



## Un nouvel outil de mesure de la cohésion non drainée des sédiments et sols mous

Daniel LEVACHER<sup>1</sup>, Andry RAZAKAMANANTSOA<sup>2</sup>, El Yazid CHERIFI<sup>1</sup>

1. Université de Normandie, Unicaen, Laboratoire Morphodynamique Continentale et Côtière, UMR 6143 M2C, 24 rue des Tilleuls, F-14000 Caen, France.  
*daniel.levacher@unicaen.fr*
2. Département Géotechnique, environnement, risques naturels et sciences de la terre, GERS, IFSTTAR, Route de Bouaye, CS4, 44344 Bouguenais, France.  
*andry.razakamanantsoa@ifsttar.fr*

### Résumé :

La résistance au cisaillement non drainée  $S_u$  des sols mous et sédiments est obtenue à partir d'essais classiques de laboratoire et de terrain. Elle est déterminée à partir de formules bien établies qui nécessitent l'usage de facteurs dépendant notamment des paramètres du sol testé comme ceux issus de l'essai pénétrométrique au cône (CPT). De plus, les essais usuels ne fournissent pas de profil de mesures continu dans une couche de sol, excepté l'essai CPT. Récemment les pénétromètres favorisant l'écoulement de sol *i.e. full flow penetrometers*, autour d'un élément en pointe de pénétration sont apparus en ingénierie offshore comme le T-bar (TBT) ou le pénétromètre à bille (BPT). Basé sur le concept du T-bar, un outil de mesure en laboratoire a été développé et adapté aux mesures de  $S_u$  en laboratoire. Des premiers essais ont été menés dans des couches peu épaisses de sols mous (kaolin) et des sédiments de barrage.

L'analyse des conditions et limites d'utilisation de cet outil font l'objet du présent article à partir d'essais réalisés en laboratoire.

**Mots clés :** Sédiments, Sols mous, Consistance, Cohésion non drainée, Sédi-bar test, Caractérisation, Instrumentation.

### 1. Introduction

La résistance au cisaillement non drainée  $S_u$  des sols est un paramètre utile au dimensionnement des ouvrages côtiers en terre *i.e.* digues, barrages, remblais. Ce paramètre intervient aussi dans l'évaluation de la stabilité et des risques de rupture de pentes. Dans le cas des sols mous et des sédiments, il intervient dans l'étude de stabilité de berges et de dépôts de sédiments en formation ou mis en remblai. Les méthodes ou outils de détermination de  $S_u$  des sols mous en laboratoire et *in situ* sont relativement nombreux (HOLTZ & KOVACS, 1981). Hormis les essais à la boîte de cisaillement direct, de compression simple et triaxiaux de type UU qui nécessitent la mise en place d'un échantillon de sol, il existe d'autres techniques pour estimer la résistance au cisaillement  $S_u$  de sols mous. Le tableau 1 rassemble certains outils de mesure

## Thème 8 – Gestion et valorisation des sédiments marins

couramment utilisés dans les laboratoires de mécanique des sols et de modélisation géotechnique en centrifugeuse et sur le site.

Tableau 1. Essais permettant la détermination de  $S_u$  (liste non exhaustive).

Type d'essai	Elément de pointe	Profil de $S_u$ obtenu	Identification de $S_u$	Laboratoire/ In situ	Modélisation en centrifugeuse	Essais cycliques	Outil
Pénétromètre au cône de surface FCT	cone	pponctuel en surface	facteur $N_{FCT}$ + corrections	oui/non	non	non	
Torvane TVT	multi-pales	ponctuel en surface	directe	oui/oui	non	non	
Pénétromètre de surface HPT ou PPT	cylindre vertical	ponctuel en surface	directe	oui/oui	non	non	
Scissomètre de surface SVST	multi-pales	ponctuel en surface	directe	limité/oui	non	non	
Scissomètre VST	4 pales	en profondeur discontinu	directe	oui/oui	limité	par rotation alternée	
Pénétromètre à bille BPT	sphere	en profondeur continu	facteur $N_{BPT}$ + corrections	limité/limité	limité	oui pénétration/extraction	
T-bar TBT	cylinder	en profondeur continu	factor $N_{TBT}$ + corrections	limité/limité	limité	oui pénétration/extraction	
Essai à la plaque et scissomètre TPLT	multi-pales	en surface (offshore)	directe	limité/limité	limité	non	-
Pénétromètre au cône CPT	cône	en profondeur continu	factor $N_{CPT}$ + corrections	limité/oui	oui	non	
Pressiomètre PMT	aucun	en profondeur discontinu	Corrélations entre $p_t$ et $S_u$ + validation	non/oui	très limité	oui chargement/déchargement	

