

DETERMINATION DE MODULES DE DEFORMATION AU COURS D'ESSAIS CLT – APPLICATION AU CALCUL DE TASSEMENT DES FONDATIONS

DETERMINATION OF DEFORMATION MODULUS DURING CLT TESTS – APPLICATION TO SETTLEMENT CALCULATION OF FOUNDATIONS

Alexandre TEYSSIER¹, Philippe REIFFSTECK², Michel RISPAL¹, Catherine JACQUARD¹

¹ Fondasol, Avignon, France

² IFSTTAR, Marne-la-Vallée, France

RÉSUMÉ – L'application d'un chargement par paliers successifs au cours d'un essai de pénétration statique au piézocône, appelé Cone Loading Test (CLT), permet de construire la courbe de chargement / déchargement vertical du sol, impossible à obtenir avec d'autres techniques d'investigations in situ. Elle permet par la suite d'obtenir une estimation de modules de déformation sous la pointe, paramètre clé dans le dimensionnement d'ouvrages tels que les fondations. Dans cet article seront présentées, sur la base d'essais réalisés sur des remblais sableux, des estimations de modules obtenus par essais CLT comparés aux modules obtenus au moyen du pressiomètre Ménard, avec une application comparative sur des calculs de fondations.

ABSTRACT – The application of a loading by successive steps during a static penetration cone test, called Cone Loading Test (CLT), allows drafting the vertical load / unload curve of the soil, which is impossible to reach with other in situ investigation techniques. It permits to obtain an estimation of deformation modulus under the cone, which is a key parameter in structure design such as foundations. In this paper will be detailed, based on tests done on sandy embankments, modulus estimations by CLT tests compared to modulus obtained with Menard pressuremeter tests. A comparative application on foundation calculations will be presented.

1. Introduction

Les méthodes d'investigations traditionnelles permettent d'accéder à un grand nombre de paramètres caractérisant les sols. Ces méthodes, référencées dans les normes et les procédures de calculs en vigueur, permettent de construire le modèle géotechnique des sols, élément essentiel au géotechnicien pour le dimensionnement et la conception des ouvrages. Le calcul du tassement des ouvrages et en particulier des fondations nécessite d'accéder à un paramètre de déformabilité des sols. Dans la pratique française, ce paramètre est dérivé de la courbe d'essai pressiométrique et à l'international, il est souvent obtenu par corrélation.

L'essai de pénétration statique au piézocône (CPTu) est un essai utilisé internationalement (NF EN ISO 22476-1 / NF P94-521-1). Il est largement documenté et reconnu comme étant une méthode fiable de détermination de caractéristiques mécaniques des sols. Cet essai est majoritairement réalisé dans les sols fins et dans les sols granulaires dont la dimension maximale n'excède pas 20 mm. Il permet la détermination de la résistance de pointe statique (q_c), du frottement latéral unitaire (f_s), de la pression interstitielle (u_2). Cet essai donne accès à la résistance des sols, à une estimation de leur potentiel de liquéfaction, et à une estimation de leur perméabilité. Par l'indice de comportement des sols proposé par Banerjee et Jefferies et Robertson, il est même possible d'accéder à leur nature lithologique alors qu'il s'agit d'un essai aveugle.

Le paramètre qui fait défaut à cette méthode, de même que pour toutes les autres méthodes pénétrométriques, est le paramètre de déformabilité des sols. C'est dans cet objectif qu'a été développé l'essai de chargement d'une pointe pénétrométrique (CLT) (Arbaoui, 2006 ; Ali, 2010), un essai hybride combinant le fonçage classique au pénétromètre à un chargement incrémental de la pointe dans le but d'obtenir des paramètres de résistance et des paramètres de déformabilité.

