

APPLICATION DES ESSAIS AU DILATOMÈTRE MARCHETTI EN SITES MARITIME ET FLUVIAL EN POLOGNE

APPLICATION OF DMT TESTS IN MARITIME AND FLUVIAL SITES IN POLAND

Lech BAŁACHOWSKI

Université de Technologie de Gdansk, Pologne

RÉSUMÉ – Cette communication présente une caractérisation géotechnique des sables dans la zone côtière et pour des digues de protections dans le delta de la Vistule réalisées avec le dilatomètre Marchetti. Cette technique a été utilisée pour le contrôle du compactage des sables déposés hydrauliquement, ainsi que du compactage profond par la vibroflotation. Estimation du module de déformation des sols, de la résistance, de l'état des contraintes et du taux de surconsolidation.

ABSTRACT – This paper presents geotechnical investigation concerning sands in coastal zone and flood embankments in the delta of Vistula performed with dilatometer (DMT). This technique has been used for the control of hydraulically placed sand fills and deep soil vibratory compaction. It allows an evaluation of deformation modulus, soil resistance, stress state and overconsolidation ratio.

1. Introduction

La reconnaissance des sols *in situ* devient le moyen le plus courant, précis et économique pour l'estimation des paramètres du sol dans l'état naturel *in situ*. Les essais de pénétration statique au piezocône (CPTU), les essais au dilatomètre de Marchetti (DMT) et les essais au pressiometre Ménard sont les plus avantageux pour les études des paramètres du sol et la vérification des travaux de compactage (Schmertmann et al., 1986; Gambin, 1995; Marchetti et al., 2001; Massarsch et Feltenius, 2002). Les essais CPTU et à moindre échelle le DMT deviennent de plus en plus utilisés en Pologne. L'essai au pressiometre Ménard, où on peut déterminer à la fois la résistance et les caractéristiques de la déformation du sol, reste moins employé. L'application en parallèle de deux types d'essais (CPTU et DMT) permet une évaluation de la résistance de sol et une estimation des modules aux différents niveaux de déformation dans le sol. L'avantage de l'essai avec le dilatomètre Marchetti est une possibilité de la détermination du module de déformation en conditions oedométriques pour le niveau de déformation typique des fondations, $\epsilon \approx 0.05 \div 0.1\%$ (Marchetti et al. 1999). L'estimation de la cohésion non-drainée ou de l'angle de frottement du sol par des corrélations sont aussi possibles. Quelques applications de l'essais DMT en sites maritime et fluvial en Pologne sont décrites dans le présent article.

2. Description de l'essai au dilatomètre

L'essai DMT est réalisé selon les recommandations de Marchetti et al. 2001 et la norme européenne EC-7. Une tige avec une lame de dilatomètre est enfoncée dans le sol avec une vitesse de 2 cm/s. Les mesures de deux pressions du gaz (ici de

l'azote) *A* et *B* à un certain niveau de la dilatation de la membrane sont prises tous les 20 cm. Les deux pressions p_0 et p_1 , corrigées pour tenir compte de la calibration de la membrane en l'air, sont calculées et les trois paramètres intermédiaires (Marchetti, 1980) sont définis:

- l'indice du matériau

$$I_D = \frac{p_1 - p_0}{p_0 - u_0} \quad (1)$$

- l'indice de la contrainte latérale

$$K_D = \frac{p_0 - u_0}{\sigma'_{v0}} \quad (2)$$

- le module au dilatomètre Marchetti

$$E_{DMT} = 34.7(p_1 - p_0) \quad (3)$$

où:

p_0, p_1 – les pressions du gaz *A, B* corrigées,

u_0 – la pression hydrostatique de l'eau,

σ'_{v0} – la contrainte verticale effective.

