

Étude du séchage naturel des sédiments du port de Dunkerque en vue de valorisations ultérieures

Beatriz Boulosa Allariz¹, Daniel Levacher¹, Matheus Müller^{1,2}

(1) Université de Normandie, Unicaen, UMR 6143 CNRS, M2C, 24 rue des Tilleuls, 14000 Caen, France

(2) Instituto Tecnológico de Aeronáutica, ITA - São José dos Campos, Brazil-12228-900

RÉSUMÉ

Les opérations de dragage engendrent d'importants volumes de sédiments qui deviennent des déchets dans leur gestion à terre. Du fait que ces sédiments ont de hautes teneurs en eau, ils posent des contraintes dans leur transport, dans leur valorisation et/ou leur stockage. Le séchage naturel présente une alternative économique et acceptable du point de vue environnemental. Afin d'optimiser cette technique de déshydratation, des critères d'aptitude au séchage naturel des sédiments sont déterminés à l'aide d'essais en laboratoire. Une synthèse des résultats issus de l'essai d'égouttage-séchage et de l'essai scissométrique, en utilisant des sédiments marins du Port de Dunkerque est présentée et la relation de la cohésion non drainée en fonction de l'indice de liquidité est discutée.

MOTS-CLÉS : dragage, sédiments, séchage naturel, cohésion non drainée, indice de liquidité

ABSTRACT

Dredging operations play an essential role in the economy, the environment and the development of a region. These operations generate large volumes of sediments that become waste when they are land managed. These high water content sediments pose a problem for its transport and its reuse or storage. From the environmental and economic perspective, natural drying is the best dewatering method. In order to optimize this technique, this present study explains how to determine dewatering ability criteria by the use of laboratory tests. For that, dewatering test is performed on harbor sediments of Port of Dunkirk. Results are discussed and undrained shear strength versus liquidity index relation is proposed.

KEYWORDS: dredging, sediments, natural drying, drainage test, undrained shear strength, liquidity index

Étude du séchage naturel des sédiments du port de Dunkerque en vue de valorisations ultérieures

Beatriz Boullosa Allariz, Daniel Levacher, Matheus Müller

Introduction

Les opérations de dragage génèrent une importante quantité de sédiments de dragage qui deviennent des déchets quand ils sont stockés à terre. À titre d'exemple, un total de 64908 tonnes de sédiments a été déposé à terre en 2013 concernant les façades maritimes françaises (Messenger et Bouvet, 2017). Diverses recherches confirment la possibilité de réutilisation des sédiments en génie civil dans l'élaboration de matériaux de construction, de sous-couches routières ou dans la fabrication de mortiers et de bétons (Dubois, 2006 ; Anger, 2014). Pour ces applications, les sédiments de dragage doivent être déshydratés. Le séchage naturel est la technique de déshydratation la plus économique et acceptable du point de vue environnemental. Dans cette présente étude on cherche à déterminer des critères d'aptitude au séchage naturel des sédiments de Dunkerque à l'aide d'un essai d'égouttage-séchage couplé à un essai scissométrique. La combinaison de ces deux essais permet d'obtenir une relation de la cohésion non drainée en fonction de l'indice de liquidité. Cette relation permet de suivre le processus de séchage avec une seule mesure de teneur en eau et de définir le moment opportun du retournement des sédiments avec des engins pour accélérer le séchage.

Matériels et méthodes

Sédiment étudié

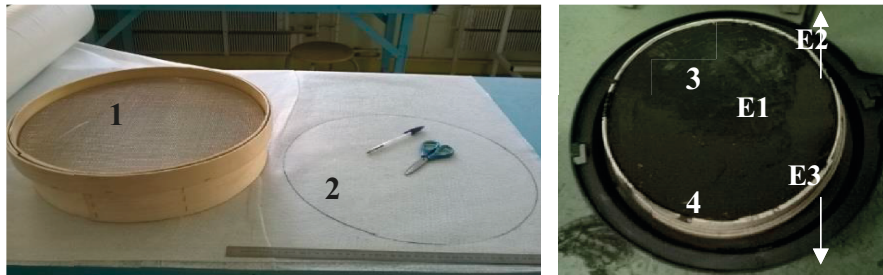
Le sédiment étudié provient du Grand Port Maritime de Dunkerque, dans la région des Hauts-de-France. Il est composé essentiellement de 50 % de limons fins, 24 % de sables fins, 20 % de limons grossiers, 5 % de sables grossiers et 1 % d'argiles. Ce sédiment possède une distribution granulométrique bien étalée et sa courbe granulométrie est mal graduée (ISO 13320-1). Les limites d'Atterberg classent ce sédiment parmi les limons plastiques (NF P94-051). La limite de liquidité (w_L) est égale à 66,98 %, la limite de plasticité (w_p) est de 51,44 % et l'indice de plasticité (I_p) de 15,54 %. Sa valeur au bleu de méthylène est de 3,17g/100g (NF P94-068). Il contient 12,80 % de matière organique (NF XP P94-047) et 9,34 % de teneur en carbonates (NF P94-048).