Parmi les plus utilisés de par leur simplicité de mise en opération, on a le scissomètre VST) qui fournit un profil discret de  $S_u$  alors que le pénétromètre statique (CPT) permet d'obtenir un profil continu des valeurs de  $S_u$  déduites à partir de corrélations. Ces deux essais sont utilisés à la fois en laboratoire et en centrifugeuse (outil miniature) et *in situ*. Le T-Bar, qui se différencie du CPT par la présence d'un cylindre horizontal à la place du cône (figure 1a), complète la panoplie des outils de reconnaissance. Il fait partie des "full flow penetrometers - (FFPT)" parce que le sol lors de la déformation s'écoule

autour de la forme de l'élément de pointe enfoncée dans le sol (ici, cylindre horizontal) lors de la pénétration et ou de l'extraction. Les pénétromètres T-bar (TBT) ont été à l'origine développés pour la caractérisation des sols mous reconstitués en centrifugeuses et pour ingénierie offshore. En raison de la géométrie de l'élément de pointe (cylindre ou sphère, figure 1b d'après LONG & BOYLAN, 2012), les FFPT permettent d'obtenir des mesures lors de la pénétration (P) et en extraction (E) dans le sol remanié, et d'effectuer des cycles P-E (voir figure 1c d'après OROZCO-CALDERON, 2009) à une profondeur donnée. Les principales applications des essais TBT ont concerné des argiles marines (offshore) ou reconstituées (laboratoire) mais pas les sédiments marins, fluviaux ou de barrage (GUPTA, 2013).

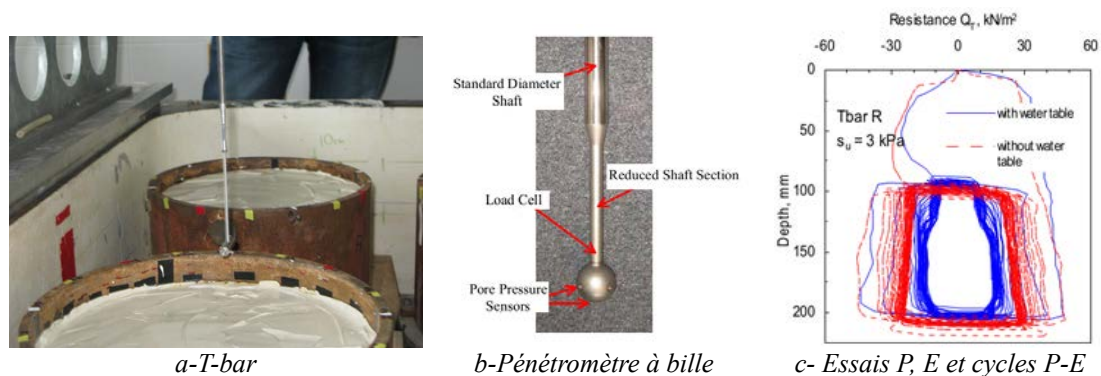


Figure 1. Modèles de pénétromètres à écoulement (FFPT) et mesures typiques.

Ils sont plus adaptés pour mesurer de très faibles résistances au cisaillement non drainé en sols mous (GAUDIN *et al.*, 2008). De la littérature disponible et en comparaison avec les autres pénétromètres, l'essai T-bar présente quelques avantages, (i) une mesure plus précise de la résistance à la pénétration avec comme critère, un écoulement du sol totalement généré autour du cylindre, (ii) les mécanismes de rupture du sol pendant le déplacement du cylindre sont bien connus ce qui a permis de développer des approches théoriques de façon à proposer des facteurs de portance lié au T-bar ( $N_{TBT}$ ) à utiliser dans la pratique et (iii) une utilisation opérationnelle simple et un outil fiable.