Le module de déformation en conditions oedométriques est calculé par (Marchetti, 1980) :

$$M_{DMT} = R_M E_{DMT} \quad (4)$$

où:

R_M – le coefficient empirique fonction des indices I_D et K_D

Le module M_{DMT} , établi pour le niveau de déformations $\varepsilon \approx 0.05 \div 0.1\%$, est très sensible aux effets de la surconsolidation et de l'augmentation de la contrainte horizontale dans le sou-sol. Dans une série des essais triaxiaux consolidé drainée (Figure 1) Yamashita et al. 2000 démontre que l'influence de la surconsolidation sur le module de déformation du sable est la plus forte pour les déformations axiales voisines à 0.1%. Ceci confirme la sensibilité du module M_{DMT} à la contrainte latérale dans le sol et les avantages de l'applications de l'essais DMT à l'acceptation des travaux de compactage.

Il faut mentionner (Marchetti et al., 2001) que l'indice K_D peut être considéré comme le coefficient de poussées des terres amplifié par la pénétration de la lame de dilatomètre. L'indice K_D est une mesure qui tient compte du coefficient de poussées des terres, de la surconsolidation, de la densité du sol et de son histoire géologique et donc de la mise en place de la sonde. La valeur de l'indice K_D proche de 2 trouvée dans les argiles signifie que le sol est normalement consolidé. Une vérification du profil de K_D dans des talus ou des digues de protections permet d'indiquer soit des zones affaiblies par des glissements des terrains actifs ou anciens (Marchetti et al., 2001) soit des zones peu compactées ou dégradées par une érosion interne dans la digue.

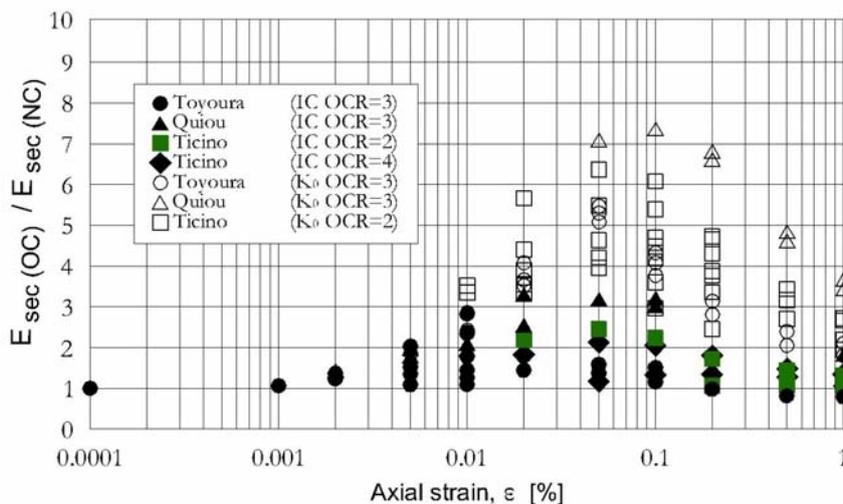


Figure 1. L'effet de la surconsolidation sur le module de déformation des sables (Yamashita et al., 2000).

3. Des applications de l'essai au dilatomètre

3.1 Sables déposés hydrauliquement

Certaines plages de la Baltique sont alimentées artificiellement avec du sable pour protéger la côte de l'érosion dans des zones sensibles. Un exemple des résultats de l'essai DMT réalisé dans une couche du sable récemment déposée est présenté sur la Figure 2. Des valeurs élevées de modules et de l'indice K_D indiquent une densité forte du dépôt, ce qui est confirmé par des essais CPTU effectués en parallèle (Balachowski, 2006).