Essais réalisés : essai d'égouttage-séchage (EES) et essai scissométrique

L'essai d'égouttage-séchage est un essai de laboratoire non conventionnel mené par Duan (2008), Miraoui (2010) et amélioré par Boullosa Allariz (2018). Il a pour objet l'étude de l'évolution de l'eau présente dans un sédiment (E1), de la quantité d'eau drainée (E2) et de l'eau évaporée (E3) pendant le séchage naturel. Au début de l'essai, les éléments qui composent l'échantillon (voir figure 1.a) sont pesés séparément. Ensuite, un géotextile est disposé en fond de tamis comme l'illustre la figure 1.b. Le tamis est rempli avec le sédiment de teneur en eau connue, l'ensemble est pesé (P0), puis laissé à l'air pendant 40 jours à température ambiante ($20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$), à une humidité de l'air comprise entre 60 et 70 % de saturation. Le tamis remplis est pesé quotidiennement durant cette période (P1). L'essai est arrêté lorsque la teneur en eau finale des sédiments atteint 20 ± 10 % de leur masse brute. La différence entre P0 (initial) et P1 (final) donne la masse d'eau E1 qui s'est écoulée ou s'est évaporée pendant la durée de l'essai. L'eau drainée est collectée dans un support placé sous le tamis, qui est pesé avant et après l'essai, la différence de masse donnant la masse d'eau égouttée E2. La quantité d'eau évaporée E3 est calculée par la différence entre E1 et E2.

L'essai scissométrique permet de déduire la cohésion d'un sédiment non drainé (S_u) en calculant le moment de torsion (M_T) maximal correspondant aux efforts de cisaillement résistants au sein de l'échantillon de sédiment. Il est réalisé avec un appareil scissométrique équipé de ressorts de différentes raideurs (K) et d'un ensemble de pales de différentes dimensions. L'essai consiste à positionner une tige munie à son extrémité d'un croisillon formé de quatre pales verticales de largeur (D) et hauteur (H), dans l'échantillon de la figure 1.b. sans vitesse initiale, puis de lui imposer un mouvement de rotation à vitesse angulaire constante jusqu'au cisaillement du sédiment. L'angle de rotation (θ) est mesuré toutes les quinze secondes jusqu'à la rupture du sédiment (NF P94-072). S_u est mesurée tous les trois jours, déduite de l'équation 1.

$$S_u = \frac{2 \cdot M_T}{\pi \cdot D^2 \cdot \left(H + \frac{D}{3}\right)} = \frac{K \cdot \theta}{\pi \cdot D^2 \cdot \left(H + \frac{D}{3}\right)} \quad \text{eq n (1)} \quad (1)$$



1 : Tamis en bois (diamètre 40 cm, hauteur 7 cm) ; 2 : Géotextile ; 3 : Échantillon de sédiment de teneur en eau initiale $w_0 = 2 \times$ limite de liquidité ; 4 : Coupelle en PVC

Figure 1. Dispositif expérimental pour l'essai d'égouttage réalisé à $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ dans l'air maintenu à un degré d'humidité compris entre 60 % et 70 % de saturation

