l'essai œdométrique pour des concentrations plus élevées. L'utilisation de ces moyens permet d'évaluer diverses grandeurs en lien avec ces propriétés : perméabilité, coefficient de consolidation, coefficient de compression, coefficient de gonflement, coefficient de fluage, ...

D'une part, ces données sur les sédiments sont peu nombreuses ce qui démontre tout l'intérêt de les déterminer et de les rassembler dans une base de données. Et d'autre part, ces données obtenues sur un même sédiment permettent d'en étudier la variabilité. L'application a porté sur un sédiment portuaire mis en lagunage dont plusieurs prélèvements ont été effectués dans un même casier et permis de réaliser ces essais.

Après avoir rappelé les caractéristiques géotechniques des sédiments, les résultats des essais sont présentés. Puis l'analyse porte sur la variabilité des grandeurs obtenues et sur une étude comparative avec d'autres sédiments.

Mots-clés : Sédiments portuaires, Dragage, Lagunage, Décantation, Consolidation, Perméabilité, Variabilité.

1. Introduction

Les propriétés physico-chimiques et environnementales des sédiments marins ont été largement étudiées dans le cadre de leur gestion à terre en vue d'une valorisation en matériau. Pour d'autres applications comme les mises en remblais, en matériaux de couverture, en remplissage de cavités ou d'excavations ou la gestion de bassins de lagunage, la détermination des propriétés hydromécaniques et de consolidation est nécessaire. L'évaluation des paramètres de décantation et de tassement se fait en laboratoire à partir d'essais à la colonne et d'essais œdométriques. On peut en estimer la perméabilité par des méthodes simples sous certaines hypothèses. La collecte de ces données est utile aux ingénieurs et gestionnaires de projets relatifs au devenir des sédiments déposés à terre. Cependant les matrices sédimentaires portuaires sont très évolutives et leur constitution de base minérale varie avec les apports anthropiques

locaux (contaminations, matières organiques). Les sédiments marins présentent donc une forte variabilité qui va générer de fait des incertitudes au niveau des résultats d'essai. C'est dans ce contexte que les propriétés hydromécaniques ont été évaluées sur un sédiment laguné du port de Dunkerque prélevé dans 2 casiers dans une maille de 4 m². C'est donc sur un même sédiment que ces essais de décantation et de tassement ont été menés. L'analyse des coefficients et paramètres issus de ces essais a permis d'une part d'obtenir des ordres de grandeur et constituer un panel de données pour ce sédiment et d'autre part d'étudier leur variabilité, (BERKAINE, 2015). Un des intérêts de travailler sur différents prélèvements issus de bassins de lagunage remplis lors d'une campagne de dragage, est de démontrer qu'une fois partiellement déshydratés et mélangés (mise en andains et retournement), les sédiments lagunés présentent-ils des caractéristiques homogènes ou non ? Cette homogénéité est d'importance pour envisager des traitements dans le cadre d'une valorisation industrielle.

2. Matériels et méthodes

2.1 Caractéristiques du sédiment laguné du port de Dunkerque

Les sédiments ont été prélevés à partir de casiers de lagunage du Port de Dunkerque, sous forme de blocs d'une couleur grise en surface et noire en dessous indiquant la présence de matière organique, voir tableau 1. Ils sont très fins et présentent un aspect homogène.

Les valeurs des propriétés physico-chimiques sont rassemblées dans le tableau 1 pour l'ensemble des sédiments étudiés, référencés DK_iC_i, (DK pour Dunkerque et C pour le numéro de casier).

Tableau 1. Propriétés physico-chimiques du sédiment portuaire laguné de Dunkerque.

Paramètres	DK1C1	DK2C1	DK3C2	DK4C1
Teneur en eau (%)	81,00	63,37	75,97	87,67
CaCO ₃ (%)	8,62	8,07	12,25	5,35
MO (%)	14,02	12,35	12,96	11,91
Argiles (<2μm) (%)	1,00	1,50	1,00	1,00
Silts (2 à 63μm) (%)	74,00	76,00	76,50	77,00
Sables (>63μm) (%)	25,00	22,50	23,00	22,00
D ₅₀ (μm)	72,00	72,50	73,00	74,00
VBS	4,40	4,00	3,95	3,92

2.2 Essai à la colonne

Deux séries d'essais ont été menées sur quatre sédiments : DK1C1, DK2C1, DK3C2, DK4C1, avec des concentrations initiales visées de 100 g/l (Série A) et 250 g/l (Série

B). Ces deux concentrations ont été choisies en fonction du moyen de dragage pouvant être utilisé sur site (hydraulique ou mécanique). Pour obtenir ces concentrations initiales, des ajouts d'eau potable aux sédiments ont été faits. Après homogénéisation, les sédiments sont mis dans des tubes de décantation transparents, où l'évolution de la surface libre du sédiment est suivie et notée en fonction du temps, voir figure 1.