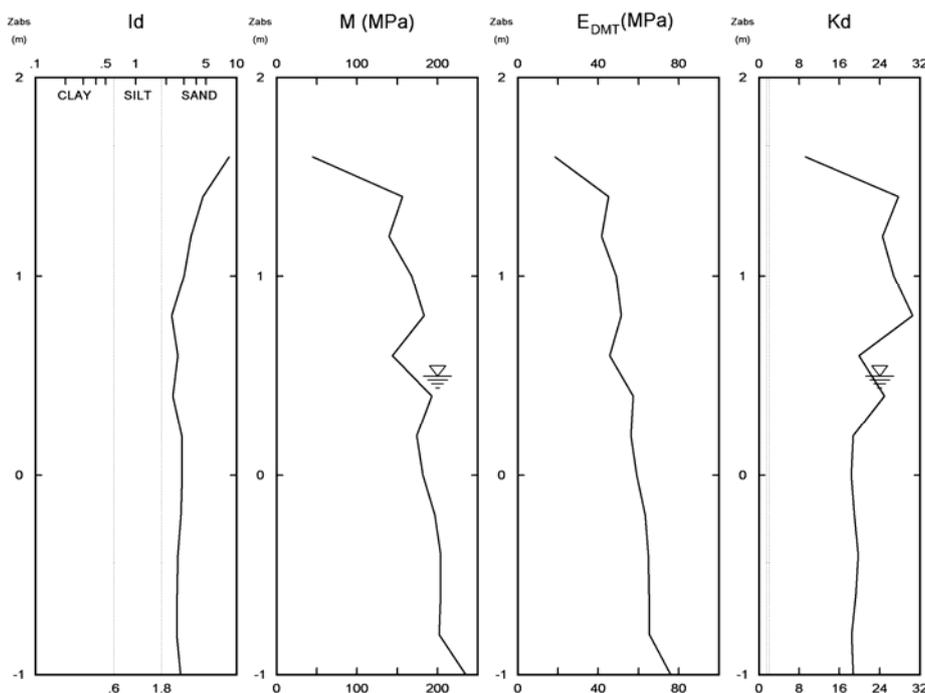


Figure 2. Caractéristiques d'un essai DMT sur la plage.

Un exemple des résultats obtenus dans le Port de Gdynia, où le sable a été déposé hydrauliquement il y a 80 ans, est présenté sur la Figure 3. Du sable lâche à moyennement dense est trouvé dans le cas de la déposition sous l'eau. La partie superficielle déposée au-dessus de niveau de l'eau est plus compacte et surconsolidée. La densité du sable est confirmée par les essais de CPTU effectués en parallèle, Bałachowski et Kozak 2006. Le niveau de la nappe phréatique indiqué sur la Figure 3 est mesuré au cours des essais DMT et il reste variable en fonction du niveau de la mer. Une augmentation sensible de niveau moyen de la mer est observée au cours du siècle dernier dans les stations situées sur la côte sud de la Baltique.

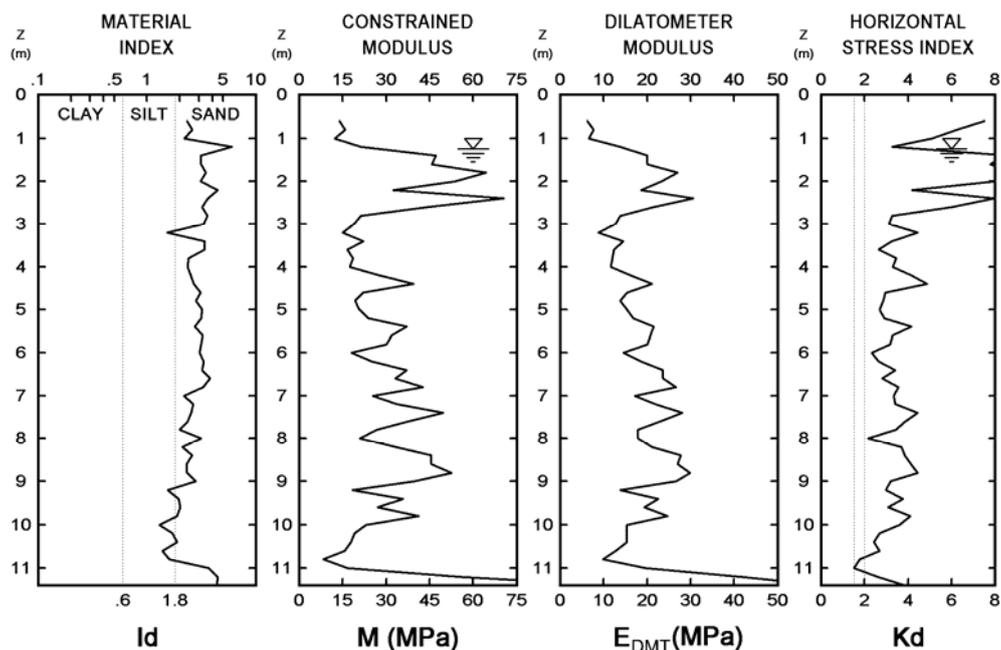


Figure 3. Caractéristiques d'un essai DMT dans le Port de Gdynia.