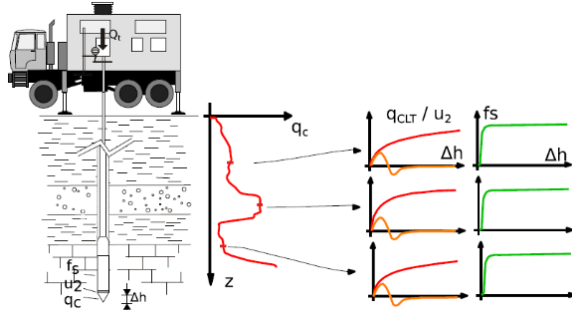


Figure 1 : Principe de l'essai CLT (Reiffsteck, 2017)

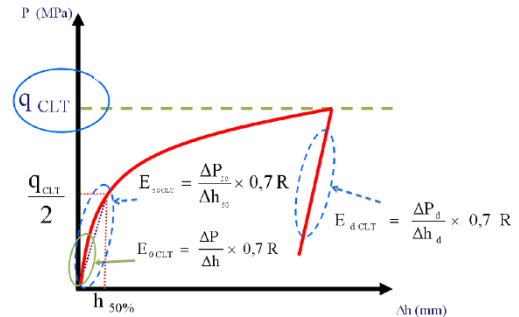


Figure 2 : Détermination des modules de déformation E_{0CLT} , E_{50CLT} et E_{dCLT} d'après la courbe pression/déformation (Ali,

L'essai consiste à interrompre la pénétration classique à une profondeur choisie, puis à réaliser un chargement par paliers successifs de la pointe jusqu'à la rupture du sol (Fig. 1). Une fois la rupture atteinte, un déchargement par paliers successifs est réalisé permettant de construire une courbe de chargement/déchargement reliant les pressions appliquées aux déformations engendrées sous la pointe (Fig. 2).

La contrainte maximale atteinte à la rupture lors de l'essai de chargement est la résistance limite de pointe notée q_{CLT} (Fig. 2). Elle se modélise graphiquement par l'atteinte d'une asymptote horizontale. Cette contrainte est généralement plus petite que la résistance à la pénétration classique (q_c) car obtenue à une vitesse plus faible.

Le frottement latéral unitaire limite sur le manchon est noté f_{sCLT} .

A partir de la courbe $P(\Delta h)$, trois modules sont calculés :

- E_{0CLT} : le module tangent initial, calculé à partir de la pente de la première partie linéaire de la courbe de chargement.
- E_{50CLT} : le module à 50% du chargement, calculé à partir de P_{50} égale à la moitié de la résistance de pointe (q_{CLT}) et à partir de h_{50} la déformation associée.
- E_{dCLT} : le module de déchargement, calculé à partir de la pente de la courbe lors du déchargement.

Chaque module est pondéré par un coefficient $0,7R$, avec R le rayon de la pointe et $0,7$ un coefficient prenant en compte l'encastrement de la pointe (Ali, 2010), sa forme ainsi que le remaniement du sol.

Une première application qui a été faite de cet essai est la détermination du tassement d'un pieu sous un chargement vertical se basant sur la transformation des courbes de résistance de pointe et de frottement latéral pour obtenir une courbe prédictive de tassement en fonction du chargement (Reiffsteck, 2018). Dans cet article, après une présentation du matériel utilisé, l'étude portera sur la comparaison entre les modules calculés à partir de la courbe de chargement/déchargement et les modules obtenus par des méthodes d'investigations traditionnelles (pressiométriques). L'impact des conditions de drainage sera caractérisé en milieu sableux ainsi que l'impact du raccourcissement élastique des tiges. Enfin une discussion sera menée sur les conditions d'utilisation de cet essai, notamment les limites de celui-ci et un exemple de calcul comparatif de tassement sous fondation superficielle sera réalisé entre module pressiométrique et module CLT.

2. Le Cone Loading Test

2.1. Le pénétromètre CPT

L'essai est réalisé à l'aide d'un pénétromètre lourd (Fig. 3a) fonçant une pointe conique dans le sol à une vitesse constante de 2 cm/s. La poussée peut atteindre 200 kN.