2.3 Essai œdométrique

L'œdomètre comporte une partie centrale appelée cellule œdométrique, un réservoir d'eau permettant d'assurer la saturation de l'échantillon selon la norme, XP P94-090-1, (1997). Deux pierres poreuses supérieure et inférieure assurent le drainage. Une trousse coupante évitant tout remaniement ou modification de la structure, sert de cellule de diamètre 50,5 mm et hauteur 20 mm. Un piston est disposé sur l'échantillon sur lequel un dispositif de chargement vient par la suite appliquer la charge prévue durant l'essai. Cette charge est délivrée par un bras de levier équipé d'un système de contrepoids permettant d'utiliser des rapports de levier différents, le rapport retenu est de 10:1, voir figure 2. Enfin un comparateur est utilisé pour la mesure des déplacements verticaux.



Figure 1. Colonnes de décantation.
Essais en cours.



Figure 2. Appareillage œdométrique et son dispositif de chargement.

3. Résultats typiques

3.1 Essai de décantation

L'observation des colonnes de décantation pour ces sédiments lagunés du port de Dunkerque, a permis la construction des courbes de tassement pour différentes concentrations ; les courbes de tassement obtenues pour ces concentrations, sont

représentées sur les figures 3 et 4.

- Série A : A partir de ces courbes, on constate que les tassements relatifs évoluent rapidement au début des essais, ensuite ils commencent à se stabiliser à partir de 10 heures. Au-delà, il y a une tendance asymptotique très faible. On remarque pour ces 4 sédiments de casiers différents, une assez bonne concordance dans l'évolution du tassement et une bonne similarité (sédiments lagunés bien mélangés et homogènes).
- Série B : La décantation des quatre sédiments étudiés avec une concentration initiale proche de 250g/l montre une évolution similaire à la série A mais avec un tassement relatif moindre.

Ces deux séries ont été réalisées avec 2 concentrations initiales différentes mais pour un même sédiment laguné dans 2 casiers C1 et C2. On constate une bonne répétabilité des essais à la colonne et une procédure d'essai fiable.

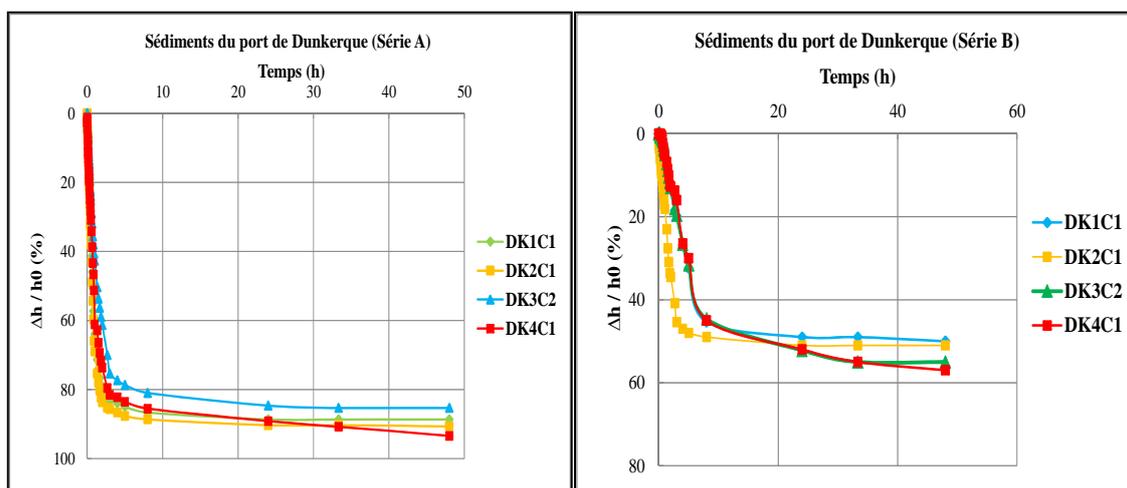


Figure 3. Courbes de tassement - Série A. Figure 4. Courbes de tassement – Série B.