3.2 Vérification des travaux de compactage par vibroflotation

Les essais CPTU et DMT ont été utilisés comme des outils de contrôle des travaux de compactage profond réalisés par la méthode de vibroflotation dans le Port de Gdynia (Bałachowski et Kozak, 2006). Les essais sont effectués au moins trois semaines après la fin des travaux. Une couche de sol de 7 m est améliorée (Figure 4). Une forte augmentation de l'indice K_D et des modules E_{DMT} et M_{DMT} est observée. La valeur M_{DMT} est bien supérieure au critère de l'acceptation de compactage, fixé au module de compression oedométrique égal 80 MPa. Les bénéfices du traitement sont mis en évidence par une utilisation de l'essais DMT très sensible à la surconsolidation et une augmentation de la contrainte horizontale (voir sur la Figure 4 la valeur K_D).

Les valeurs du coefficient de poussée des terres K dans le sol avant et après amélioration sont estimées (Figure 5) à partir de la corrélation proposée par Baldi et al. (1986) pour les "vieux" gisements de sable :

$$K = 0.376 + 0.095K_D - 0.0046q_c / \sigma'_{v0} \quad (5)$$

où:

σ'_{v0} – la contrainte verticale effective en kPa,

K_D – l'indice de la contrainte latérale.

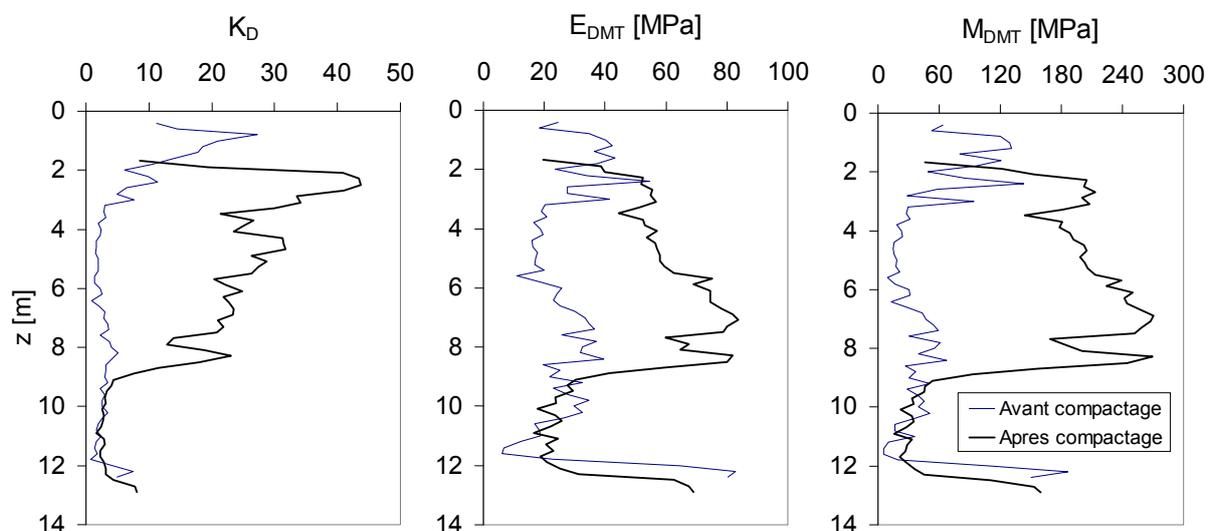


Figure 4. Comparaison des résultats DMT avant et après le compactage (Bałachowski et Kozak, 2006).

Le taux de la surconsolidation OCR (Figure 5) est calculé par la relation suivante (Mayne, 2001):

$$OCR = \left[\frac{1.33 q_t^{0.22}}{K_{0NC} (\sigma'_{v0})^{0.31}} \right]^{1/(\alpha-0.27)} \quad (6)$$

avec

q_t – la résistance au cône corrigée égale à q_c dans des sables en MPa.