La pointe pénétrométrique (Fig. 3b), conforme à la norme NF EN ISO 22476-1, est de section 10 cm². Elle permet les mesures simultanées et de manière indépendante de la résistance de pointe q_c , du frottement latéral unitaire f_s , de la pression interstitielle u_2 et de l'inclinaison. Les mesures de la pointe sont récupérées à l'aide d'un câble situé à l'intérieur des tubes de poussée sur un système d'acquisition placé dans le camion CPT qui les synchronise en temps réel avec celles du capteur de mesure de la profondeur.

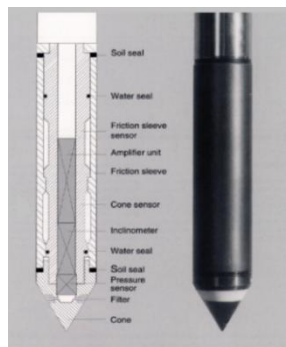


Figure 3 : Le pénétromètre statique (a) et la pointe piézocône (b)

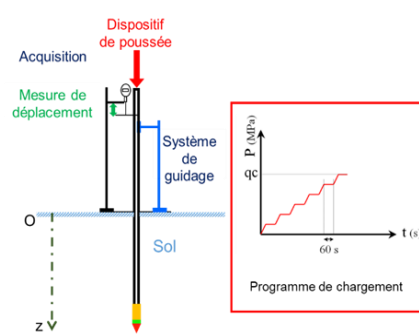


Figure 4 : Représentation schématique de l'instrumentation d'un essai CLT (d'après Arbaoui, 2006)

2.2. Le système de chargement de l'essai CLT

Le dispositif de poussée est mis en place après arrêt de la pénétration statique à la cote d'essai désirée. Il consiste en un vérin additionnel placé entre le train de tiges et la tête de poussée du pénétromètre. Ce vérin alimenté via un limiteur de pression par une centrale hydraulique permet d'appliquer une poussée contrôlée sur le train de tiges indépendamment de l'évolution de la force de réaction du sol.

2.3. Instrumentations et mesures

Au démarrage d'un essai CLT, un essai de dissipation est lancé sur le système d'acquisition du pénétromètre. L'acquisition de q_c , f_s et u_2 est alors réalisée de manière continue en fonction du temps. En parallèle, le dispositif de chargement en surface permet la mesure de la pression dans le vérin de poussée et donc de la force totale de poussée sur le train de tiges correspondant à la consigne de q_c attendue ainsi que le déplacement de la tête du train de tiges. Le principe est donné en Fig. 4.

Après application d'un facteur correctif dû à la compression des tiges, la combinaison de ces deux systèmes de mesures permettra de déterminer le déplacement réel de la pointe conique en fond de forage.

2.4. Pistes d'amélioration du matériel

La valeur de correction de la déformation des tiges peut être dans des terrains très frottants ou alors très collants beaucoup plus importante que le déplacement lié à la réaction du sol.

L'utilisation de cônes pénétrométriques utilisant des technologies de transmission sans fil pourrait en libérant l'espace à l'intérieur des tiges permettre de mesurer directement le déplacement réel du cône en fond de forage.

3. Campagne expérimentale

La définition du domaine d'application et de la validité de l'essai CLT nécessite la réalisation de campagnes croisées avec des méthodes d'investigations traditionnelles (PMT, CPT, laboratoire).

Dans le cadre de cet article, nous avons utilisé les résultats d'essais menés sur le site de Sète composé de remblais sableux (Fig. 5).



Figure 5 : Localisation du site de Sète (Google Earth) et implantation des investigations in situ réalisées

3.1. Description du site et investigations in situ réalisées

Le site de Sète est un terrain gagné sur la mer en 2005. Il est sensiblement plat et horizontal, composé de remblais sableux sur les 7 premiers mètres, puis de sables gris marron jusqu'à 14 mètres et enfin d'argiles marneuses.

Une vaste campagne d'essais a été menée sur ce site :

- 3 sondages pressiométriques (PMT) descendus entre 20 et 25 m.
- 27 essais au pénétromètre statique lourd à la pointe électrique (CPT), descendus entre 5 et 12,3 m.
- 11 sondages de reconnaissance géologique à la pelle mécanique (PM) descendus entre 2,6 et 2,9 m.
- 1 profil sismique MASW d'une longueur de 23 m.
- Des identifications GTR en laboratoire.