Résultats et discussion

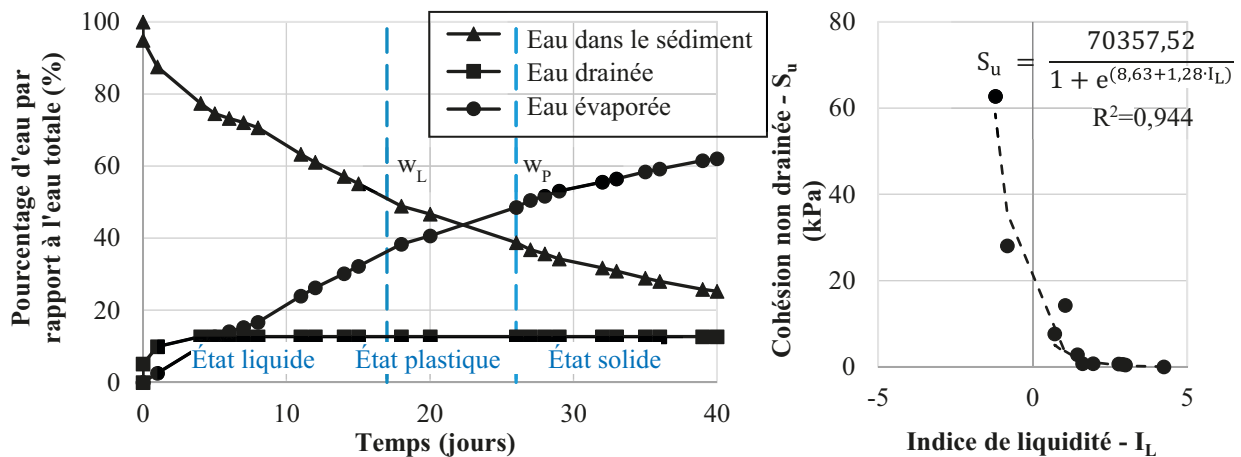
Initialement en début du processus de séchage naturel, les sédiments étudiés sont dans un état saturé ($w_0 > w_L$). Dans cet état, les sédiments évacuent l'eau essentiellement par drainage pendant les premiers jours de séchage. Le drainage permet d'éliminer l'eau libre des sédiments en réduisant d'importantes quantités d'eau dans des périodes de temps réduites. Il est lié à la perméabilité des sédiments en cours de décantation (Levacher *et al.*, 2018). Dans cette présente étude, le drainage tend à se stabiliser au 4^{ème} jour de séchage, voir figure 2.a. La stabilisation du drainage au 4^{ème} jour de séchage est due au pourcentage de limons (>50 %) et à la matière organique (>10 %) importante et au fait que la hauteur initiale de l'échantillon est faible (7 cm), (Boullosa Allariz, 2018). Dès que le drainage se stabilise, l'évaporation devient de plus en plus prépondérante. Ce phénomène évacue l'eau interstitielle des sédiments. Il est très lié à la surface en contact avec l'air et aux caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques des sédiments (Boullosa Allariz *et al.*, 2017). L'apparition de fissures fait augmenter la surface de sédiment en contact avec l'air. Plus les sédiments sont en contact avec l'air, plus le phénomène d'évaporation est important. La fissuration est proportionnelle à la fraction argileuse-limoneuse et au type d'argile (Paineau, 2011). Pour le sédiment étudié, le phénomène de fissuration a commencé au 11^e jour de séchage. Au même moment, il est observé que la limite de liquidité (w_L) se situe au niveau du point d'inflexion de la courbe de séchage. À partir de la limite de liquidité, la vitesse de séchage se réduit et les sédiments passent de l'état liquide à l'état plastique. Comme le sédiment étudié présente une importante quantité de fines et un pourcentage élevé de matière organique, les points d'inflexion sont moins perceptibles. Rappelons que l'indice de liquidité (I_L) permet de relier les indices de plasticité (w_p) et de liquidité (w_L) avec la teneur en eau des sédiments, avec l'équation 2. Par ailleurs, les résultats obtenus montrent que la cohésion non drainée (S_u) est inversement proportionnelle à la teneur en eau du sédiment (w) et directement proportionnelle au temps de séchage. La combinaison des essais EES et scissométrique permet d'obtenir une équation $S_u = f(I_L)$. Pour le sédiment étudié, l'équation $S_u = f(I_L)$ a été déterminée avec $R^2 = 94\%$ à l'aide du programme Curve Expert Professional,

voir figure 2.b. Les résultats obtenus dans cette étude sont cohérents avec ceux obtenus par Miraoui (2010) qui a aussi étudié les sédiments du port de Dunkerque, avec ceux de l'étude du séchage des sédiments méditerranéens menée par Duan (2008) et avec les sédiments alpins et bretons récapitulés dans les études réalisées par Boullosa Allariz (2018).