Mais l'utilisation du pénétromètre T-bar dans les sols mous et les sédiments pour mesurer la résistance au cisaillement  $S_u$  à de faibles profondeurs pose problème et nécessite la compréhension des mécanismes de rupture développés à différentes profondeurs intermédiaires lors d'un cycle de pénétration-extraction. On peut situer ces profondeurs particulières et les effets engendrés (figure 2) : (i) un effet à la surface où la sonde cylindrique n'est pas complètement enfouie (effet de surface, figure 2b), (ii) après la pénétration de la sonde lorsque l'extraction commence vers le haut (effet d'ancrage), (iii) et quand la sonde lors de l'extraction affleure la surface (effet de soulèvement du sol, figure 2c). La relation proposée pour la détermination de  $S_u$  qui combine l'effort de pénétration mesuré et le facteur de proportionnalité ou de portance  $N_{TBT}$  ne peut pas

s'appliquer à des mécanismes de rupture différents de celui qui correspond à un écoulement du sol développé autour d'un cylindre. En fait cette relation n'est pas valable lorsque la sonde est partiellement enfouie en surface (figure 3b) ou lorsque l'écoulement du sol ne se produit pas complètement autour du cylindre (effet de "traînée" derrière le cylindre selon la grandeur de  $Su$ , de la géométrie et de l'état de surface du T-bar, voir figures 3a et 3c). Par ailleurs, les effets d'échelle doivent être considérés (dimensions de la sonde cylindrique et de la tige verticale de support), comme les vitesses de pénétration (respect d'un comportement drainé ou partiellement) et les conditions aux limites des essais effectués en cellule ou cuve de laboratoire (effet de proximité entre essais, effet de bord et de fond, figures 2c et 3a respectivement). Dans cette note sont décrites certaines de ces conditions limites d'utilisation et de ces influences à travers une série d'essais menés en laboratoire avec un T-bar de diamètres (cylindre horizontal) différents sur des échantillons de kaolin reconstitué ou un sédiment de barrage remanié. Ces essais ont donné lieu à des analyses qui ont fait l'objet de plusieurs rapports d'étude et de recherche (CHERIFI, 2013 ; GUPTA, 2013 ; KIMURA, 2013 ; LEVACHER *et al.*, 2014).

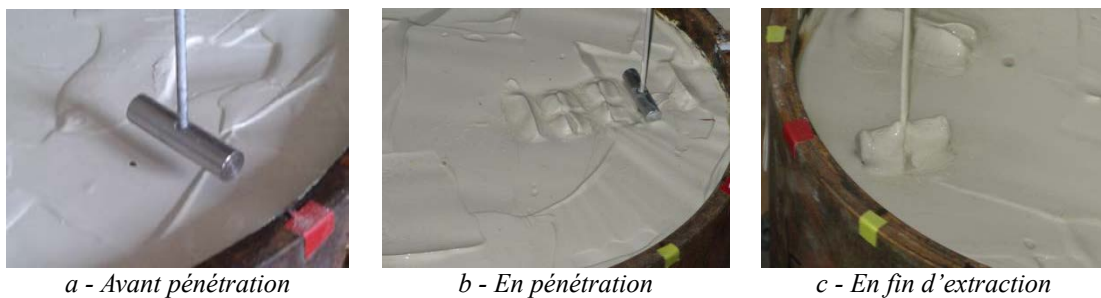


Figure 2. Phases d'essai avec un T-bar lisse à la surface d'un kaolin reconstitué.