3.2 Essai de tassement

Les essais œdométriques ont permis de suivre dans le temps, la déformation des échantillons de sédiments : DK1C1, DK2C1, DK3C2 et DK4C1. Différentes charges ont été appliquées, elles correspondent à des contraintes allant de 2,92 kPa à 400 kPa. Tout d'abord les courbes tassement-temps ont pu être tracées et ont permis d'évaluer le coefficient de consolidation C_v , voir figure 5 pour les échantillons DK3C2 et DK4C1.

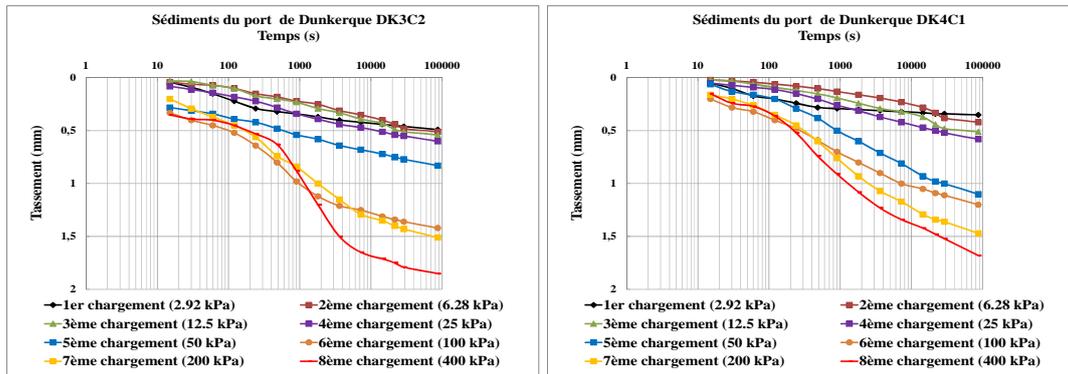


Figure 5. Courbes de tassement-temps pour 2 des 4 échantillons de sédiments lagunés du port de Dunkerque.

4. Analyses des résultats

4.1 Paramètres de décantation

Les figures 6 et 7 montrent l'évolution du coefficient de perméabilité k en fonction de la concentration C . Les points présentés sur ces graphiques sont obtenus en utilisant la méthode graphique définie par SANCHEZ et GROVEL (1994). Ces deux séries montrent une bonne concordance des résultats de l'évolution de k en fonction de la concentration C pour 4 prélèvements d'un même sédiment effectués dans 2 casiers.

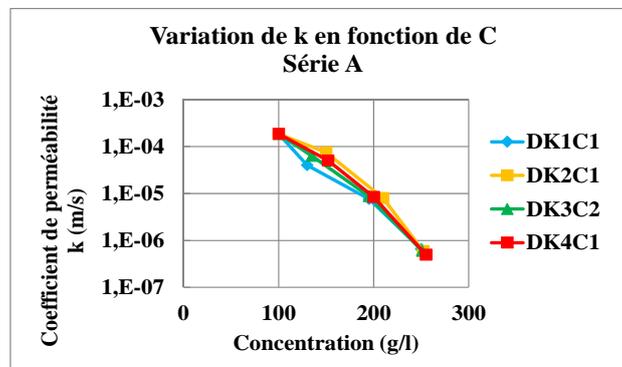


Figure 6. Relation k - C de la série A.

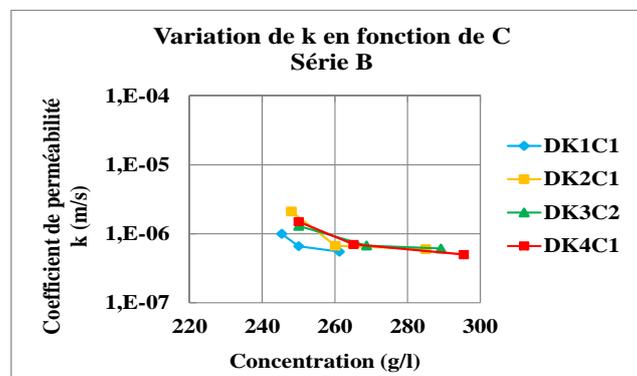


Figure 7. Relation k - C de la série B.

4.2 Paramètres de tassement

A partir des courbes de tassement œdométrique, les coefficients de consolidation C_v ont été calculés selon la méthode de Taylor. Les résultats de cette méthode d'analyse sont représentés sur la figure 8. La relation entre la contrainte effective appliquée et l'indice des vides ($e-\log(\sigma_v')$) a été représentée sous forme de courbes dites courbes œdométriques (figure 9).