Ci-après en Fig. 6 un récapitulatif des caractéristiques mesurées au pénétromètre (q_c) et pressiomètre (E_M) du site étudié.

3.2. Essais en laboratoire et perméabilité

Des essais d'identifications et des essais mécaniques ont été menés sur les sites de Sète dont on trouvera un résumé ci-après en Fig. 7 et Tableau 1.

Une estimation de la perméabilité à partir des données granulométriques a été réalisée sur les résultats des matériaux sableux selon les deux formules suivantes:

- Formule de Sherard (1984) Eq. (1), applicable pour $0.01 \text{ mm} \leq d_{10} \leq 5 \text{ mm}$

$$k = C_s \left(\frac{d_{15}}{10} \right)^2 \quad \text{Avec } 0.2 < C_s < 0.6, \quad (1)$$

Cs l'indice de gonflement du sol à l'œdomètre.

- Formule de Justin, Hinds & Craeger (1945) Eq. (2), applicable pour $0.005 \text{ mm} \leq d_{10} \leq 2 \text{ mm}$

$$k = \frac{1}{100} 0,342 \cdot d_{20}^{2.294} \quad (2)$$

Les valeurs de perméabilité estimées sont données dans le Tableau 2.

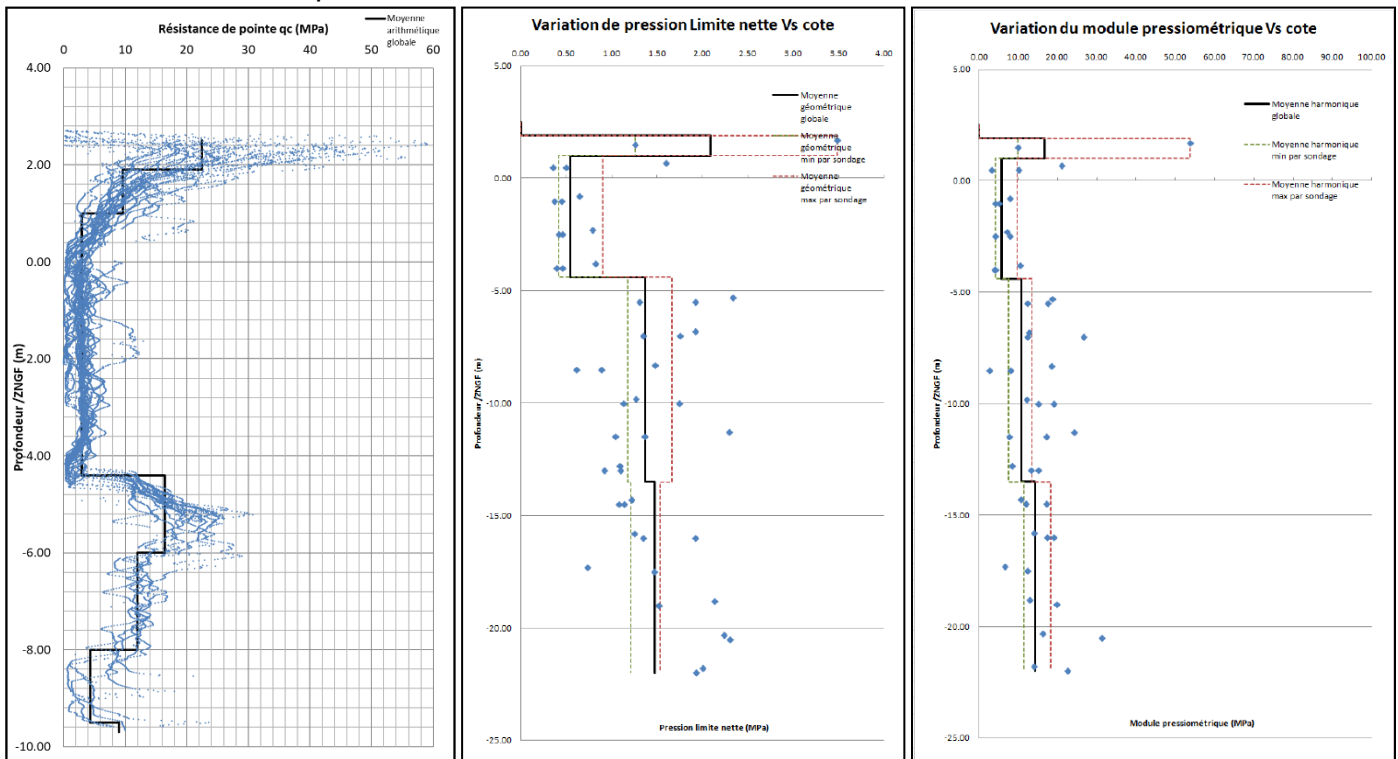


Figure 6 : Valeurs de résistance de pointe (q_c), de la pression limite (pl^*) et de module pressiométrique (E_M) pour le site de Sète

Tableau 1 : Classifications granulométriques

	d_{10}	d_{30}	d_{60}	NF EN ISO 14688-1
ST1 - 1.75 m	-	0.09	0.16	Sable silteux
