

DETERMINATION DE MODULES DE DEFORMATION AU COURS D'ESSAIS CLT – METHODE DE CALCUL DES TASSEMENTS DE FONDATIONS SUPERFICIELLES

EVALUATION OF MODULUS DEFORMATION DURING CLT TESTS – SETTLEMENT CALCULATION METHOD FOR SHALLOW FOUNDATIONS

Alexandre TEYSSIER¹, Philippe REIFFSTECK², Michel RISPAL¹, Catherine JACQUARD¹

¹ Fondasol, Avignon, France

² Université Gustave Eiffel, 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. Cette communication présente une estimation des modules obtenus par essais CLT comparés aux modules obtenus au moyen du pressiomètre Ménard. En s'appuyant sur les travaux menés sur les fondations superficielles (méthodes Ménard, Schmertmann, Gazetas, élastique multicouche, etc.), une méthode de dimensionnement de fondations est proposée pour intégrer les modules CLT au calcul et comparée à des résultats d'essais de chargement.

ABSTRACT – The application of a loading by successive steps during a static cone penetration test, called Cone Loading Test (CLT), gives access to the soil vertical load / unload curve. This paper presents estimations of CLT moduli compared to moduli obtained by Menard pressuremeter. Based on shallow foundations studies (Ménard, Schmertmann, Gazetas, multi-elastic, etc.), a settlement calculation method will be proposed to integrate CLT moduli and will be compared to foundation loading tests.

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 un modèle géotechnique, 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 Robertson et Cabal (2014), il est même possible d'estimer leur nature lithologique alors qu'il s'agit d'un essai aveugle.

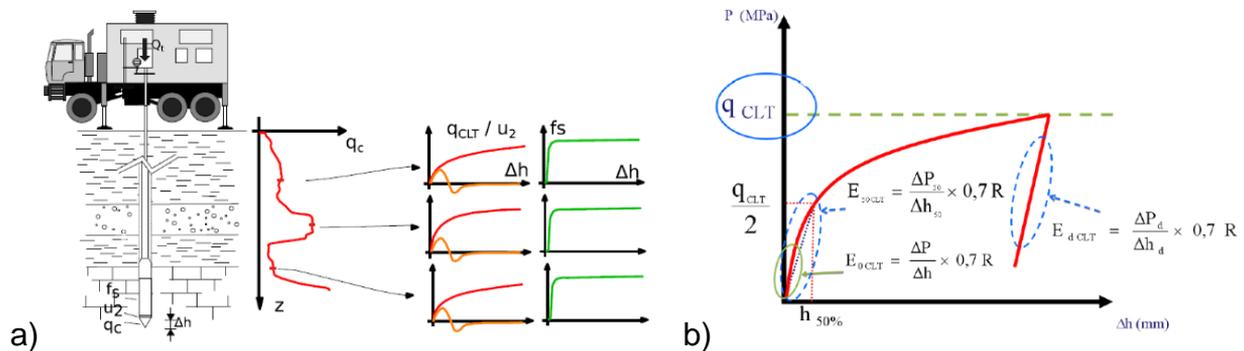


Figure 1 : a) Principe de l'essai CLT (Reiffsteck et al., 2018) ; b) Détermination des modules de déformation E_{0CLT} , E_{50CLT} et E_{dCLT} d'après la courbe pression/déformation (Ali, 2010)

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 le but de caractériser cette déformabilité qu'a été développé l'essai de chargement d'une pointe pénétrométrique (CLT) (Arbaoui et al., 2006 ; Ali, 2010). Il s'agit d'un essai hybride, combinant le fonçage classique au pénétromètre à un chargement incrémental de la pointe, qui permet d'obtenir des paramètres de résistance et de déformabilité.

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 (Figure 1a). 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 (Figure 1b).

La contrainte maximale atteinte à la rupture lors de l'essai de chargement est la résistance limite de pointe notée q_{CLT} (Figure 1b). Cette contrainte est généralement plus faible que la résistance à la pénétration classique mesurée en fonçage à une vitesse de 20 mm/s (q_c) car obtenue à une vitesse quasi-nulle.