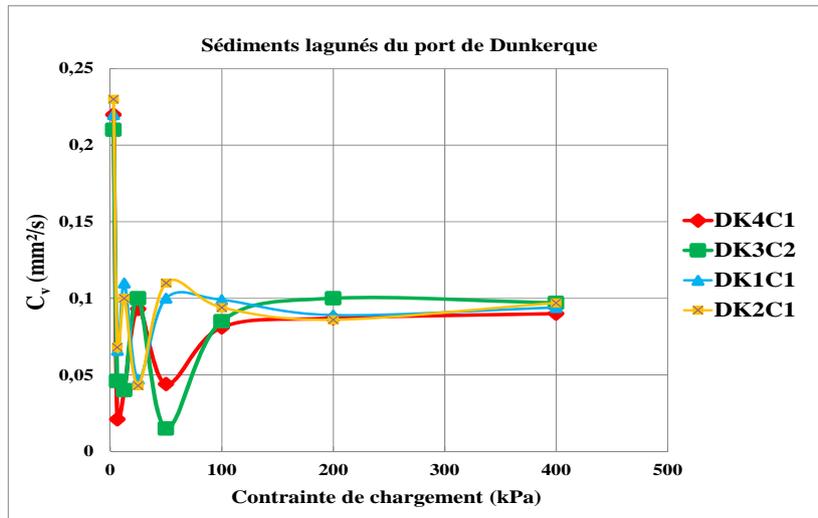


Figure 8. Relation C_v - contrainte appliquée.

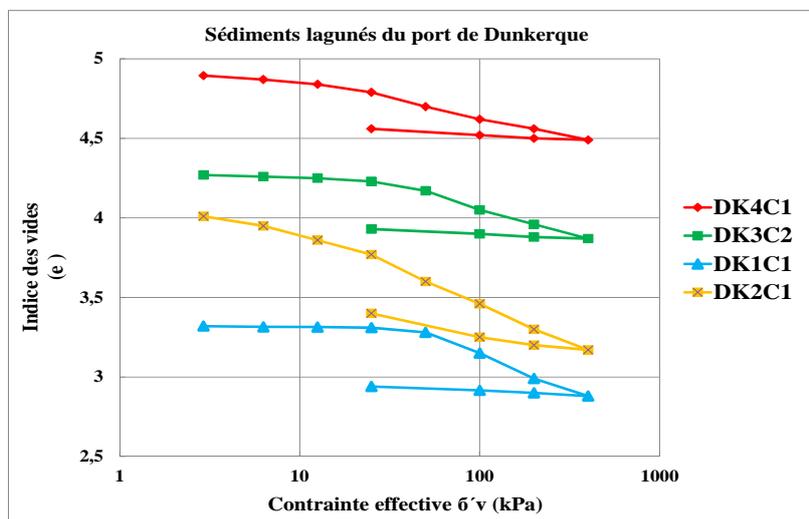


Figure 9. Courbes de compressibilité.

Les résultats obtenus dans la figure 8 montrent des coefficients de consolidation C_v en fluctuation pour des niveaux de contraintes appliquées faibles, allant de quelques kPa à 100 kPa. Ceci peut s'expliquer par la procédure de mise en route de l'essai sous contrainte faible, de la haute teneur en eau des sédiments et de la forte compressibilité qui en résulte. Il faudrait aménager un dispositif spécifique pour l'étude de

compressibilité des sédiments à teneur en eau élevée comme adapter les méthodes de dépouillement. Ceci a déjà été proposé par différents auteurs (HONG & ONISTSUKA, 1998 ; HONG et al, 2013 ; CAO *et al*, 2014). A partir d'une surcharge de 100 kPa, les coefficients de consolidation des sédiments deviennent plus ou moins stables. Dès l'application d'une contrainte de 200 kPa, les valeurs de C_v tendent vers une même valeur. Les courbes de compressibilité des sédiments du port de Dunkerque ont des allures classiques. Ce sont sensiblement deux droites avec, au début du chargement de faibles courbures dues à la faible variation de l'indice des vides, expliquée probablement par les faibles contraintes appliquées.