ST5 - 2.50 m	-	0.12	0.17	Sable
ST1 - 3.50 m	-	0.12	0.16	Sable
ST5 - 3.50 m	-	0.09	0.14	Sable silteux
PDA3 - 5.25 m	-	0.09	0.14	Sable silteux
SP1 - 10.50 m	-	0.1	0.15	Sable silteux

Tableau 2 : Estimations de perméabilité

	Sherard	Justin & al.
ST1 - 3.50 m	$3.1E-05 \text{ m/s}$	$2.0E-05 \text{ m/s}$
ST5 - 3.50 m	$2.6E-05 \text{ m/s}$	$1.8E-05 \text{ m/s}$
PDA3 - 5.25 m	-	$6.8E-06 \text{ m/s}$

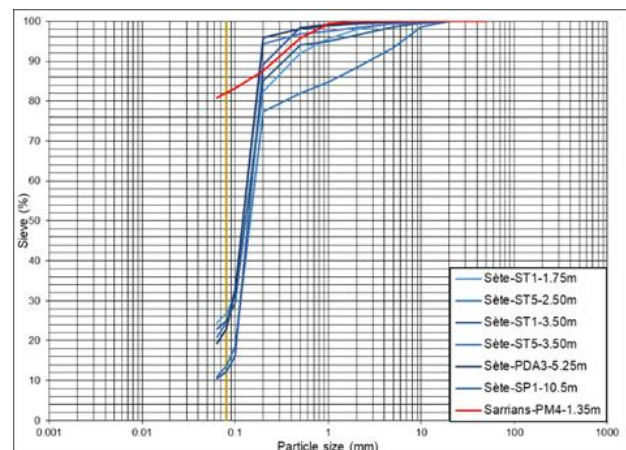


Figure 7 : Courbes granulométriques sur des échantillons de remblais sableux

3.3. Essais CLT et résultats

Deux sondages de type CLT, nommés CLT2 et CLT3 ont été menés à proximité d'un sondage pressiométrique SP3.

Un essai CLT est interprété conformément au mode opératoire défini dans la thèse d'Ali (2010). Après un temps de relaxation de 10 min, la pointe du pénétromètre est foncée dans le sol par paliers croissants. Chaque palier étant maintenu une minute, des mesures de déplacement sont réalisés à 15, 30 et 60 sec.

Les résultats de tous les essais CLT de résistance de pointe (q_c), de frottement latéral (f_s) et de pression interstitielle (u_2) en fonction du déplacement (h) lors des phases de chargement de l'essai jusqu'à la résistance de pointe (q_{CLT}) sont représentés en échelles normalisées en Fig. 8.