Le coefficient de poussée des terres au repos pour le sable normalement consolidé K_{0NC} est déterminé par:

$$K_{0NC} = 1 - \sin \phi' \quad (7)$$

$$\alpha = \sin \phi' \quad (8)$$

L'angle de frottement ϕ' est déterminé soit par une corrélation établie sur CPTU (Kulhavy et Mayne, 1990):

$$\phi' = 17.6^\circ + 11.0 \log(q_{c1}) \quad (9)$$

La résistance de pointe normalisée q_{c1} est définie par:

$$q_{c1} = \frac{q_c}{\left(\frac{\sigma'_{vo}}{\sigma_{atm}} \right)^{0.5}} \quad (10)$$

avec $\sigma_{atm} = 98.1 \text{ kPa}$

soit par une proposition de Marchetti (1980) :

$$\phi'_{safe} = 28 + 14,6 \cdot \log K_D - 2,1 \cdot \log^2 K_D \quad (11)$$

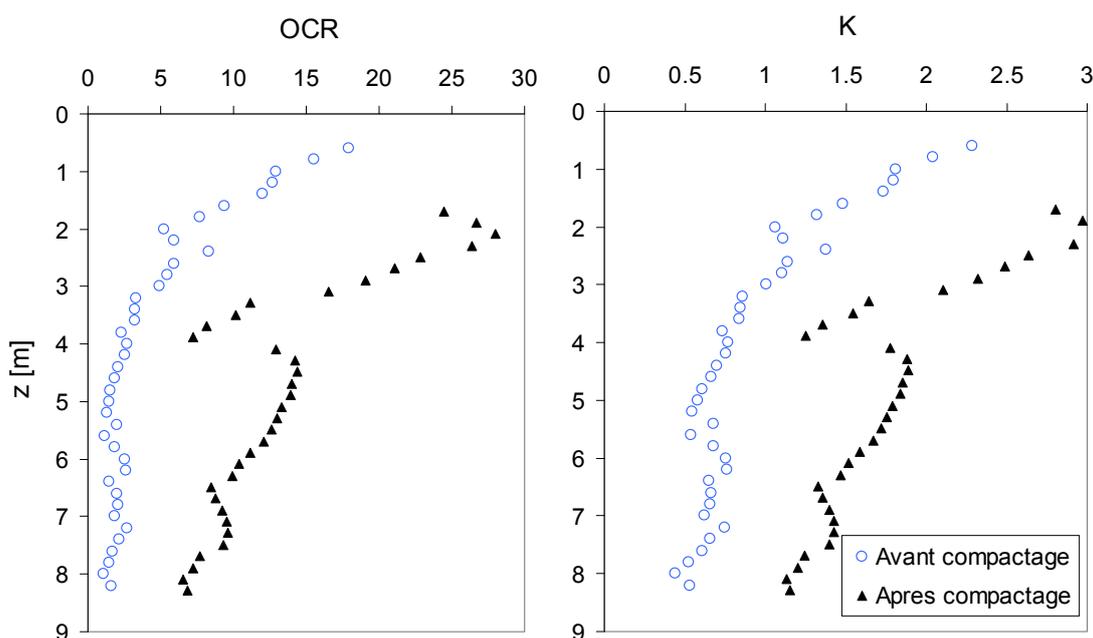


Figure 5. Comparaison du taux de surconsolidation et des coefficients de poussée des terres dans le sable à partir de DMT avant et après compactage.

L'angle de frottement interne estimé *in situ* avec la formule (11) peut augmenter de 10 degrés après compactage du sable (Figure 6). Cette augmentation est liée à l'augmentation de la densité, à la modification de la structure du sol, à l'incrément de contrainte horizontale dans le sol et à la surconsolidation. Ces effets sont impossible à reproduire ensemble au laboratoire. De plus, un profil continu des caractéristiques du sol est obtenu dans les sondages CPTU ou DMT. Dans le cas où ces deux essais in-situ sont réalisés en parallèle le rapport M_{DMT}/q_c élevé - supérieur à 12 (Marchetti et al., 2001) - indique que le sable est compacté. Il semble que le module M_{DMT} est plus sensible aux effets du compactage que la résistance au cône (Schmertmann et al., 1986; Slocombe et al., 2000; Monaco et al., 2006).