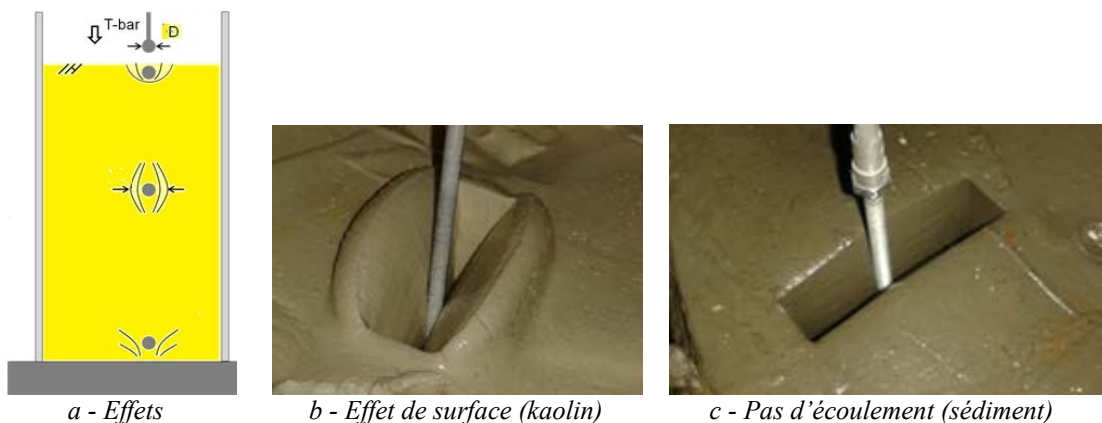


Figure 3. Conditions d'essais en cellule et les effets induits sur l'écoulement du sol.

## 2. L'essai pénétrométrique T-bar

### 2.1 L'appareillage

L'essai T-bar a été initialement développé vers les années 1990 (STEWART & RANDOLPH, 1991 & 1994) pour la modélisation géotechnique en centrifugeuse pour caractériser les couches d'argiles reconstituées. Cet outil permet d'établir des profils continus de résistance au cisaillement non drainée  $S_u$  dans les sols mous. Le T-bar est muni d'un élément cylindrique ou barreau perpendiculaire à l'axe support formant ainsi un T d'où l'appellation de T-bar attribué à ce pénétromètre. Il est doté en général d'un "capteur" inséré en bout ou intégré à la tige verticale pour la mesure de la résistance à la pénétration et à l'extraction : à base de jauges de déformation (T-bar miniature utilisé en centrifugeuse) ou de capteurs d'effort (T-bar de terrain).

Le pénétromètre miniature T-bar de laboratoire utilisé au cours des essais et ses différentes parties sont montrées à la figure 4. Les dimensions sont données dans le tableau 2 pour les différentes tailles de diamètres en respect avec certains ratios issus de la littérature internationale (voir le tableau 3). La vitesse de pénétration retenue pour les essais a été de 2 mm/s afin de se placer en condition non drainée. La détermination de cette vitesse a été faite à partir des travaux de HOUSE *et al.* (2001) qui recommande que l'avancement du pénétromètre soit dans la gamme de 0,2 à 0,5 fois le diamètre par seconde, bien que des essais spécifiques puissent être entrepris à des vitesses différentes afin d'évaluer la dépendance de la vitesse de déformation sur la résistance à la pénétration.



*Figure 4. Pénétrètres T-bar lisses et ses parties constituantes*

*Tableau 2. Dimensions principales des T-bar utilisés*

<i>Diamètre D (mm)</i>	<i>Longueur L (mm)</i>	<i>Diamètre de la tige support d (mm)</i>	<i>L/D</i>
5	20	3	4
7,5	30	3	4
10	40	3	4
12.5	50	3	4
15	60	3	4

## Thème 8 – Gestion et valorisation des sédiments marins

### 2.2 La géométrie du T-bar

Pour des utilisations sur le terrain, les dimensions du cylindre des T-bar sont de 40 mm de diamètre et de 250 mm de longueur, ce sont des dimensions devenues "standard".

Tableau 3. Données sur les pénétromètres T-bar utilisés en laboratoire (L), en modélisation en centrifugeuse (C = niveau d'accélération en g) et in situ (IS), d'après OROZCO-CALDERON (2009) et LEVACHER et al. (2014).