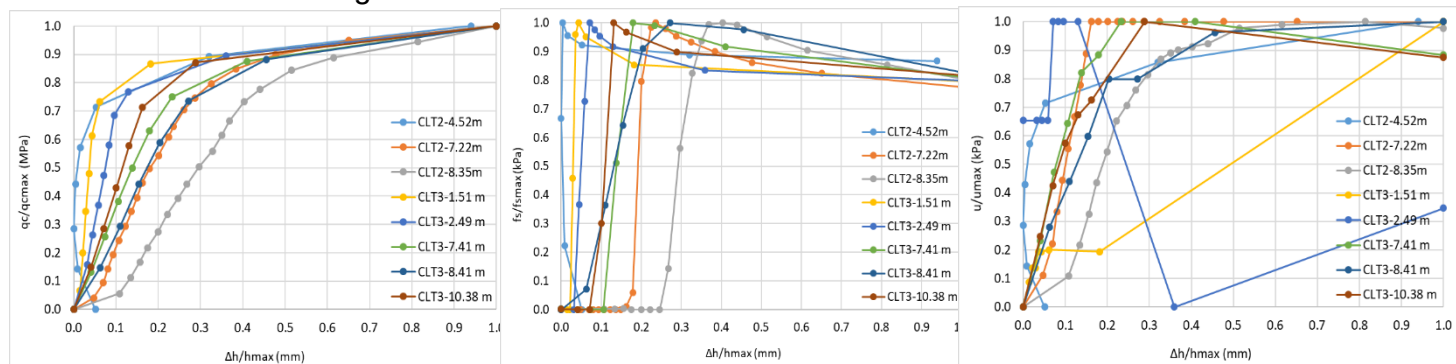


Figure 8 : Exemple d'un essai CLT (CLT2-7,22 m) et résultats de tous les essais CLT (q_c , f_s , u_2) lors des phases de chargements, en fonction du déplacement sous la pointe (h), représentés en échelles normalisées

Les 8 essais CLT du site de Sète ont été menés dans les sables à sables limoneux, entre 4,52 m et 8,35 m pour CLT2 et entre 1,51 m et 10,38 m pour CLT3.

Les courbes de résistance de pointe (q_c) entre les différents essais présentent les mêmes allures aux différentes profondeurs testées. L'évolution du frottement latéral (f_s) dans les sables se manifeste par l'atteinte d'un pic à une déformation critique puis une relaxation vers une asymptote.

La pression interstitielle (u_2) augmente rapidement lors de l'essai avant de se stabiliser. On notera que les essais à 1,51 m et 2,49 m en CLT3 présentent des allures différentes dues au fait que l'un de ces essais a été réalisé hors nappe (1,51 m) et l'autre à l'affleurement immédiat avec la nappe (2,49 m). Dans les matériaux sableux, en valeur absolue, la pression interstitielle ne varie en réalité que très peu, la dissipation étant très rapide due à une perméabilité forte dans ces matériaux (Tableau 2).

4. Discussion

4.1. Facteurs d'influence sur l'essai

Plusieurs facteurs peuvent avoir un impact sur l'essai CLT (Teyssier et al., 2020) :

- Les conditions de drainage au cours de l'essai, dépendantes de la bonne dissipation de la pression interstitielle avant le début de l'essai.
- Le raccourcissement élastique des tiges, nécessitant l'application d'un facteur de correction sur les déplacements mesurés du même ordre de grandeur que ceux-ci dans les terrains très frottant ou collants.

Pour les conditions de drainage, la pression interstitielle au cours des essais a été mesurée au cours du temps. Dans ces terrains sableux, elle montre très peu de variations lors des paliers de chargements / déchargements. Après un pic de pression, on observe soit une décroissance ou un plateau, ce qui permet de considérer l'essai comme étant drainé (Teyssier et al., 2020).

Lors de l'essai de chargement de pointe, le déplacement est mesuré en fonction de la pression appliquée en tête du train de tige. Ainsi pour obtenir le déplacement réel de la pointe, il faut soustraire à la mesure réalisée une estimation de la compression des tiges.

Sur l'ensemble des essais sur ce site, l'incidence de la correction des tiges n'excède pas 4% du déplacement mesuré, ce qui permet de considérer qu'elle n'a pas d'impact significatif sur la précision des mesures (Teyssier et al., 2020).