A partir de la courbe P (Δh : variation déplacement), 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 $P_{50} = q_{CLT}/2$ et h_{50} .
- 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 et al., 2018). D'autres travaux portant sur l'étude des conditions de drainages et des modules CLT obtenus ont été réalisées plus récemment (Teyssier et al., 2020, 2021 ; 2022).

Après une présentation du matériel utilisé, du site étudié et des résultats de modules obtenus avec les essais CLT et les essais pressiométriques, l'étude portera dans un premier temps sur la définition d'une méthode d'intégration des modules CLT à des méthodes de calculs traditionnelles de tassements de fondations superficielles dans le domaine élastique de déformations. Dans un second temps, la totalité des courbes de chargement/déformation des essais CLT seront intégrées afin de reconstituer la courbe théorique de tassement d'une fondation superficielle. Le résultat obtenu de cette reconstruction sera comparé aux essais de chargements de fondations réalisés sur le site.

2. Le Cone Loading Test

2.1. Le pénétromètre CPT

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

La pointe pénétrométrique, conforme à la norme NF EN ISO 22476-1, est une pointe u_2 de section 10 cm². Dans le cadre des essais expérimentaux présentés dans cet article, la pointe utilisée avait une section de 4 cm². 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.

2.2. Le système de chargement de l'essai CLT

Le dispositif de poussée CLT 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 de la pression interstitielle est lancé sur le système d'acquisition du pénétromètre. 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 Figure 2a.

Dans cette étude, les essais CLT ont été réalisés à faible profondeur (1 à 3 m), autorisant à négliger l'effet dû à la compression des tiges sur les mesures de déformations.

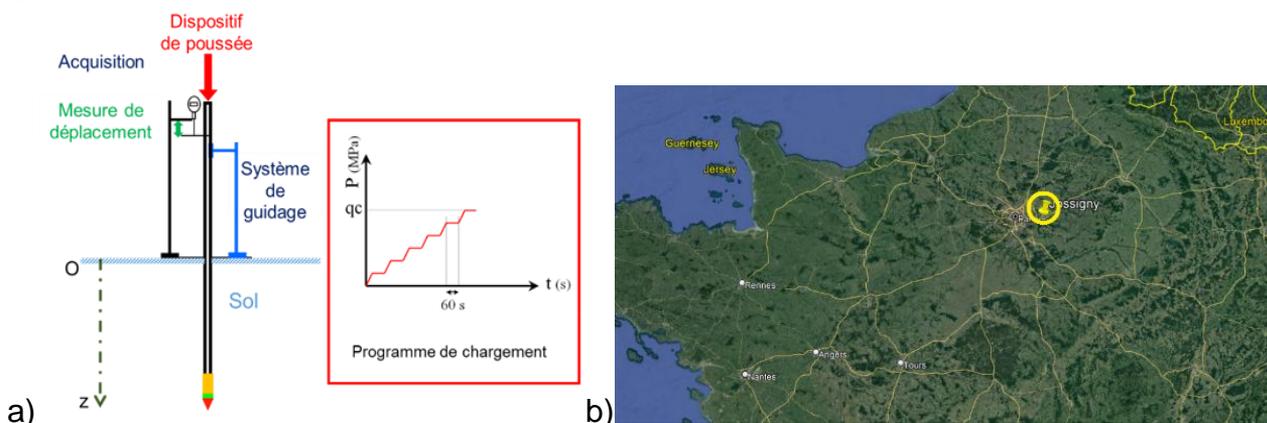


Figure 2 : a) Représentation schématique de l'instrumentation d'un essai CLT (d'après Arbaoui et al., 2006) ; b) Localisation du site de Jossigny (Google Earth)

3. Campagne expérimentale

La validation des essais Cone Loading Test a nécessité la réalisation de campagnes expérimentales croisées, comprenant la réalisation d'investigations traditionnelles (PMT, CPT) mais aussi la réalisation d'essais de chargement de fondations superficielles.

Le site expérimental de Jossigny, en France a été retenu pour cette étude, localisé en Figure 2b.

3.1. Description du site et résultats des essais in situ

Le site de Jossigny est situé le long de l'autoroute A4, à l'Est de Paris (Aire de Ferrières). Il est sensiblement plat et horizontal et composé de limons argileux sur les 6 premiers mètres, globalement homogènes sur les 3 premiers.