Use domain	Year	Author(s)	D (mm)	L (mm)	L/D	A = DL (cm <sup>2</sup> )	Ratio d/D	Type of soil tested	Test velocity (mm/s)	N <sub>TBT</sub> factor used
L	1991	Stewart & Randolph	7	35	5	2.45	0.9	-	-	10.5
IS	1994	Stewart & Randolph	50	200	4	100	-	Soft clay	≈ velocity CPT	10.5
L	1998	Meymand*	19	95	5	18.05	-	K-bentonite-fly ash	35-71	10.5
L	2005	El Sherbiny et al*	25	100	4	25	-	K	20	10.5
L	2005	Prakasha et al*	10	50	5	5	-	K	-	-
C=50g	2005	Rattley et al*	5	-	-	-	-	K	0.3-100	10.5
C=190g	2005	Stewart*	5	20	4	1	-	K	-	-
L	2005	Clukey et al*	20	125	6.25	25	-	K	-	10.5
L	2005	Lunne et al	20	125	6.25	25	-	Norwegian clay	-	11-13.4
L	2005	Lunne et al	5	20	4	1	-	Australian B clay	-	9.7-10.7
IS	2005	Borel et al*	40	250	6.25	100	-	Guinea gulf marine clay	20	11.5
IS	2005	Lunne et al	40	250	6.25	100	-	Norwegian clay	20	11-13.1
								Australian B clay	20	9.5-11.6
								Australian L clay	20	11.6-14.3
IS	2005	Yafrate et al	-	-	-	100	-	Norwegian clay	20	10.5
								Canadian G clay	20	10.5
								Québec L clay	20	10.5
IS	2006	Yafrate & De Jong*	40	250	6.25	100	-	Australian B clay	-	8.2-12.7
								Canadian G clay	-	6.6-10.1
								Québec L clay	-	5.9-6.4
								Norwegian clay	-	6.8-12.6
IS	2007	Boylan & Long	40	250	6.25	100	-	Peat	20	10.8-13.2
										7.8-13.6
C	2008	Gaudin et al	7.5	30	4	2.25	0.4	K	-	-
			5	20	4	1	0.6	K	3	-
L	2009	Orozco-Calderon	20	100	5	20	-	K 50% + bentonite 50%	2-20	10.5
IS	2011	De Jong et al	40	250	6.25	100	0.89	US A clay	20	-
								Australian B clay		
								Canadian G clay		
								Québec L clay		
								Norwegian clay		
L	2013	Levacher et al	5	20	4	1	0.6	K	2	10.5
			7.5	30	4	2.25	0.4	K	2	10.5
			10	40	4	4	0.3	K	2	10.5
			12.5	50	4	6.25	0.24	K	2	10.5
			15	60	4	9	0.2	K	2	10.5
C=50g	2013	Almeida et al	7	28	4	-	-	K 75% + sand 25%	0.3	7-10.5
			14	56	4	-	-	Brazilian marine	0.2	8-10.5
			21	84	4	-	-	R clay	0.1	

Note : D, T-Bar cylinder diameter ; L, cylinder length ; A, cylinder projected area ; d, vertical rod diameter ; a, rod area; N<sub>TBT</sub>, T-Bar bearing factor ; K, kaolin clay.

\*References are in OROZCO-CALDERON (2009).

Différentes dimensions du cylindre peuvent être utilisées avec un rapport minimum de la longueur  $L$  sur le diamètre  $D$  de 4. Ceci garantit des hypothèses de déformation plane optimale, (YAFRATE *et al.*, 2007). Pour réduire au minimum l'interaction entre la tige support et l'écoulement autour du cylindre, le rapport de la surface projetée ( $L \times D$ ) sur la section du cylindre de la tige doit être supérieure ou égale à 10. Ainsi la tige n'a plus aucune influence sur la mesure de la résistance à la pénétration (YAFRATE *et al.*, 2007). ALMEIDA *et al.* (2013) recommandent pour ce dernier rapport des valeurs de 5 à 10. Un panel de ces caractéristiques géométriques est récapitulé dans le tableau 3. Cependant on connaît peu l'influence des différents paramètres géométriques du T-bar. Un des objectifs des essais a été d'étudier l'effet de paramètres tels que le diamètre, l'état de surface (lisse ou rugueux) ainsi que l'effet de proximité des mesures et l'effet des conditions aux limites dans le cas d'essais en laboratoire (CHERIFI, 2013 ; GUPTA, 2013).

### **3. La détermination de $S_u$ et des facteurs et $N_{TBT}$**

#### **3.1 Résistance au cisaillement non drainé $S_u$**

Comme pour les pénétromètres CPT,  $S_u$  se déduit des mesures de l'effort de pénétration  $F_v$  comme suit :

$$S_u = \frac{F_v}{N_{TBT} D L} \quad (1)$$

où  $D$  et  $L$ , sont le diamètre et la longueur du cylindre respectivement,  $N_{TBT}$  est le facteur du T-bar lorsque la barre est totalement enfouie. L'équation 1 peut être écrite à l'aide de  $qm$ , résistance à la pénétration mesurée, ainsi :