4.2. Comparaison de modules

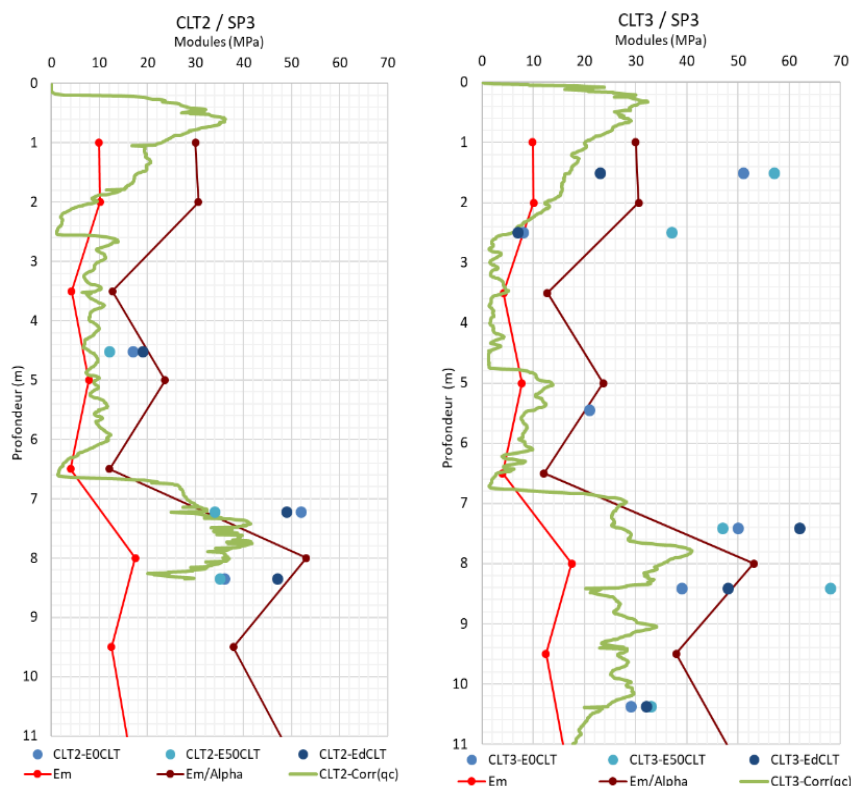


Figure 9 : Comparaison entre modules E_{0CLT} , E_{50CLT} , E_{dCLT} , module pressiométrique (E_M), module E_M/α et module obtenu par corrélation pénétrométrique

A partir des courbes de chargement / déchargement des différents essais CLT, les modules E_{0CLT} , E_{50CLT} et E_{dCLT} ont été calculés. Le module E_{0CLT} est comparé aux modules pressiométriques (E_M) du sondage le plus proche, au module issu du rapport E_M/α , où α est le coefficient rhéologique de Ménard propre au pressiomètre et défini par la nature lithologique et le ratio E_M/p_l (pris égal à 0,33), et au module calculé par corrélation sur la résistance de pointe (q_c) selon les formules de Van Impe (1986) Eq. (4) & Eq. (5) :

$$E = 3q_c \text{ pour } q_c < 5 \text{ MPa} \quad (4)$$

$$E = 7,5 + 1,5q_c \text{ pour } 5 < q_c < 30 \text{ MPa} \quad (5)$$

Les résultats sont présentés en Fig. 9. Les modules calculés à partir du q_c se placent entre les modules E_M et les modules E_M/α , en fonction de la compacité plus ou moins élevée des sables.

Les modules E_{0CLT} obtenus sont du même ordre de grandeur que les modules obtenus par le rapport E_M/α . En comparant le module E_{0CLT} avec les autres modules issus de l'essai CLT (E_{50CLT} et E_{dCLT}), une dispersion des valeurs est observable sans pour autant qu'une des trois valeurs de module CLT ne se distingue comme étant systématiquement plus ou moins élevée que les autres. Néanmoins ces valeurs restent dans les mêmes ordres de grandeurs.