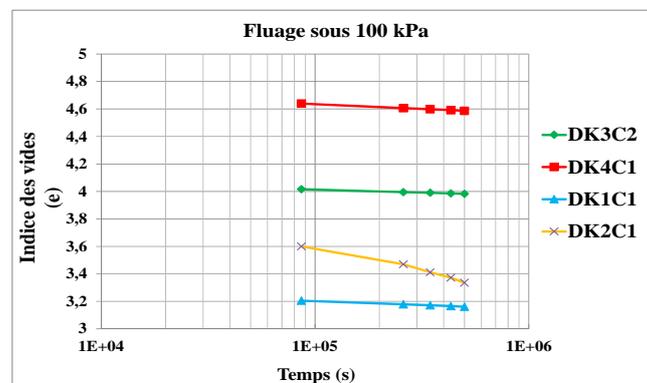


Figure 10. Courbes de fluage sous une charge de 100 kPa.

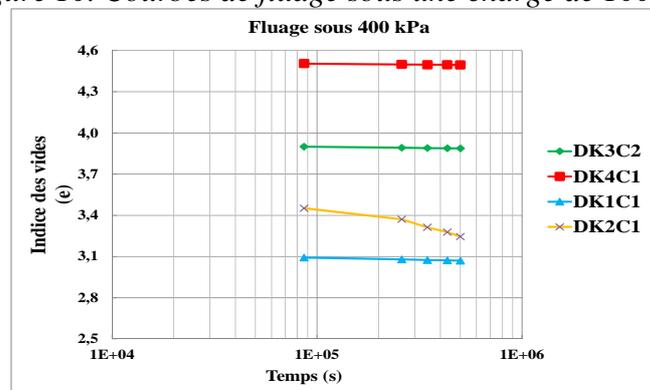


Figure 11. Courbes de fluage sous une charge de 400 kPa.

Lors de chaque essai œdométrique, deux essais de fluage ont été effectués. Les chargements retenus correspondent à des contraintes constantes de 100 et 400 kPa, appliquées durant une période de 7 jours pour chaque essai. Les figures 10 et 11 montrent l'évolution du fluage pour les sédiments du port de Dunkerque étudiés. On constate, en observant les résultats des essais de fluage, une variation très faible de l'indice des vides qui caractérise effectivement une consolidation secondaire. Si l'on compare les résultats des essais menés sous 100 kPa et sous 400 kPa, les indices de fluage traduisent clairement l'effet de la consolidation. Les indices pour chaque charge de fluage sont sensiblement les mêmes.

Tableau 3. Paramètres de tassement des sédiments lagunés du port de Dunkerque.

Paramètres	DK1C1	DK2C1	DK3C2	DK4C1
Coefficient de consolidation C_v (m^2/s)	1,00E-07	1,00E-07	1,00E-06	1,00E-06
Indice de consolidation C_c	0,450	0,300	0,350	0,250
Indice de gonflement C_s	0,050	0,060	0,055	0,066
C_s/C_c	0,110	0,200	0,150	0,260
Compressibilité $C_c/(1+e_0)$	0,146	0,113	0,119	0,100
Indice de fluage C_a sous 100 kPa	0,065	0,059	0,051	0,080
Indice de fluage C_a sous 400 kPa	0,036	0,028	0,033	0,015

4.3 Perméabilité

On remarque sur les figures 6 et 7 que l'évolution de la perméabilité k en fonction de la concentration C variant de 100 g/l (concentration initiale) à 250 g/l est presque linéaire et inversement proportionnelle. Les coefficients de perméabilité sont de plus en plus faibles pour des concentrations de plus en plus élevées, ceci concorde avec d'autres travaux menés sur ces mêmes sédiments de Dunkerque (SALHI, 2015 ; BAGAMBOULA, 2015). Les pentes des courbes des figures 6 et 7 montrent l'évolution de la perméabilité pour des intervalles de concentrations, elles deviennent de plus en plus faibles pour des concentrations élevées. Elles sont aussi dépendantes de la nature des sédiments qui sont très fins et de la teneur en matière organique.

5. Variabilité des paramètres

Les sédiments étudiés ont été prélevés dans une maille réduite de 4 m² dans deux casiers différents C1 et C2 de l'aire de lagunage du port de Dunkerque. Dans cette étude, les valeurs pour le casier C1 sont la moyenne de 3 valeurs. On peut observer que les paramètres de caractérisation avant tout essai de laboratoire montrent une variabilité faible, tableau 4.

Tableau 4. Variabilité des paramètres étudiés.