Une vaste campagne d'investigations a été menée sur ce site. Les investigations suivantes sont retenues pour cette étude (Arbaoui, 2003) :

- 5 sondages pressiométriques, sonde standard, jusqu'à 3 à 6 m de profondeur.
- 6 essais de pénétrations statique jusqu'à 3 à 6 m de profondeur.
- 17 essais de chargement de fondations superficielles, avec chargement axial centré, de dimensions 1 m x 1 m, avec un encastrement dans le sol négligeable (d'après Canépa et Despresles, 1990).

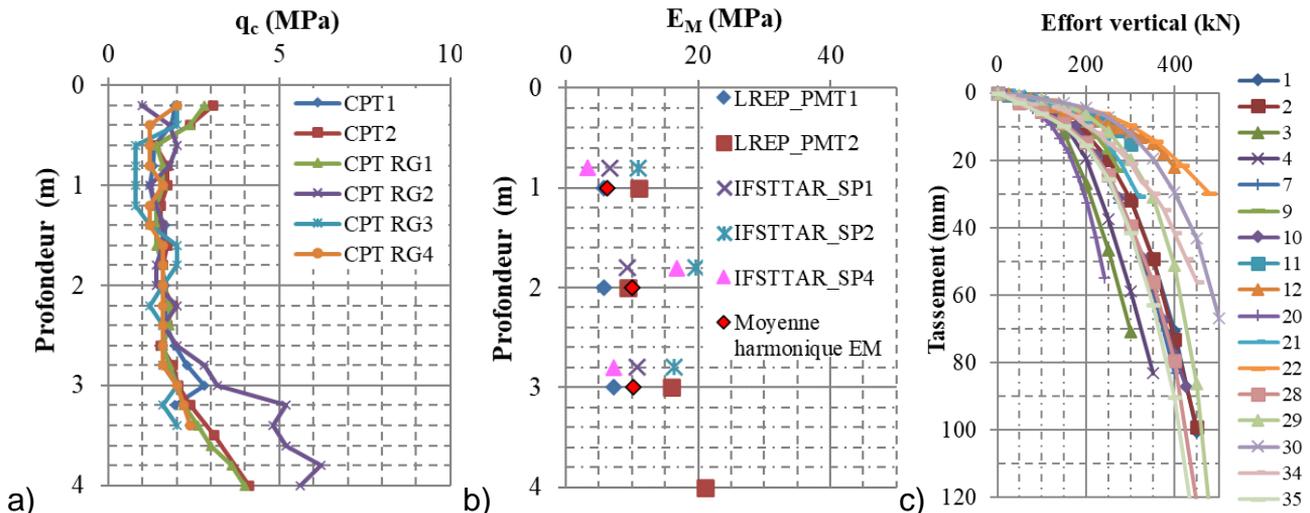


Figure 3 : a) Résistance de pointe (q_c) ; b) Module pressiométrique (E_M) ; c) Chargements verticaux de fondations superficielles

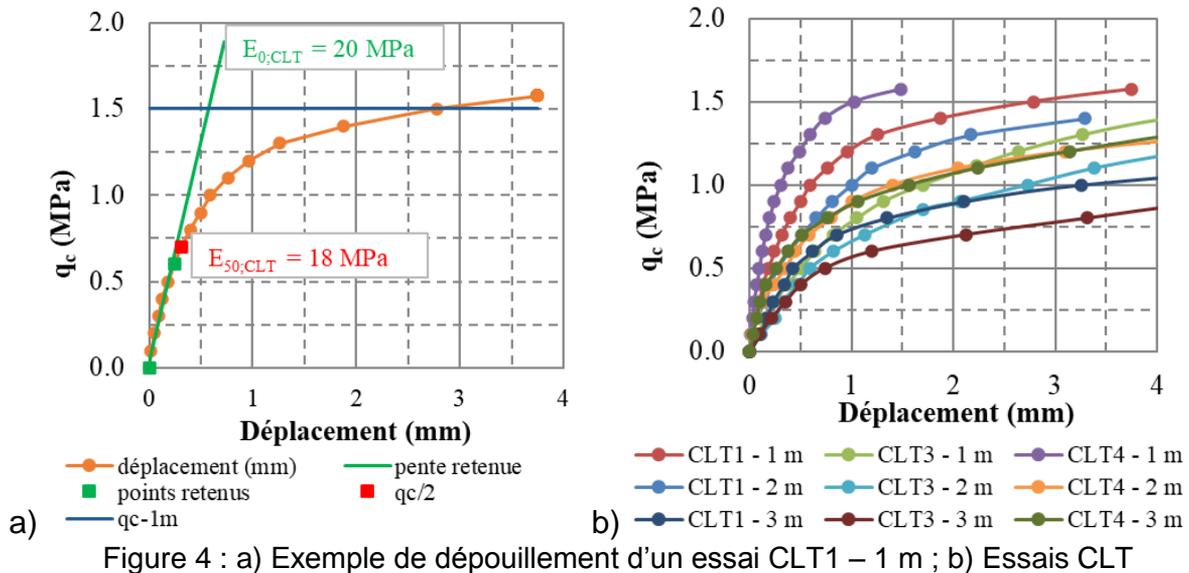
Les Figure 3a et b donnent une synthèse de la résistance de pointe statique (q_c) et du module pressiométrique (E_M) sur les 4 premiers mètres du site. La Figure 3c présente un résumé des différents essais de chargement de fondations menés sur le site.