4.3. Application à un calcul en déformations

Pour la modélisation du calcul de tassement sous semelle, nous considérerons fictivement un terrain naturel à 6 m de profondeur, avec une semelle carrée de 1,5 m de largeur, ancrée de 1 m dans les sables sous une charge verticale centrée de 700 kN. Le calcul est tout d'abord mené selon la méthode pressiométrique. Les données pressiométriques, pénétrométriques et CLT sont synthétisées dans le Tableau 3 suivant :

Tableau 3 : Données de calculs pressiométriques et pénétrométriques

	Zinf (m)	pl* (MPa)	E _M (MPa)	q _c (MPa)	E _{0CLT} (MPa)	E _{50CLT} (MPa)	E _{dCLT} (MPa)	E _{CLTmoy} (MPa)
Sables limon. 1	-7,25	0,39	4	15,7	51	40,5	55,5	49
Sables limon. 2	-8,75	1,92	17,5	16,0	37,5	51,5	47,5	45,5
Sables	-10,25	1,75	12,5	11,6	29	33	32	31,3

Selon la méthode pressiométrique (NF P94-261, formules §H.2.1.2), le tassement obtenu est de 7,1 mm. Pour la méthode pénétrométrique (NF P94-261, formules §J.3.1) par corrélation sur les résistances de pointe (q_c), il est de 9,2 mm.

Si l'on considère les modules CLT comme étant proches de modules obtenus avec la relation E_M/α, donc des modules de type œdométriques, ils peuvent être utilisés directement pour la réalisation de calculs de déformation en élasticité linéaire. A l'aide du logiciel Settle 3D, ce calcul a été réalisé en injectant directement les modules CLT pour chaque couche. Le tassement obtenu est de 7,4 mm.

5. Conclusion

L'essai de chargement CLT est un essai de chargement / déchargement pouvant aisément être couplé à une campagne de reconnaissance au pénétromètre statique pour acquérir un paramètre de déformabilité des sols à différentes profondeurs.

Ainsi des modules de déformation peuvent être calculés. Ceux-ci sont proches de modules calculés par le ratio E_M/α issu du pressiomètre et permettent d'obtenir pour cet exemple des résultats de tassements similaires.

En perspective, il sera nécessaire de réaliser de nouvelles campagnes sur des terrains de nature et de compacité différentes afin de confirmer la concordance du module CLT avec un module de type œdométrique. Le protocole expérimental établi initialement par Ali (2010) devra être adapté dans les cas de sols fins très peu perméables avec des paliers de chargements / déchargements plus longs.

6. Références bibliographiques

- Ali H. (2010). Caractérisation améliorée des sols par l'essai de chargement de pointe au piezocone – Application au calcul des fondations profondes. (Improved characterization of soils by the Cone Loading Test – Application to calculation of deep foundations) Doctoral degree, University Blaise Pascal – Clermont-Ferrand II.
- Arbaoui H., Gourvès R., Bressolette Ph., Bodé L. (2006). Mesure de la déformabilité des sols in situ à l'aide d'un essai de chargement statique d'une pointe pénétrométrique. Can. Geotech. J. 43(4) 355-369.
- Khoury N., Zaman M., Ghabchi R., Kazmee H. (2010). Stability and permeability of proposed aggregate bases in Oklaho-ma. School of Civil Engineering and Environmental Science – The University of Oklahoma.
- Reiffsteck Ph., van de Graaf H., Jacquard C. (2018). Assessment of pile bearing capacity and load-settlement behavior, based on cone loading test (CLT) results. CPT18, 4th Int Symp. on Cone Penetration Testing, Delft.
- Teyssier A., Reiffsteck Ph., Jacquard C., Rispal M. (2020). Evaluation of modulus deformation and drainage condition during Cone Loading Tests. ISC6.
- NF P94-261 - Justification des ouvrages géotechniques - Normes d'application nationale de l'Eurocode 7 - Fondations superficielles.
- Robertson P.K., Cabal. K.L. (2014). Guide to cone penetration testing, Gregg Drilling & Testing, Inc, 6th edition.