$$I_L = \frac{w - w_p}{w_L - w_p} \quad (2)$$

Conclusion

Le séchage naturel des sédiments du Grand Port Maritime de Dunkerque a été analysé dans la présente étude avec un essai de laboratoire non conventionnel, dénommé « Essai d'Égouttage- Séchage-EES » couplé à un essai scissométrique. La relation $S_u = f(I_L)$ obtenue permet d'obtenir la cohésion non drainée du sédiment, de déduire la capacité portante de tout engin circulant sur la couche de sédiment. Elle ne nécessite que la mesure de la teneur en eau du sédiment et la connaissance des limites d'Atterberg. Une équation a été proposée pour le sédiment du port de Dunkerque. Cette équation a été confrontée à celles obtenues à partir d'autres sédiments (Boullosa Allariz, 2018). Dans cette présente étude, il est montré que le séchage naturel des sédiments est gouverné par deux actions : un drainage puis une évaporation de l'eau contenue dans les sédiments. Pendant le drainage, l'eau libre est évacuée permettant de réduire des quantités élevées d'eau pendant des périodes de temps très courtes. Une fois le drainage terminé, l'évaporation prédomine par le fait que la surface des sédiments offerte en contact avec l'air augmente. Le processus d'évaporation est plus long dans le temps que le drainage. Pour améliorer cette technique de déshydratation et en s'appuyant sur la relation $S_u = f(I_L)$, des interventions mécaniques peuvent être suggérées : perforations ou scarifications en surface, retournement des sédiments, (Levacher *et al.*, 2018). L'équation $S_u = f(I_L)$ permet d'estimer la capacité portante du sédiment pour supporter le poids d'engins destinés à améliorer le séchage naturel et décider du moment de l'intervention.



(a) Pourcentages d'eau selon le temps de séchage

(b) Relation de S_u en fonction d' I_L **Figure 2. Relations déduites du séchage naturel des sédiments du port de Dunkerque**

Références bibliographiques

Anger B. (2014). Caractérisation de sédiments fins de retenues hydroélectriques en vue d'une orientation vers des filières de valorisation matière. Thèse de doctorat, Université de Normandie, Unicaen, France, 316p.

Boullosa Allariz B. (2018). Déshydratation naturelle et mécanisée de sédiments. Étude des processus mis en jeu et applications. Thèse de doctorat, Université de Normandie, Unicaen, France, 427p.

Boullosa Allariz B., Levacher D., Théry F. (2017). Behaviour of dredged dam sediments during natural dehydration. 16th Geo-Environmental Engineering – GEE, Seoul, Corée du Sud, 19-20 Mai 2017.

Duan Z. (2008). Caractérisation, stabilisation et solidification de sédiments fins marins. Thèse doctorat, Université de Normandie, Unicaen, 198 p.

Dubois V. (2006). Étude du comportement physico-mécanique et caractérisation environnementale des sédiments marins – Valorisation en technique routière. Thèse de doctorat, Université d'Artois, France, 298 p.

ISO 13320-1 - AFNOR (1999). Analyse granulométrique - Méthodes par diffraction laser - Partie I : Principes généraux.

Levacher D., Boullosa Allariz B., Müller M. (2018). Some Aspects of Sediment Dewatering Laboratory Testing and Useful Relationships for Practice. 17th Geo-Environmental Engineering – GEE, Fukuoka, Japan.

Messenger M., Bouvet T. (2017). Enquête dragage 2013. Synthèse des données. CEREMA – CETMEF, 40 p.

Miraoui M. (2010). Mise en œuvre d'une démarche de prétraitement et de traitement des sédiments de dragage en vue d'une valorisation dans le génie civil. Université des Sciences et Technologies de Lille 1, 115-139 p.

NF P94-048 - AFNOR (1996). Sols : Reconnaissance et essais - Détermination de la teneur en carbonate - Méthode du calcimètre.

NF P94-051 - AFNOR (1993). Sols : reconnaissance et essais. Détermination des limites d'Atterberg. Limite de liquidité à la coupelle – Limite de plasticité au rouleau.

NF P94-068 - AFNOR (1998). Sols : Reconnaissance et essais - Mesure de la capacité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux - Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux par l'essai à la tâche.

NF P94-072 - AFNOR (1995). Sols : Reconnaissance et essais - Essai scissométrique en laboratoire.

NF XP P94-047 - AFNOR (1998). Sols : Reconnaissance et Essais - Détermination de la teneur pondérale en matière organique – Méthode par calcination.

Paineau E-N., (2011). Transitions de phases dans les argiles. Influence de la minéralogie et de la morphologie. Comportement sous écoulement et sous champs. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, France, 311 p.