3.2. Cone Loading Tests et résultats

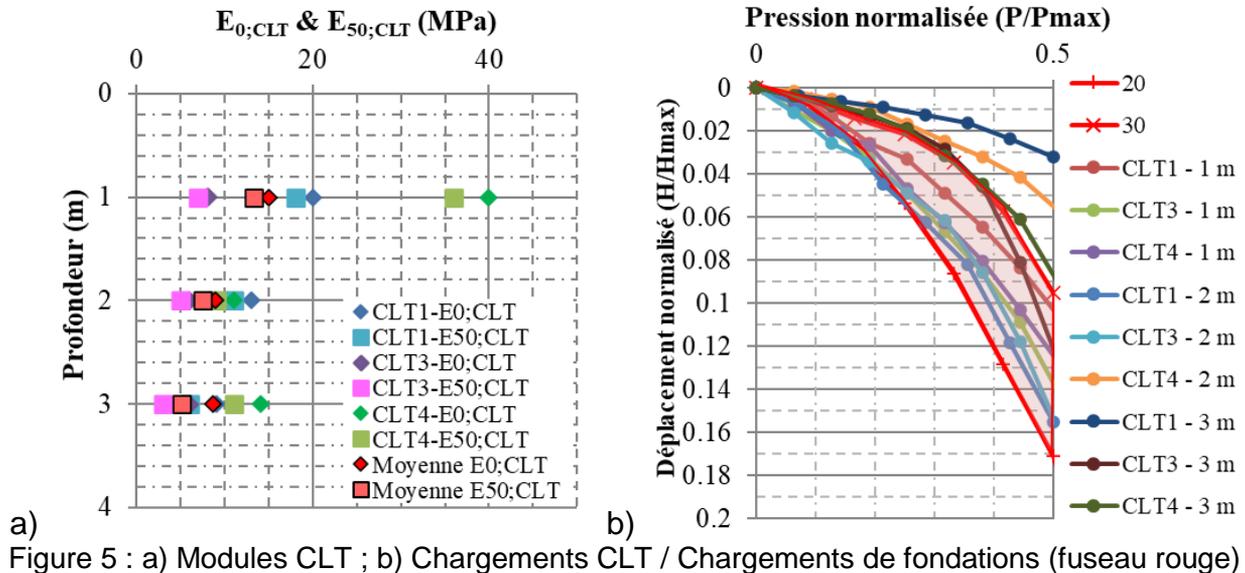
Sur le site de Jossigny, 3 sondages avec des essais CLT sont considérés dans cette étude (CLT1, CLT3 et CLT4). Les essais CLT sont interprétés conformément au mode opératoire défini par Ali (2010). Après un temps de relaxation de 10 min, la pointe du pénétromètre est foncée dans le sol par paliers croissants. Chaque palier étant maintenu une minute, des mesures de déplacement sont réalisées à 30 et 60 secondes.

La Figure 4a présente un exemple de dépouillement d'essai CLT. La Figure 4b regroupe tous les essais CLT menés sur le site de Jossigny entre 1 et 3 mètres (déplacements à 60 secondes).