$$S_u = \frac{qm}{N_{TBT}} \quad (2)$$

#### **3.2 Ecoulement du sol pleinement développé : Facteurs $N_{TBT}$ utilisés**

Les facteurs usuels ont été obtenus à partir de la théorie de la plasticité du sol appliquée pour obtenir la limite de chargement sur une conduite tubulaire enfouie sous translation latérale à l'aide de la méthode des caractéristiques (RANDOLPH & HOULSBY, 1984). Les auteurs ont tenu compte de la rugosité du cylindre en introduisant le coefficient  $\alpha$  ( $\alpha=0$  lisse;  $\alpha=1$  rugueux) qui est relié à l'adhérence ( $a$ ) exprimée en fonction de la cohésion  $c$  ( $a=\alpha c$ ). D'après les travaux de Randolph et Houslby (RANDOLPH & HOULSBY, 1984),  $N_{TBT}$  vaut en moyenne 10,5. En général, il varie entre 9,6 pour un état de surface lisse et 12,1 pour un état de surface rugueux.



3.3 Ecoulement du sol partiellement développé en surface: Facteurs  $N_{TBT-dc}$  corrigés

A la surface lors de la pénétration, le mécanisme de rupture complet est uniquement obtenu à partir d'une certaine profondeur d'enfouissement, ceci a été observé à partir d'expériences (OROZCO-CALDERON, 2009). Cette profondeur ou distance critique  $dc$  est fonction du diamètre du cylindre ( $D$ ) et de l'état de consolidation des sols mous ( $Su$ ), voir le tableau 6.

Tableau 6. Valeurs proposes pour  $dc$  et pour les facteurs corrigés  $N_{TBT}$  en surface.

Auteurs	Profondeur $d_c$ (nombre de $D$ )	$N_{TBT}$ pour $d_c = 0$	$N_{TBT}$ pour $d_c$ max.	Profil de $Su$ (kPa)	Rugosité $\alpha$
WHITE et al. (2006)*	4D	4.5	10.5	$0.5 \leq Su \leq 2$	0.45
OLIVEIRA et al. (2010)	6D	5.35	10.5	$Su = 1$	0.5
WHITE et al. (2010)	2D	-	-	Sols très mous	-
	8D	-	-	Sols raides	-

\*(in GAUDIN et al., 2008)

Pour les argiles consolidées,  $Su$  n'est pas nulle à la surface. Les valeurs de  $N_{TBT}$  obtenues à partir de la théorie de plasticité ne sont pas valides. Quelques corrections dérivées de l'analyse de la capacité portante des sols sont proposées par certains auteurs. WHITE et al. (2006, in GAUDIN et al., 2008) suggère la correction suivante obtenue à partir de l'analyse de la capacité portante de canalisations enterrées, utilisée pour une profondeur  $dc$  de  $4D$  :

$$N_{TBT-dc} = 4.5 + (10.5 - 4.5) \left( \frac{dc}{4D} \right)^{0.7} \quad (3)$$

et détermine la résistance au cisaillement  $Su$  comme suit :

$$Su = \frac{F_v}{N_{TBT-dc} (D / D^*)} \quad (4)$$

où  $D^*$  est la largeur du diamètre enfoui pour la profondeur considérée. Pour un enfouissement peu profond, OLIVEIRA et al. (2010) ont proposé pour  $0 \leq dc \leq 6$ , une rugosité moyenne ( $\alpha=0,5$ ) et un profil homogène de  $Su$  supposé  $Su=1$  kPa, la relation polynomiale en fonction de  $dc/D=\beta$  comme suit :

$$N_{TBT-dc} = 0.0053\beta^6 - 0.1102\beta^5 + 0.9079\beta^4 - 3.7002\beta^3 + 7.2509\beta^2 - 3.9168\beta + 5.3519 \quad (5)$$

Les auteurs ont également proposé des relations similaires pour différents profils de  $Su$  et coefficients de rugosité. On remarque que pour  $dc=0$ , un facteur de capacité portante selon Terzaghi de  $(\pi+2)$  ou 5.14 est proposé pour les fondations superficielles implantées sur un sol en conditions non drainées.



#### 4. Conclusions et développements

L'identification des problèmes et des difficultés d'utilisation de l'essai T-bar en laboratoire ont été répertoriés. Quelques expériences ont été réalisées, mais beaucoup d'entre elles sont en cours. Tous les résultats attendus devraient conduire à définir les conditions d'utilisation du T-bar en couches peu épaisses, les procédures d'essai et d'interprétation pour les sols mous et les sédiments.