Paramètres de caractérisation								
	W	CaCO ₃	MO	Argiles <2µm	Silts 2 à 63µm	Sables >63µm	D ₅₀	VBS
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(µm)	
Casier C1	77,34	7,35	12,76	1,17	75,66	23,16	72,83	4,10
Casier C2	76,00	12,25	12,96	1,00	75,60	23,00	73,00	3,95
Paramètres de consolidation								
	Cv	Cc	Cs	Cs/Cc	Compressibilité	Indice de fluage	Indice de fluage	
	(m ² /s)				Cc/(1+e ₀)	Ca (100 kPa)	Ca (400 kPa)	
Casier C1	4×10 ⁻⁷	0,33	0,059	0,19	0,120	0,068	0,026	
Casier C2	10×10 ⁻⁷	0,35	0,055	0,15	0,119	0,051	0,033	

Les teneurs en carbonates en CaCO_3 montrent le plus grand écart. Les valeurs varient de 7,35 à 12,25%, est-ce une variabilité initiale ou l'effet du lagunage sous conditions climatiques naturelles ? Seule la teneur qui est lié à l'échantillonnage (quantité à prélever), à la présence de débris fins coquilliers et au nombre réduit de mesures. Considérant les essais œdométriques, on observe d'après le tableau 4, que les paramètres de consolidation sont très peu variables même si le coefficient de consolidation varie de 4×10^{-7} à $10 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. Ce dernier montre une certaine fluctuation sous des charges faibles et peut dépendre de la méthode retenue quant à sa détermination.

6. Conclusions

La caractérisation physico-chimique de sédiments du port de Dunkerque, prélevés dans deux casiers de lagunage différents montre que ces sédiments lagunés sont majoritairement limoneux, peu à très plastiques et moyennement organiques. Il apparaît que l'argile présente dans ces sédiments est active d'après la valeur de bleu du sol (VBS) c'est-à-dire sensible à l'eau, donc il faudra s'attendre à des phénomènes de gonflement et de retrait en fonction de la teneur en eau. Mais le taux de MO observé, près de 13%, conduit à ces mêmes phénomènes et rend problématique une valorisation directe en remblai. On note une très faible variation des paramètres de caractérisation à part la teneur en carbonates. La réalisation des essais de consolidation et de décantation pour la détermination des relations entre la perméabilité k et la concentration C montre que les sédiments étudiés dans cette étude sont compressibles et peu perméables ce qui exige un prétraitement pour toute utilisation en remblais. La variabilité observée sur les paramètres de consolidation est faible, les opérations de dragage, de refoulement et de lagunage n'ont apparemment pas eu d'effet : les échantillons prélevés révèlent une bonne homogénéité des sédiments dans les 2 casiers.

7. Références bibliographiques

- BAGAMBOULA M. (2015). *Hypothèses des sources de contamination des sédiments du port Est de Dunkerque et étude de leurs caractéristiques hydromécaniques*. Rapport de Master 1. Université de Caen, France, 30 p.
- BERKAINE D. (2015). *Etude des paramètres de décantation et de consolidation des sédiments portuaires lagunés de Dunkerque*. Rapport de Master 1. Université de Caen, France, 58 p.
- CAO Y.P., WANG X.S., DU L., DING J.W, DENG Y.F. (2014). *A method of determining nonlinear large strain consolidation parameters of dredged clays*. Water Science and Engineering, Vol. 7(2), pp 218-228. <http://dx.doi.org/10.3882/j.issn.1674-2370.2014.02.009>

Thème 6 – Gestion durable des zones littorales et estuariennes

- HONG Z.-S., ONISTSUKA K. (1998). *A method of correcting yield stress and compression index of Ariake clays for sample disturbance*. Soils Foundations, Vol. 38(2), pp 211-222. http://dx.doi.org/10.3208/sandf.38.2_211
- HONG Z.-S., BIAN X., CUI Y.-J., GAO Y.-F., ZENG L.-L. (2013). *Effect of initial water content on undrained shear behaviour of reconstituted clays*, Géotechnique, Vol. 63(6), pp 441–450. <http://dx.doi.org/10.1680/geot.11.P.114>
- SALHI S. (2015). *Etude des paramètres de décantation et de consolidation des sédiments portuaires lagunés de Dunkerque*. Rapport de Master 2, Université de Sfax, Tunisie, 47 p.
- SANCHEZ M., GROVEL A. (1994). *Le tassement des vases comme processus sédimentaire*, Journées Nationales Génie Côtier Génie Civil, Sète, pp. 69-73. <http://dx.doi.org/10.5150/jngcgc.1994.010-S>
- XP P94-090-1. (1997). *Sols: Essai œdométrique. Partie 1 : essai de compressibilité sur matériaux fins quasi saturés avec paliers de chargement*. AFNOR.