Les différentes valeurs de modules CLT obtenues sont représentées en Figure 5a. Les modules CLT dans les limons argileux de Jossigny ont le même ordre de grandeur que les modules pressiométriques mesurés aux mêmes profondeurs.



La moyenne des modules $E_{0;CLT}$ à 1 mètre de profondeur est néanmoins plus haute, notamment dû à l'essai CLT4 pour lequel il a été observé des sols plus compacts en surface.



3.3. Synthèse des résultats pour le site de Jossigny

Plusieurs couches dans les limons argileux de Jossigny sont distinguées (0-1 m, 1-2 m, 2-3 m, 3-6 m). Le Tableau 1 résume les paramètres géomécaniques obtenus.

Tableau 1 : Paramètres géomécaniques Jossigny

z (m)	q_c (MPa)	E_M (MPa)	I_c^* (-)	α_E^{**} (-)	E_v (MPa)	$E_{0;CLT}$ (MPa)
0-1	1.3	6.2	2.35	11.7	15.1	15
1-2	1.7	10	2.75	11.7	19.7	8.9
2-3	2.0	10.2	3.02	11.7	23.1	8.6
3-6	4.1	21	2.80	11.7	47.3	-

* I_c : indice de comportement du sol

** α_E : coefficient de corrélation sur la méthode pénétrométrique (NF P94-261)

Le module de Young est déduit d'après les relations de la norme NF P94-261-J.2.2. Sur les 3 premiers mètres, nous retenons les valeurs moyennes $E_y = 18,7$ MPa et $E_{0;CLT} = 10,2$ MPa.

4. Discussions

4.1. Chargements CLT et chargements de fondations superficielles

Les essais de chargement de fondations superficielles (fuseau rouge défini avec les essais n°20 et n°30) sont comparés aux courbes de chargement des essais CLT, en axes normalisés (valeurs divisées par les valeurs maximales atteintes) en Figure 5b.

On peut noter une bonne correspondance entre chargements de fondations et chargements CLT pour les essais de 1 et 2 mètres. Ainsi le module initial tangent CLT peut être comparé au module initial tangent lors d'essais de chargement de fondations.

Dans un second temps, les équations des hyperboles moyennes entre CLT1, CLT3 et CLT4, associées aux chargements d'essais CLT à 1 et 2 mètres, sont déterminées afin d'intégrer la totalité des courbes d'essais CLT aux calculs de tassements. L'objectif est de reconstruire, à partir des courbes d'essais de chargements CLT, les courbes de chargements en grandeurs réelles sous fondations superficielles.

Une procédure inspirée de celle proposée par Briaud (2007) intègre une relation hyperbolique entre déformation ε et contrainte σ (Equation 1) :

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\varepsilon_1}{a\varepsilon_1 + b} \quad (1)$$