3.3 Rénovation de digues de protection

L'application des essais CPTU et DMT pour la reconnaissance de digues présente des nombreuses avantages liées à la détermination des zones peu compactes ou

soumises à l'érosion interne et à l'estimation des caractéristiques de la déformabilité et de la résistance non-drainée. Un essai de la dissipation de la surpression interstitielle mobilisée pendant le fonçage donne des informations supplémentaires sur la perméabilité du matériau. Un exemple de résultats de l'essai DMT dans le corps de la digue de protection dans le delta de la Vistule est présenté (Figure 7), où des zones de faibles caractéristiques avec $K_D \approx 2$ sont clairement mises en évidence à la profondeur de 4 m et de 6 m.

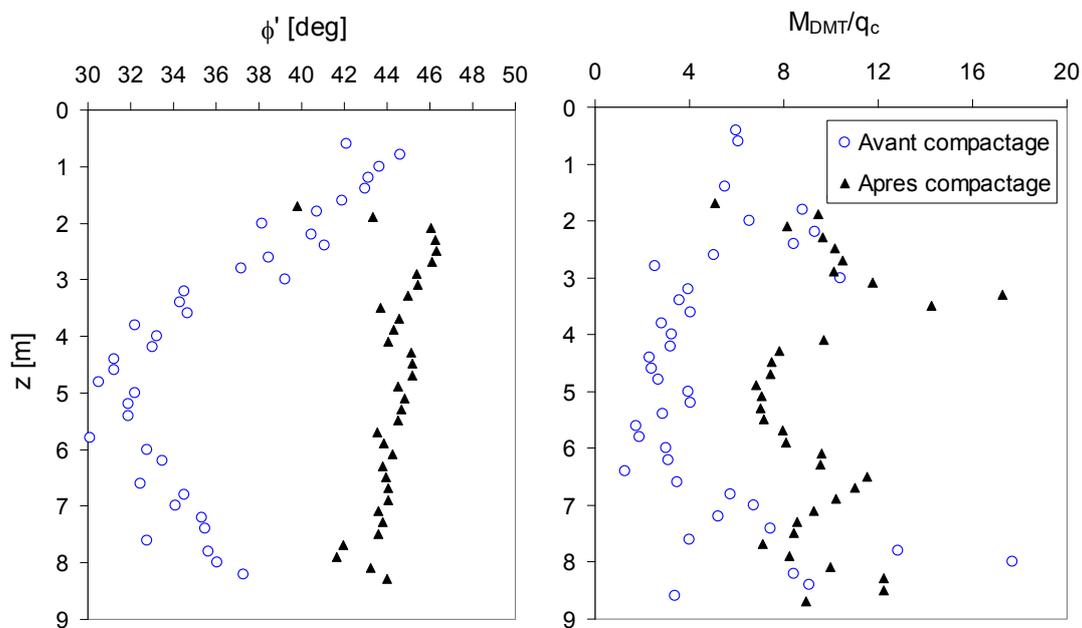


Figure 6. Comparaison de l'angle du frottement des sables déduit à partir du DMT et du rapport M_{DMT}/q_c avant et après vibroflotation.