#### 5. Références bibliographiques

- ALMEIDA M.S.S., OLIVEIRA J.R.M.S., RAMMAH K.I., TREJO P.C. (2013). *Investigation of bearing capacity factor of T-bar penetrometer at shallow depths in clayey soils*. Journal of Geo-Engineering Sciences, Vol. 1, pp 1-12. <http://dx.doi.org/10.3233/JGS-13005>
- CHERIFI E. (2013). *T-bar laboratory testing on a reconstituted clay / Essais au T-bar sur argile reconstituée en laboratoire*. Master report, Caen University – IFSTTAR, 65 p.
- GAUDIN C., THOREL L., RAULT G., GARNIER J., CHENAF N. (2008). *Un aperçu de l'utilisation du T-bar miniature en centrifugeuse*. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur JNGG'2008, Nantes, pp 515-522.
- GUPTA R. (2013). *Undrained shear strength on soft soils: use of t-bar test and vane shear test and comparative studies*. Bachelor of Civil Engineering report, Caen University – IFSTTAR and Hamirpur (India) National Institute of Technology, 54 p.
- HOLTZ R.D., KOVACS W.D. (1981). *Introduction to geotechnical engineering*. Prentice-Hall editors, 733 p.
- HOUSE A.R., OLIVEIRA J.R.M., RANDOLPH M.F. (2001). *Evaluating the coefficient of consolidation using penetration tests*. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, Vol. 1(3), pp 17-26.
- KIMURA F. (2013) *T-bar use conditions in thin soft soils layer: Soil flow visualization and Su measurements in kaolin clay cells*. Kyoto University Graduate School of Global Environmental Studies, Master report, Caen University – IFSTTAR and Kyoto University report, 31 p.
- LEVACHER D., RAZAKAMANANTSOA A., KIMURA F., KATSUMI T. (2014). *Use of sedi-bar test for the characterization of soft soils and sediments*. Geo-Environmental Engineering 2014, Sapporo, Japan, May 30 – 31, 2014, *in press*.
- LONG M., BOYLAN N. (2012). *In-Situ Testing of Peat a Review and Update on Recent Developments*. Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA, Vol. 43, pp 41-55.
- OLIVEIRA J.M.R.S., ALMEIDA M.S.S., ALMEIDA M.C.F., BORGES R.G. (2010). *Physical modelling of lateral clay pipe interaction*. Journal of Geotechnical and

## Thème 8 – Gestion et valorisation des sédiments marins

- Geoenvironmental Engineering, Vol. 136, pp 950-956. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000311](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000311)
- OROZCO-CALDERON M. (2009). *Etude de l'interaction cyclique sol-pipe dans les grands fonds marins*. Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 490 p.
- OROZCO-CALDERON M., FORAY P., PUECH A., HALL S. (2010). *Essais au mini-T-bar à faible pénétration*. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, JNGG'2010, Grenoble, pp 135-142.
- RANDOLPH M.F., HOULSBY G.T. (1984). *The limiting pressure on a circular pile loaded laterally in a cohesive soil*. Geotechnique, London, England, Vol. 34(4), pp 613-623. <http://dx.doi.org/10.1680/geot.1984.34.4.613>
- STEWART D.P., RANDOLPH M.F. (1991). *A new site investigation tool for the centrifuge*. Proc. of the International Conference Centrifuge, Vol. 91, Balkema publishers, pp 531-533.
- STEWART D.P., RANDOLPH M.F. (1994). *T-bar penetration testing in soft clay*. Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 120, pp 2230-2235. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1994\)120:12\(2230\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1994)120:12(2230))
- WHITE D.J., GAUDIN C., BOYLAN N., ZHOU H. (2010). *Interpretation of T-bar penetrometer tests at shallow embedment and in very soft soils*. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 47, pp 218-228. <http://dx.doi.org/10.1139/T09-096>
- YAFRATE N.J., DE JONG J.T., DE GROOT D.J. (2007). *The influence of full-flow penetrometer area ratio on penetration resistance and undrained and remoulded shear strength*. Offshore Site Investigation and Geotechnics, Confronting New Challenges and Sharing Knowledge, London, pp 461-468.