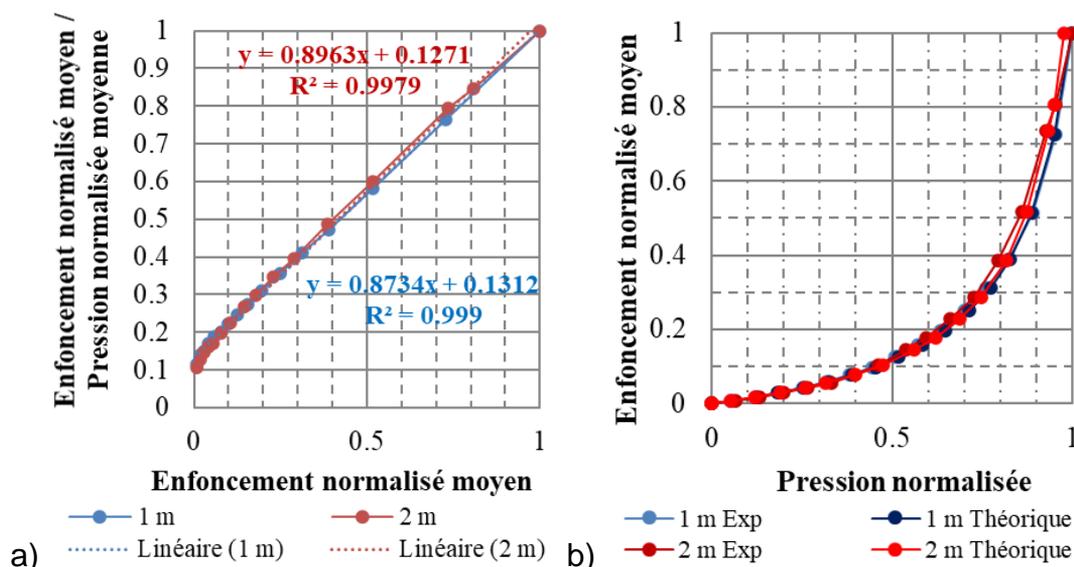


Figure 6 : a) Régressions linéaires et détermination des coefficients a et b ; b) : Vérification entre courbe hyperbolique théorique et courbe expérimentale

Par inversion puis régression linéaire, les coefficients a et b de l'équation de l'hyperbole sont déterminés (Figure 6a). La bonne concordance entre courbe théorique et courbe expérimentale est vérifiée en Figure 6b pour les essais à 1 et 2 mètres.

4.2. Modules CLT et calculs de tassements de fondations

Les résultats de calculs de tassements obtenus par différentes méthodes (pénétrométrique et pressiométrique) sont comparés au tassement observé avec les essais de chargement de fondations (Figure 7a). Une régression de type loi puissance (Equation 2) est calculée à partir de tous les essais de chargements de fondations pour modéliser le tassement du sol (s) d'après tous les essais de chargements (V_d).

$$s = 0,00105 \times V_d^{1,77393} \quad (2)$$

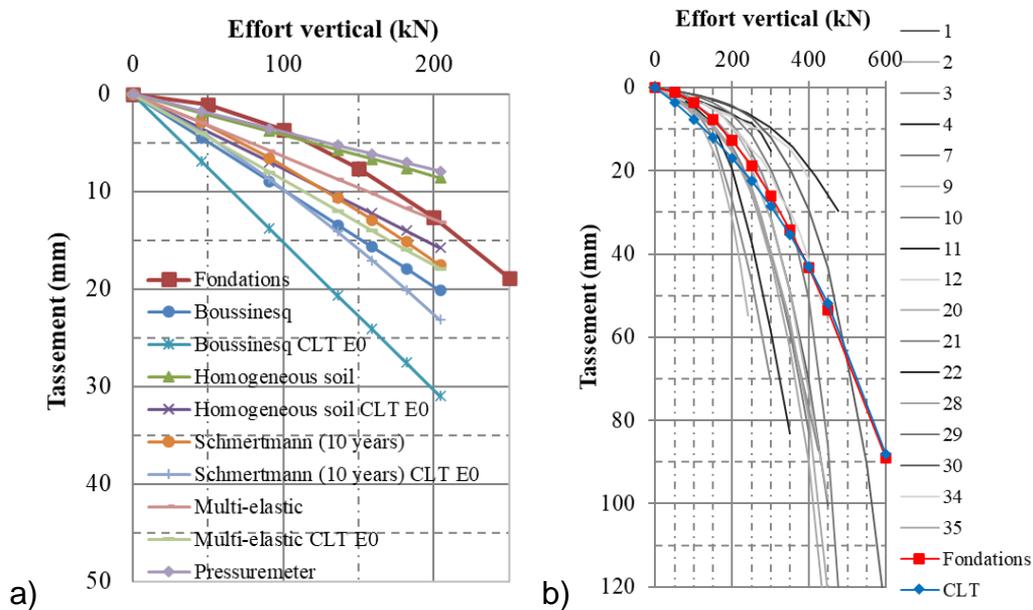


Figure 7 : a) Calculs de tassements selon les différentes méthodes de calculs ;
 b) Reconstitution de la courbe de tassement à partir des essais CLT

Les méthodes de calculs de tassements sont les suivantes :

- 1 : Boussinesq (NF P94-261-J.4.1)
- 2 : Sol homogène (NF P94-261.J.3.1)
- 3 : Schmertmann (NF P94-261-I)
- 4 : Multi-élastique (Streinbrenner (1934) et Bowles (1996))
- 5 : Pressiométrique (NF P94-261-H)

Les méthodes 1 à 4 sont ensuite appliquées en injectant les modules CLT ($E_{0;CLT}$) en remplacement des modules de Young (E_y). Les calculs sont réalisés avec des chargements (V_d) compris entre 0 et 204 kN, dans le domaine de déformation élastique. Les résultats des calculs de tassements sont présentés en Figure 7a. Les valeurs de tassements ont le même ordre de grandeur entre les chargements de fondations et les calculs selon la méthode sol homogène (2), la méthode multi-élastique (4) et la méthode pressiométrique (5).