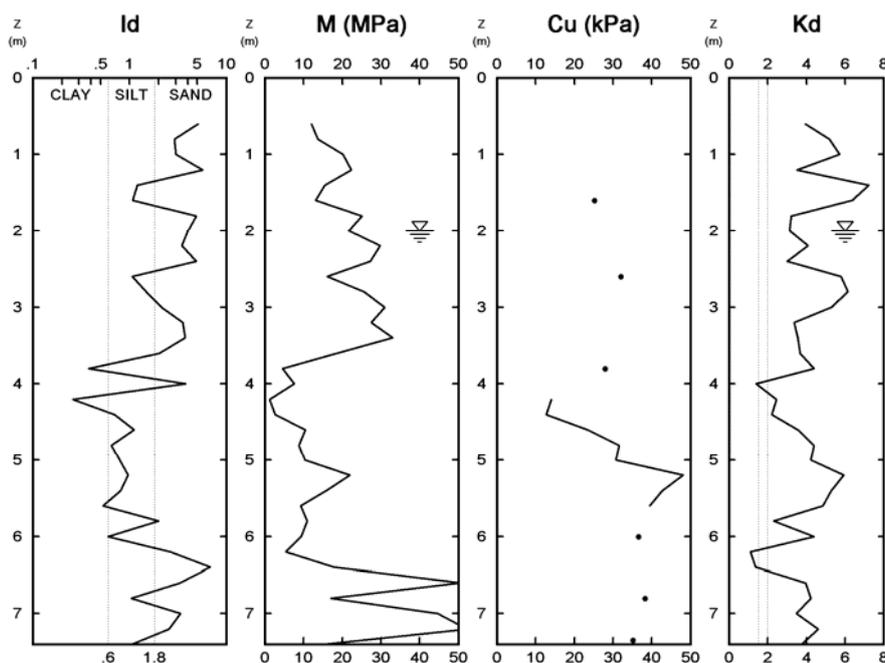


Figure 7. Les caractéristiques DMT du corps de la digue.

4. Conclusions

L'application de l'essai au dilatomètre Marchetti en site maritime ou fluvial présente de nombreux avantages concernant une estimation *in situ* de paramètres mécaniques du sol et surtout le module de déformation sous conditions oedométriques. Par sa sensibilité à la contrainte latérale le DMT permet une bonne estimation des bénéfices des travaux d'amélioration du sol et de déterminer les zones moins compactes ou affaiblies par des glissements de terrain. Les derniers éléments sont importants dans les analyses de la stabilité de digues et pour des projets de renforcement.

5. Références bibliographiques

- Baldi G., Bellotti R., Ghionna V., Jamiolkowski M., Marchetti S. et Pasqualini, E. (1986) Flat dilatometer tests in calibration chambers. Proc. In Situ'86, GT Div., ASCE, Blacksburg, VA, 431-446.
- Bałachowski L. (2006) Seashore sand parameters with DMT and CPTU tests. Proc. 2nd International Conference on DMT, Washington 2-5 April, 342-347.
- Bałachowski L., Kozak P. (2006) Compaction control at Gdynia Port with DMT and CPTU. Proc. Int. Symposium on vibratory pile driving and deep soil vibratory compaction, Paris, pp.121-129.
- Gambin M. (1995) Le pressiomètre Ménard, un excellent outils de contrôle d'amélioration des sols. Proc. Première Journée Louis Ménard, CMFS, Paris.
- Kulhavy F.H., Mayne P.W. (1990) Manual on estimating soil properties for foundation design. Report EL-6800. Electric Power Research Institut, Palo Alto, 250 pp.
- Marchetti S. (1980) In situ tests by flat dilatometer, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.106, No. GT3, 299-321.
- Marchetti S., Monaco P., Totani G. and Calabrese M. (2001) The flat dilatometer test (DMT) in soil investigations. A report by the ISSMGE Committee TC16. Proc. In-situ 2001, Bali, May 21, 41 pages.
- Massarsch K.R. and Fellenius B.H. (2002) Vibratory compaction of coarse-grained soils. Can. Geotech. J., 39, 695-709.
- Mayne P.W. (2001) Stress-strain-strength-flow parameters from enhanced in-situ tests. Proc. In-situ 2001, Bali, May 21, 27-48.
- Monaco P., Totani G. and Calabrese M. (2006) DMT- predicted vs observed settlements: a review of the available experience. 2nd International Conference on DMT, Washington 2-5 April, 244-252.
- Schmertmann J., Baker W., Gupta R., Kessler K. (1986) CPT/DMT QC of ground modification at a power plant. Proc. In Situ '86 GT Div., ASCE, June 23-25, Blacksburg, VA, 985-1001.
- Slocombe B.C., Bell A.L. and Baez J.I. (2000) The densification of granular soils using vibro methods. Géotechnique 50 (6), 715-725.
- Yamashita S., Jamiolkowski M. and Lo Presti D.C.F. (2000) Stiffness nonlinearity of three sands, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 126(10), 929-938.