Les tassements calculés avec les modules $E_{0;CLT}$ sont toujours supérieurs aux résultats obtenus à partir des modules E_y . Pour intégrer des modules issus d'essais CLT, un coefficient de calage nommé ψ est nécessaire. Pour chaque palier de chargement vertical, ces ratios demeurent constants. Ils sont appliqués par produit à la valeur de module $E_{0;CLT}$ et sont différents selon la méthode de calcul utilisée. Ils sont récapitulés dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Coefficient ψ

Méthode	1	2	3	4
ψ	1.54	1.84	1.27	1.37

Ainsi pour des limons argileux, grâce à ce coefficient ψ , il est possible d'intégrer les modules $E_{0;CLT}$ à des méthodes de calculs de tassements traditionnelles.

4.3. Reconstruction de la courbe de tassement sous fondation

En considérant une loi hyperbolique moyenne intégrant les essais CLT à 1 et 2 mètres (a et b déterminés selon Figure 6a) et en exprimant la déformation en fonction de la contrainte (puis le chargement V_d en considérant des semelles de 1 m² de surface), en appliquant un coefficient de remise à l'échelle θ , l'équation est la suivante (Equation 3) :

$$s = \theta \frac{-b \times V_d}{aV_d^{-1}} \quad (3)$$

Avec $\theta = 0,3 \times (A/A_c)$, A : surface fondation et A_c : surface cône pointe pénétromètre.

Les résultats sont présentés en Figure 7b. Une bonne correspondance peut être observée entre la courbe reconstituée à partir des essais CLT (bleu) et la régression puissance des essais de chargement de fondations (rouge), avec un léger décalage dans le domaine de déformation élastique entre les courbes.

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.

Avec cette étude menée sur les limons argileux de Jossigny, il est possible d'intégrer des modules issus d'essais CLT à des méthodes de calculs de tassements traditionnelles en domaine élastique. Il est même possible, à partir des courbes de chargement CLT, de reconstituer le tassement prévisionnel d'une fondation sous chargement statique vertical centré.

En perspective, il sera nécessaire de réaliser de nouvelles campagnes, tout d'abord à nouveau dans des terrains limono-argileux pour confirmer ces résultats, puis dans des terrains de nature et de compacité différentes pour compléter l'étude et les tables de coefficients.

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. Doctoral degree, University Blaise Pascal – Clermont-Ferrand II.
- Arbaoui H. (2003). Mesure de la déformabilité des sols en place avec un pénétromètre
- 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.
- Briaud J.-L. (2007). Spread footings in sand: Load settlement curve approach. JGGE.
- Bowles J.E. (1996). *Foundation analysis and Design*. 5th edition McGraw-Hill.
- Canépa Y., Despresles D. (1990). Catalogue des essais de chargement de fondations superficielles réalisés sur sites par les LPC 11978-19901. FAER1.17 020. LREP Melun.
- NF P94-261 - Justification des ouvrages géotechniques - Normes d'application nationale de l'Eurocode 7 - Fondations superficielles.
- Reiffsteck P., 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.
- Robertson P.K., Cabal. K.L. (2014). *Guide to cone penetration testing*, Gregg Drilling & Testing, Inc, 6th edition.
- Steinbrenner W. (1934). *Tafeln zur Setzungsberechnung, Die Straße*, vol. 1, pp. 121-124.
- Teyssier A., Reiffsteck P., Jacquard C., Rispal M. (2020). Détermination de modules de déformation au cours d'essais CLT – Application au calcul de tassement des fondations. JNGG2020.
- Teyssier A., Reiffsteck P., Jacquard C., Rispal M. (2021). Evaluation of modulus deformation and drainage condition during Cone Loading Tests. ISC6.
- Teyssier A., Reiffsteck P., Jacquard C., Rispal M. (2022). Evaluation of modulus deformation during Cone Loading Tests (CLT) and settlement of shallow foundations. CPT22.